

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EVAPORACIÓN EN SUSTRATOS CON BASE EN FAO

RUBÉN ESPARZA OROZCO

T E S I S PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO



INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: Validación de los parámetros de evaporación en sustratos con base en FAO, realizada por el estudiante: Rubén Esparza Orozco, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS **HIDROCIENCIAS** CONSEJO PARTICULAR CONSEJERO DR. ABE QUEVEDO NOLASCO ASESOR DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA ASESOR DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ ASESORA DRA. BERTHA PATRICIA ZAMORA MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, septiembre de 2023

VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE EVAPORACIÓN EN SUSTRATOS CON BASE EN FAO

Rubén Esparza Orozco, M.C. Colegio de Postgraduados, 2023

RESUMEN

El modelo de evaporación de agua en la superficie del suelo FAO, considera que está ocurre en dos etapas: en la primera la evaporación de agua del suelo se limita por la cantidad de energía disponible en el ambiente y la segunda se caracteriza por la reducción de la tasa de evaporación a causa de una menor disponibilidad de agua en el suelo. Ambas etapas de evaporación se identificaron en la superficie de los medios porosos: Tezontle al 100% (T100), Peatmoss al 100% (P100%) y una Mezcla de relación volumétrica 1:1 (M); por cada medio se hicieron dos repeticiones. La identificación de ambas etapas de evaporación permitió cuantificar los parámetros de evaporación: Agua Fácilmente Evaporable (AFE) y Agua Evaporable Total (AET). El parámetro de evaporación AFE tienen un rango de 1.7 - 13.48 mm para los tres medios analizados. En los suelos, este parámetro tiene un rango de 2 a 12 mm. Similarmente, el parámetro de evaporación AET se determinó en un rango de 17.33 a 56.01 mm, en los suelos este parámetro tiene un rango entre 6 a 29 mm. Durante la etapa 2 de evaporación, en los tres tratamientos se observó que el coeficiente de reducción, Kr, no decrece linealmente con el contenido de humedad. Por lo que, el modelo FAO 56 difiere con respecto al Kr observado durante esta etapa de evaporación. Se ajustaron dos modelos polinómicos y uno potencial para describir el coeficiente de reducción Kr. Se describe la implementación del mini lisímetro que se utilizó para la medición de las láminas de agua evaporada. El mismo cuenta con instrumento para pesar cumple con los requisitos metrológicos de exactitud Clase III, y cuenta con una superficie expuesta del contenedor de 710.2 cm², que permitieron medir láminas de agua evaporada con 0.014 mm de precisión.

Palabras clave: Evaporación de agua, sustratos, lisímetro.

VALIDATION OF EVAPORATION PARAMETERS BASED ON FAO

Rubén Esparza Orozco, M.C. Colegio de Postgraduados, 2023

ABSTRACT

The FAO model of water evaporation on the soil surface considers that this occurs in two stages: in the first, the evaporation of water from the soil is limited by the amount of energy available in the environment, and the second is characterized by the reduction of the evaporation rate due to less water availability in the soil. Both evaporation stages are identified on the surface of the porous media: 100% Tezontle (T100), 100% Peatmoss (P100%) and a 1:1 volumetric ratio Mixture (M); Two repetitions were made for each medium. The identification of both evaporation stages allowed quantifying the evaporation parameters: Easily Evaporable Water (AFE) and Total Evaporable Water (AET). The AFE evaporation parameter has a range of 1.7 - 13.48 mm for the three analyzed media. In soils, this parameter has a range of 2 to 12 mm. Likewise, the evaporation parameter AET is calculated in a range of 17.33 to 56.01 mm, in soils this parameter has a range between 6 to 29 mm. During stage 2 of evaporation, in the three treatments it is observed that the reduction coefficient, Kr, does not decrease linearly with the moisture content. Therefore, the FAO 56 model differs with respect to the Kr observed during this evaporation stage. Two polynomial models and one potential model were fitted to describe the reduction coefficient Kr. The implementation of the mini lysimeter used to measure the sheets of evaporated water is described. It has a weighing instrument that meets the metrological requirements for Class III accuracy, and has an exposed surface of the container of 710.2 cm2, which allowed the measurement of sheets of evaporated water with 0.014 mm precision.

Keywords: Water evaporation, substrates, lysimeter.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento económico otorgado para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillos, especialmente al programa de Hidrociencias, por brindarme la oportunidad para realizar mis estudios.

A mi consejo particular por su atención, apoyo y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres, ejemplo de amor, integridad y trabajo; a quienes agradezco su apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

R	ESUMENiii
A	BSTRACTiv
A	GRADECIMIENTOSv
D	EDICATORIAvi
LI	STAS DE CUADROSx
LI	STA DE FIGURASxii
I.	INTRODUCCIÓN1
II.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS 5
	2.1 Objetivo general
	2.1.1. Objetivos específicos5
	2.2 Hipótesis general:
	• REVISIÓN DE LITERATURA
	3.1 Evapotranspiración6
	3.2 Modelos de evaporación7
	3.3 Sustratos en agricultura
	3.3.1. Peat moss
	3.3.2. Tezontle
	3.4 Lisímetros de pesaje 11
	3.5 PROY-NOM-010-SCFI-2014
	3.5.1 Características metrológicas de un instrumento13
	3.5.2 Propiedades metrológicas de un instrumento13
	a. Sensibilidad13
	b. Discriminación13
	c. Repetibilidad14
	d. Durabilidad14
	e. Exactitud14
	f. Linealidad14
	g. Excentricidad 14
	h. Exactitud14

CONTENIDO

3.5.3 Apéndice normativo: procedimientos de ensayo	14
a. Condiciones de normales de ensayo	14
b. Desempeño de pesar	15
c. Verificación de requisitos	16
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1 Mini lisímetro	17
4.1.1 Contenedores	17
4.1.2 Instrumento para pesar	18
a. Celda de carga	18
b. Software	19
c. Requisitos metrológicos	19
4.2. Medición de los parámetros de evaporación	20
4.2.1. Preparación de sustratos	20
4.2.2. Cuantificación de AFE y AET	20
4.2.3. Determinación del Coeficiente de reducción, Kr	21
4.2.4. Características de humedad: θ_{CC} y θ_{PMP}	22
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL	23
5.1 Mini-lisímetro	23
5.1.1 Instrumento para pesar	24
5.1.1.1. Prueba de desempeño de la báscula a carga instantánea	26
5.1.1.2 Prueba de desempeño de la báscula a carga constante sostenida	ı 28
5.2 Modelos de evaporación	35
5.2.1. Tasa de evaporación de referencia: Etapa 1 de evaporación	35
5.2.2. Parámetros de evaporación (AFE y AET)	36
5.2.2.1. Tezontle	36
5.2.2.2. Mezcla	38
5.2.2.3. Peatmoss	40
5.2.3. Coeficiente de reducción, Kr, en tezontle: observado y modelo FAO56	341
5.2.4. Contenidos de humedad y Curvas de Liberación de Agua (CLA)	45
VI. CONCLUSIÓN	48
VII. LITERATURA CITADA	48

ANEXOS	52
A.1 Presupuesto de fabricación del mini lisímetro de pesaje	52
A.2 Armazón fabricado para el montaje del sensor	53
A.3 Software del instrumento para pesar	54
A.4 Diagrama de conexiones para la fabricación de la tarjeta PCB	57
A.5. Láminas de agua evaporada y coeficiente de reducción Kr horario	58
A.6 Cuantificación del parámetro de evaporación AFE	61
A.7 Cálculo del Kr	61
A.8. Características de humedad por sustrato.	63
A.9 Curvas de liberación de agua por sustrato (CLA)	65

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 5.1. Resultados de la prueba de pesada	. 27
Cuadro 5.2. Resultados de retorno a cero, para el sistema de pesada	. 27
Cuadro 5.3. Prueba de repetividad	. 28
Cuadro 5.4. Error promedio observado en las series de carga, para las tres celdas	
de carga	. 33
Cuadro 5.5. Lámina de agua evaporada acumulada día en las unidades de	
evaporación de referencia, Etapa 1 de evaporación.	. 35
Cuadro 5.6. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua	
Evaporable Total (AFE y AET) para el Tezontle100%	. 38
Cuadro 5.7. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua	
Evaporable Total (AFE y AET) para Mezcla 1:1 (v/v)	. 39
Cuadro 5.8. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua	
Evaporable Total (AFE y AET) para el Peatmoss 100%	. 41
Cuadro 5.9. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la Curva de	
Liberación de Agua (C.L.A., DeBoodt et al., 1974) para el tezontle	. 46
Cuadro 5.10. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la curva de	
liberación de agua (DeBoodt et al., 1974) para el peatmoss	. 47
Cuadro 5.11. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la curva de	
liberación de agua (DeBoodt et al., 1974) para la mezcla	. 47
Cuadro A.1. Relación de materiales y componentes para la construcción del	
instrumento para pesar del mini lisímetro	. 52
Cuadro A.2. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario	
del tezontle	. 58
Cuadro A.3. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario	
de la mezcla	.59
Cuadro A.4. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario del	
peat moss	. 60
Cuadro A.5. Cuantificación de lámina de fácilmente evaporable, AFE (mm)	. 61
Cuadro A.6. Tezontle: cálculo de Kr diario.	. 61

Cuadro A.7. Mezcla: cálculo de Kr diario	62
Cuadro A.8. Peat moss: cálculo de Kr diario	62
Cuadro A.9.Características de humedad del tezontle.	63
Cuadro A.10. Características de humedad de la Mezcla.	64
Cuadro A.11. Características de humedad en Peatmoss	64
Cuadro A.12. Curvas de liberación de agua	65
Cuadro A.13. Características de humedad de sustratos por C.L.A.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo de evaporación FAO 56	3
Figura 5.1. Vista general del mini lisímetro: (i) El contenedor y (ii) el instrumento	
para pesar de funcionamiento no automático de capacidad máxima de 5	
kg	.24
Figura 5.2. Módulos del instrumento para pesar.	25
Figura 5.3. Pruebas de desempeño del instrumento para pesar	26
Figura 5.4. Pruebas de operación de básculas de lisímetro con carga sostenida (5	
kg)	.29
Figura 5.5. Series de tiempo temperatura y error de peso por celda de carga	.30
Figura 5.6. Curvas de error por temperatura para diferentes celdas de carga	.31
Figura 5.7. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por	
temperatura para la celda de carga (C1)	.32
Figura 5.8. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por	
temperatura para la celda de carga (C2)	.32
Figura 5.9. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por	
temperatura para la celda de carga (C3)	.33
Figura 5.10. Compensación de error en las series de tiempo de peso con el modelo	
ajustados para cada celda de carga	34
Figura 5.11. Lámina de agua evaporada acumulada en las unidades de	
evaporación de referencia, Etapa 1 de evaporación.	36
Figura 5.12. Láminas de agua evaporada acumulada para identificar el final de la	
etapa 1 de evaporación (FAO 56), para el tezontle (con dos repeticiones	
TS1 y TS2) y la evaporación de referencia (TR)	.37
Figura 5.13. Láminas de agua evaporada acumulada para identificar el final de la	
etapa 1 de evaporación (FAO 56), para la mezcla (con dos repeticiones	
MS1 y MS2) y la evaporación de referencia (MR)	.39
Figura 5.14. Láminas de agua evaporada acumulada para identificar el final de la	
etapa 1 de evaporación (FAO 56), para la mezcla (con dos repeticiones	
Ps1 y Ps2) y la evaporación de referencia (P _R).	.40

Figura 5.15. Lámina de agua evaporada acumulada promedio de las unidades de
referencia (azul) y lámina de agua evaporada total promedio de las dos
unidades de secado por cada medio poroso considerado
Figura 5.16. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción
Kr del tezontle
Figura 5.17. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción
Kr de la mezcla43
Figura 5.18. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción
Kr del peatmoss 43
Figura 5.19. Relación del coeficiente de reducción Kr y el contenido de humedad
(V/V) para los medios porosos considerados44
Figura A.1. Diagrama general del instrumento para pesar del mini lisímetro
Figura A.2. Diagrama de conexión para la fabricación de la tarjeta PCB57
Figura A.3. Tezontle: C.L.A
Figura A.4. Mezcla: C.L.A67
Figura A.5. Peat moss: C.L.A

I. INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos en invernadero se ha intensificado en México durante las últimas dos décadas (Ruiz *et al.*, 2014) y el uso de sustratos en contenedor ha desplazado la producción tradicional del cultivo en suelo (Gayosso *et al.*, 2023). La selección de un material particular depende de su disponibilidad y costo, así como de la experiencia para utilizarlo (Bunt, 1988). El sustrato que se seleccione debe proveer: soporte al cultivo, un suministro suficiente de agua y aire, y disponibilidad de nutrientes (Martínez & Roca, 2011; Michel, 2011). Sin embargo, en ocasiones un material por sí mismo no cumple con las mejores características para el crecimiento adecuado de la planta, por lo que hay necesidad de realizar mezclas de materiales (Cruz *et al.*, 2010). El tezontle y la turba o peatmoss son dos de los sustratos ampliamente utilizados en México (Flores *et al.*, 2008; Vargas *et al.*, 2008).

El riego es la vía principal de suministro de agua a los cultivos que se desarrollan bajo invernadero (Liu *et al.*, 2013) y la cantidad de agua que debe aplicarse es equivalente a la evapotranspiración (ET) que se presenta en el cultivo (Allen *et al.*, 1998). Bajo este contexto, la evapotranspiración debe estimarse o medirse con la precisión suficiente para conseguir una programación eficiente de riego que permita un buen rendimiento de cultivo y el ahorro de agua.

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, la ET se estima comúnmente con datos meteorológicos, por medio de ecuaciones empíricas o semiempíricas. En 1990, una consulta de expertos concluyó con la recomendación del método FAO Penman-Montheith como método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀). La evapotranspiración de cultivo se determina multiplicando ET₀ por el coeficiente dual de cultivo, K_e + K_{cb}, componentes de evaporación y transpiración, respectivamente; o bien por el coeficiente único de cultivo, Kc, que integra ambas componentes (Allen *et al.*, 1998).

La metodología del coeficiente dual de cultivo ($K_e + K_{cb}$) es recomendable cuando se requieren mediciones de evapotranspiración precisas para el establecimiento de calendarios de riego diarios. Descomponer así el fenómeno de evapotranspiración

permite predecir los efectos generados por eventos individuales de humedecimiento del suelo, reflejados en el coeficiente de evaporación K_e (Allen *et al.*, 1998).

El modelo de evaporación FAO 56, considera que la evaporación que se presenta en la superficie expuesta del suelo ocurre en dos etapas. La primera cuando la superficie del suelo esta humedecida y la evaporación ocurre a tasa máxima, que se limita solo por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo. La lámina acumulada de evaporación al final de esta etapa es el parámetro de evaporación de agua fácilmente evaporable (AFE). Durante la segunda etapa, la superficie del suelo se encuentra visiblemente seca y la evaporación se ve reducida proporcionalmente a la cantidad de agua remanente llegando a cero cuando se evapora la totalidad de agua. El parámetro de evaporación agua evaporable total (AET), corresponde a la lámina acumulada desde la capacidad de campo hasta un contenido de humedad intermedio entre secado al horno y el punto de marchitez permanente. Ambas etapas se caracterizan por el valor del coeficiente de reducción Kr; igual a 1 durante la primera etapa de evaporación y reduciéndose proporcionalmente al contenido de humedad del suelo durante la segunda etapa de evaporación y reduciéndose proporcionalmente al contenido de humedad del suelo durante la segunda etapa de evaporación y reduciéndose proporcionalmente al contenido de humedad del suelo durante la segunda etapa de evaporación, ver Figura 1.1 (Allen *et al.*, 1998; Philip, 1957; Ritchie, 1972).

Además, de acuerdo con los conceptos y modelos de evaporación FAO 56, el parámetro AET se relaciona con las características de humedad del suelo en la expresión AET = $(\theta_{CC} - 0.5 \ \theta_{PMP}) Z_e$. Donde Z_e es la profundidad de la superficie del suelo sujeta a evaporación. La capacidad de campo representa la máxima cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias y al punto de marchitez permanente como el contenido de humedad en el sustrato en el cual las plantas se marchitan permanentemente (Porta *et al.*, 2003).

Sin embargo, la estimación de la componente evaporación con la metodología del coeficiente dual de cultivo (Allen *et al.*, 1998), tiene como base un modelo de evaporación de agua en suelos de campo y debe ser evaluada con el uso de sustratos hortícolas en contenedor en condiciones de invernadero.



Figura 1.1. Modelo de evaporación FAO 56.

Por otra parte, los lisímetros de pesaje son el instrumento estándar para la medición de evapotranspiración (Howell *et al.*, 1991). Hay dos principales tipos de lisímetro, de pesaje y drenaje. En los lisímetros de drenaje la ET se determina indirectamente recolectando el volumen de agua que drena del sustrato en el contendor de un volumen conocido de agua o lluvia. En contraste, los lisímetros de pesaje miden la ET directamente por el cambio de peso en el contenedor (Allen *et al.*, 1998; Beeson, 2011; McCauley *et al.*, 2021).

De acuerdo con la W.M.O. (2021), un lisímetro de pesaje consta de: un contenedor, relleno con sustrato sobre el que puede establecerse un cultivo; y un instrumento para pesar que permite medir los cambios de masa que ocurre en el contenedor en periodos de tiempo determinados.

Howell *et al.*, (1991), utilizaron los siguientes conceptos para describir la confiabilidad de un lisímetro: la resolución, incremento significativo de medición; la precisión, variabilidad

entre numerosas mediciones; y la exactitud, verificación de cualquier medición con un valor "verdadero". Además, resalta que la exactitud depende directamente del área expuesta del lisímetro, del rango de masa en que opera el lisímetro, y el sensor de carga seleccionado. También, menciona que muchos lisímetros tienen exactitud mejor que 0.05 mm. Allen *et al.*, (2011), mencionan que cuando los lisímetros son bien manejados, permiten mediciones de ET exactas y precisas con una resolución de 0.02 y 0.6 mm.

El tamaño de los lisímetros varía dependiendo del tipo de cultivo, disponibilidad de espacio, y presupuesto (Dong & Hansen, 2023). Beeson (2011), menciona las siguientes desventajas de los lisímetros: no son portátiles y existen restricciones físicas del tamaño de planta y masa de sustrato, estos últimos sujetos a la capacidad y sensibilidad de los dispositivos de medición.

Los lisímetros que tradicionalmente se usan en cultivos de campo han sido modificados y escalados para su uso en semilleros y cultivos de invernadero a los que se hace referencia como mini lisímetros (McCauely & Nackley, 2022). Para una pequeña planta de invernadero, la lisimetría manual es simple: se pesa una planta, se riega y se deja drenar el agua excedente y se pesa la planta nuevamente. Por ejemplo, Schuch & Burger (1997), utilizaron una báscula, con escala de medición *e* igual a 1 g, para determinar el consumo periódico de agua y el cálculo de los coeficientes de cultivo de una amplia variedad de plantas leñosas cultivadas en contenedores pequeños de 3 a 15.6 litros. Sin embargo, con un gran número de plantas, o cuando se requieren registros diarios, las mediciones manuales se vuelven laboriosas y costosas (Beeson, 2011).

Para evaluar el modelo de evaporación se midieron láminas de agua evaporada en periodos de una hora para identificar el inicio, desarrollo y fin de las dos etapas de evaporación, así como la cuantificación de los parámetros de evaporación AFE y AET. Con los parámetros de evaporación, se modeló el abatimiento del coeficiente de reducción, y se comparó con el coeficiente de reducción observado durante el ciclo de secado en los medios porosos considerados. La medición de las láminas de agua evaporada se hizo con un mini lisímetro de pesaje.

El objetivo de esta investigación es evaluar el Modelo de Evaporación FAO 56 cuando se hace uso de sustratos en contenedor en condiciones de invernadero en tres medios porosos en dos repeticiones: Tezontle 100% (T), Peatmoss 100% (P) y una mezcla 1:1 de relación volumétrica de ambos materiales (M). La medición de los parámetros de evaporación AFE, AET y la observación del Kr_{día} de reducción se hizo con un mini lisímetro de pesaje portátil multi contenedor que se fabricó para tal efecto. Las características de humedad determinadas de acuerdo con el modelo FAO 56, se compararon frente a las fracciones de agua características de la curva de liberación de agua de cada sustrato.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Evaluar el modelo de evaporación del FAO 56 con base en los parámetros la evaporación de agua fácilmente evaporable (AFE) y el agua evaporable total (AET), en los medios porosos Tezontle ($T_{100\%}$), Peatmoss ($P_{100\%}$) y Mezcla 1:1 (v/v) de ambos materiales ($M_{1:1}$).

2.1.1. Objetivos específicos

- Desarrollar e implementar un mini lisímetro de pesaje para la medición lámina de agua evaporada.
- Identificar del inicio, desarrollo y fin de las etapas de evaporación 1 y 2 durante el ciclo de secado de los medios porosos considerados.
- Cuantificar los parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua Evaporable Total (AFE y AET).
- Modelar el coeficiente de reducción en la etapa 2 de evaporación con el modelo FAO 56.
- Comparar el Kr_{FAO56} vs el Kr_{OBS} durante el ciclo de evaporación.
- o Determinar las características de humedad de los sustratos

2.2 Hipótesis general:

Los parámetros de evaporación AFE y AET permiten predecir los efectos generados por eventos individuales de humedecimiento en la tasa de evaporación de sustratos hortícolas.

III.REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Evapotranspiración

El riego es la vía principal de suministro de agua a los cultivos que se desarrollan bajo invernadero (Liu *et al.*, 2013) y la cantidad de agua que debe aplicarse es equivalente a la evapotranspiración que se presenta en el cultivo (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración se debe estimar o medir con precisión suficiente para conseguir una programación eficiente de riego que permita un buen rendimiento de cultivo y el ahorro de agua.

Se conoce como evapotranspiración (ET), como la combinación de dos procesos separados; uno es el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y el agua que transpira el cultivo (Allen *et al.,* 1998).

La ET no es simple de medir, su determinación experimental con métodos de balance de energía requiere de aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos. Por otro lado, los lisímetros son: difíciles de manejar, no baratos, su construcción requiere expertos y un mantenimiento continuo, para medir la ET. Normalmente en ambas opciones se restringen a trabajos de investigación. Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, la ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos, por medio de ecuaciones empíricas o semi-empíricas que se han desarrollado para determinar la ET del cultivo (Allen *et al.,* 1998).

En 1990, una consulta de expertos concluyó con la recomendación del método FAO Penman-Montheith como método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀), además del cálculo de evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). ET₀ es la tasa de ET de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua. El concepto de ET₀ se introdujo para

estudiar la demanda de ET de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de cultivo. ET_c se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos exentos de enfermedades, con buena fertilización, que crecen en áreas grandes bajo condiciones de humedad óptima del suelo, buen manejo y condiciones climáticas adecuadas para el cultivo (Allen *et al.*, 1998).

3.2 Modelos de evaporación

La metodología del coeficiente dual, $K_e + K_{cb}$, es recomendable cuando se requieren mediciones de evapotranspiración precisas para el establecimiento de calendarios de riego diarios (Allen *et al.*, 1998).

El uso del coeficiente dual permite distinguir las componentes de evaporación y transpiración de cultivo, al multiplicarse por la evapotranspiración de referencia ET_0 en $ET_{c.} = ETO$ ($\kappa_e + K_{cb}$). Descomponer así el fenómeno de evapotranspiración permite predecir los efectos generados por eventos individuales de humedecimiento del suelo, que se reflejan en el coeficiente de evaporación K_e . Sin embargo, dicha metodología fue con base en los modelos de evaporación de agua en suelos de campo, por lo que se deben evaluar cuando se aplican en sustratos en contenedores.

El modelo FAO 56, considera que la evaporación en la superficie expuesta del suelo ocurre en dos etapas. La primera, cuando la superficie del suelo esta humedecida y la evaporación ocurre a tasa máxima y se limita únicamente por la cantidad de energía disponible sobre la superficie del suelo. La lámina acumulada de evaporación al final de esta etapa, es el parámetro de evaporación agua fácilmente evaporable (AFE).

Durante la segunda etapa, la superficie del suelo se encuentra visiblemente seca y la evaporación se ve reducida proporcionalmente a la cantidad de agua remanente llegando a cero cuando se evapora la totalidad de agua. El parámetro de evaporación agua evaporable total (AET) corresponde a la lámina acumulada desde la capacidad de campo hasta un contenido de humedad intermedio entre secado al horno y el punto de marchitez permanente. Ambas etapas se caracterizan por el valor del coeficiente de reducción Kr; igual a 1 durante la primera etapa de evaporación y se reduce proporcionalmente al

contenido de humedad del suelo durante la segunda etapa (Allen *et al.,* 1998; Philip J, 1957; Ritchie, 1972).

El coeficiente de reducción Kr_{FAO56} se calcula con la expresión:

$$Kr_{FAO56} = (AET - D_{e, i-1}) / (AET - AFE)$$
(3.1)

Donde:

AFE (mm), agua fácilmente evaporable es una lámina acumulada de evaporación que representa la lámina máxima de agua que puede ser evaporada sin restricciones de la capa superficial del suelo.

AET (mm), agua evaporable total es la lámina máxima que puede ser evaporada del suelo, en una capa de suelo sujeta al secado.

D_{e, i-1}, (mm) es la lámina de agua evaporada acumulada al día anterior.

Además, de acuerdo con los conceptos y modelos de evaporación FAO 56, el parámetro AET se relaciona con las características de humedad del suelo en la expresión AET = $(\theta_{cc} - 0.5 \ \theta_{PMP}) \ Z_{e}$. Donde Z_{e} es la profundidad de la superficie del suelo sujeta a evaporación. La capacidad de campo representa la máxima cantidad de agua que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias y al punto de marchitez permanente como el contenido de humedad en el sustrato en el cual las plantas se marchitan permanentemente.

Como se comentó previamente esta metodología se desarrolló con base en modelos de evaporación de agua en suelos de campo, por lo que se deben evaluar con sustratos.

3.3 Sustratos en agricultura

El uso de sustratos en contenedor para la producción bajo invernadero ha desplazado la producción tradicional del cultivo en suelo (Gayosso *et al.*, 2023). Algunos de los sustratos comúnmente utilizados son: peatmoss, perlita, vermiculita, corteza triturada, fibra de coco, espuma de plástico (Bunt, 1988) y el tezontle. El sustrato que se seleccione debe proveer: soporte al cultivo, un suministro suficiente de agua y aire, y disponibilidad de nutrientes (Martínez & Roca, 2011; Michel, 2010). En ocasiones un material por sí

mismo no cumple con las mejores características para el crecimiento adecuado de la planta, por lo que hay necesidad de realizar mezclas de materiales (Cruz *et al.*, 2010). La selección de un material particular depende de su disponibilidad y costo, así como de la experiencia para utilizarlo (Bunt, 1988). Por ejemplo, en México, el tezontle y la turba son dos de los sustratos ampliamente utilizados para la producción de cultivos en maceta (Flores *et al.*, 2008; Vargas *et al.*, 2008).

Cuando las plantas se cultivan en contenedor, sus raíces se restringen a un volumen pequeño, consecuentemente, la demanda de agua, aire y nutrientes es mucho más intensa que aquella hecha por los cultivos que se producen en campo, cuyas raíces no tienen restricción de espacio (Bunt, 1988).

Los suelos tienen un espacio poroso total que generalmente no supera el 50 %, además de presentar escasa proporción de poros con aire (menos del 10 %), que lo convierten en un material poco adecuado para el uso en contenedores. Por tanto, dado el pequeño tamaño de partícula de los suelos se consideran poco propicios para la elaboración de mezclas de materiales (Cruz *et al.*, 2012).

La caracterización física de cualquier sustrato es con base en el estudio de la distribución de las fases: sólida, líquida y gaseosa, expresadas en unidades volumétricas. La relación entre dicha distribución y el potencial del agua en el sustrato se puede observar en las curvas de liberación de agua (CLA). Las CLA expresan la disponibilidad de agua para diferentes contenidos de humedad y se determinan por un método hidrostático que consiste en colocar los materiales en pequeños cilindros sobre una mesa de tensión, para drenarse con diferentes potenciales de agua, que dan lugar a los conceptos de: agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible, capacidad de aire y espacio poroso total. Conceptos que se desarrollaron para representar explícitamente la relación entre la distribución volumétrica agua-aire-sustrato y el potencial del agua en el sustrato durante el proceso de desorción de sustratos hortícolas (DeBoodt *et al.*, 1974; Fonteno, 1989; Michel, 2010; Teepe *et al.*, 2003; Vence *et al.*, 2013).

Las publicaciones de DeBoodt *et al.,* (1974) presentan el desarrollo de la curva de liberación de agua para sustratos orgánicos que les permitió clasificar la disponibilidad de agua de acuerdo con el contenido volumétrico de agua para diferentes cargas de succión:

- Agua difícilmente disponible (ADD): es el agua, en tanto por ciento en volumen, que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua.
- Agua de reserva (AR): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre 50 y 100 cm de columna de agua de tensión sobre el sustrato.
- Agua fácilmente disponible (AFD): es el tanto por ciento en volumen de agua que se libera entre 10 y 50 cm de tensión en columna de agua sobre el sustrato.
- Capacidad de aire (CA): es el porcentaje en volumen de agua que se libera entre
 0 y 10 cm de columna de agua de tensión, o tanto por ciento de aire que queda
 en el sustrato a una tensión de 10 cm de columna de agua.
- Material sólido (MS): es el porcentaje en volumen ocupado por la materia sólida del sustrato.
- Espacio poroso total (EPT): es el espacio de aire y agua, formado por la suma de ADD, AR, AFD y CA y que puede ser determinado en caso de sustratos minerales como gravillas, arenas etc., a partir de las densidades real y aparente, según: EPT = (1 – DA/DR) x 100. En el caso de sustratos orgánicos es preferible hacerlo por la suma de humedades al final del proceso.

Es importante señalar que los sustratos pueden varían en sus propiedades físicas aun siendo de un mismo material y origen. Por lo que es necesario caracterizarlos previo a su colocación en el contenedor o maceta (Cruz *et al.*, 2012).

3.3.1. Peat moss

El peat moss o turba se forma por la descomposición parcial de musgos y juncias. Solo o en mezcla, a nivel mundial, es por mucho el material más ampliamente utilizado para la producción en maceta (Bunt, 1988).

El tamizado es una forma rápida y fácil de clasificar la turba, pero los resultados dependen del contenido de humedad cuando se tamiza. El secado al aire puede resultar en la fragmentación de las turbas de esfagno jóvenes durante el tamizado mientras que las turbas de esfagno y juncia más humificadas pueden formar agregados estables al secarse (Bunt, 1988).

3.3.2. Tezontle

Uno de los materiales minerales ampliamente utilizados como sustrato para la producción de diversos cultivos de hortalizas y flores en contenedor, es la roca volcánica o también conocida como tezontle, dada la disponibilidad y el bajo costo (Vargas *et al.*, 2008).

3.4 Lisímetros de pesaje

Los lisímetros de pesaje son el instrumento estándar para medir directamente la ET en un periodo de tiempo. El cambio de masa en un contenedor relleno con sustrato, sobre el que se establece cualquier cultivo, corresponde a la lámina de agua evaporada por unidad de superficie expuesta del lisímetro (Dumroese *et al.*, 2015; Howell *et al.*, 1991; McCauely & Nackley, 2022; W.M.O., 2021)

Howell et al., 1991 utilizan los siguientes conceptos para describir la confiabilidad de un lisímetro: la *resolución,* incremento significativo de medición; la precisión, variabilidad entre numerosas mediciones; y la exactitud, verificación de cualquier medición con un valor "verdadero". Además, resalta que la exactitud depende directamente del área expuesta del lisímetro, el periodo de tiempo requerido entre lecturas, del rango de masa en que opera el lisímetro y el sensor de carga seleccionado. También menciona que muchos lisímetros tienen exactitud mejor que 0.05mm (Allen *et al.*, 2011). Cuando son bien manejados, permiten mediciones de ET exactas y precisas con una resolución de 0.02 y 0.6 mm.

La celda de carga es el elemento sensible de los lisímetros de pesaje. La celda de carga es un sensor analógico que convierte fuerza en una señal eléctrica por medio de un

convertidor analógico digital (Dong & Hansen, 2023; McCauely & Nackley, 2022; W.M.O., 2021).

El tamaño de los lisímetros de pesaje varía dependiendo del tipo de cultivo, disponibilidad de espacio, y presupuesto (Dong & Hansen, 2023). Además, los lisímetros que tradicionalmente se usan en cultivos de campo han sido modificados y escalados para su uso en semilleros y cultivos de invernadero a los que se hace referencia como mini lisímetros (McCauely & Nackley, 2022).

Con pequeñas plantas de invernadero, la lisimetría manual es simple y se puede utilizar una báscula portátil para determinar la lámina evaporada en un periodo de tiempo (Dumroese et al., 2015). Por ejemplo, Schuch & Burger, (1997) utilizaron una báscula portátil con resolución de 1 g para determinar el consumo periódico de agua; de manera similar McCauely & Nackley, (2022), calcularon el coeficiente de cultivo variedad de plantas leñosas cultivadas en contenedores pequeños de 3 a 15.6 litros. Sin embargo, con un gran número de plantas o cuando se requieren registros diarios, las mediciones manuales se vuelven laboriosas y costosas (Beeson, 2011).

3.5 PROY-NOM-010-SCFI-2014

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes que tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana; así como aquellas relativas a terminología y las que se refieran a su cumplimiento y aplicación.

El PROY-NOM-010-SCFI-2014 especifica los requisitos metrológicos y técnicos aplicables a todos los Instrumentos para pesar de funcionamiento no automático. Define un "Instrumento para pesar" como aquel que sirve para determinar la masa (t, kg, g, mg) de un cuerpo utilizando la acción de la gravedad sobre el cuerpo y lo clasifica según su método de instrumento de funcionamiento: automático o no automático. Un instrumento para pesar de funcionamiento no automático requiere la intervención de un operador durante el proceso de pesada para decidir si el resultado de la pesada es aceptable.

La construcción de un instrumento para pesar debe considerar los siguientes módulos: celda de carga, indicador electrónico de peso, dispositivo de procesamiento de datos analógico o digital, módulo de pesada, terminal/dispositivo de ajuste a cero, indicador digital.

De acuerdo con las exigencias actuales de las actividades científicas, tecnológicas, educativas, industriales y comerciales, se permite que un Instrumento Bajo Prueba (IBP) pueda utilizarse también para determinar otras cantidades, magnitudes, parámetros o características relacionadas con masa.

3.5.1 Características metrológicas de un instrumento

Capacidad de pesada (max, min, intervalo de pesada, max de seguridad) y capacidad de indicación automática.

Divisiones de escala o "d": valor expresado en unidades de masa de la diferencia entre dos valores indicados consecutivos, para una indicación digital.

División de la escala de verificación o "e": valor, expresado en unidades de masa, utilizado para la clasificación y verificación de un instrumento.

Número de divisiones de escala de verificación "n": cociente de la capacidad máxima entre la división de la escala de verificación:

$$n = Max / e \tag{3.2}$$

3.5.2 Propiedades metrológicas de un instrumento

a. Sensibilidad: un instrumento de medición es más sensible cuanto más pequeña sea la cantidad que puede medir. Para un determinado valor de masa medida, el cociente del cambio "Δl", de la variable observada "l", y el correspondiente cambio "Im", de la masa o "m".

$$S = \Delta I / \Delta m \tag{3.3}$$

b. Discriminación: Capacidad de un instrumento para reaccionar a pequeñas variaciones de carga. El umbral de discriminación para una determinada carga es el valor

de la carga adicional más pequeña que, al ser colocada suavemente en el receptor de carga o retirada de éste, produce un cambio perceptible de la indicación.

c. Repetibilidad: capacidad de un instrumento para proporcionar resultados concordantes entre sí cuando se coloca la misma carga varias veces y de manera prácticamente idéntica en el receptor de carga en condiciones de ensayo razonablemente constantes.

d. Durabilidad*:* capacidad de un instrumento para mantener sus características de desempeño durante un período de uso.

e. Exactitud*:* aptitud de un instrumento de medición para dar indicaciones próximas al valor convencionalmente verdadero de una magnitud.

f. Linealidad: capacidad de un instrumento de medición, para proporcionar una indicación próxima al valor convencionalmente verdadero, en todo el intervalo de medición.

g. Excentricidad*:* propiedad de un instrumento para dar resultados iguales o similares a una carga determinada, colocada en diferentes puntos del receptor de carga, y que tome como referencia el centro.

h. Exactitud: un instrumento no graduado de clase de exactitud Media (III), debe tener un número de divisiones de escala de verificación, *n*, entre 100 y 10 000, y una división de escala de verificación, *e*, 0.1 g < e <2g.

3.5.3 Apéndice normativo: procedimientos de ensayo

a. Condiciones de normales de ensayo

Temperatura de ensayo: Se deben realizar todos los ensayos a una temperatura ambiente estable, generalmente la temperatura ambiente normal a menos que se especifique lo contrario. La temperatura es considerada estable cuando la diferencia entre las temperaturas extremas registradas durante el ensayo no sobrepasa 1/5 del intervalo de temperatura del instrumento considerado, sin que sea superior a 5 °C (2 °C

en el caso de un ensayo de fluencia), y la velocidad de variación no sobrepase 5 °C por hora.

Suministro de energía: los instrumentos alimentados eléctricamente deben estar normalmente conectados a la red eléctrica o un dispositivo de suministro de energía y encendidos durante todos los ensayos.

Posición de referencia antes de los ensayos: en el caso de un instrumento susceptible de inclinarse, este deberá ser nivelado a su posición de referencia.

Recuperación: después de cada ensayo, se debe dejar que el instrumento se recupere lo suficiente antes del siguiente ensayo.

b. Desempeño de pesar.

Ensayo de pesada: Aplicar cargas de ensayo a partir de cero incrementando hasta Max y de forma similar retirar las cargas de ensayo hasta retornar a cero. Las cargas de ensayo seleccionadas deben incluir Max y Min y valores iguales o cercanos a los puntos en los cuales el error máximo permitido (EMP) cambia. También se puede aplicar las cargas ascendiendo por pasos con descargas entre pasos. Durante el examen de modelo, se debe observar que, al cargar o descargar pesas, se debe incrementar o disminuir progresivamente la carga.

Ensayo de repetibilidad: La diferencia entre los resultados de varias pesadas de una misma carga no debe ser superior del error máximo permitido del instrumento para esa carga. Para la aprobación de modelo, deben realizarse dos series de pesada: una con una carga de aproximadamente 50% y otra con una carga cercana a 100% de Max. Cada serie debe consistir de al menos tres pesadas.

Ensayo de retorno a cero: El error debido al retorno a cero, una vez que la indicación se ha estabilizado después de retirar una carga cercana a 1/3 Max que haya permanecido en el instrumento por media hora, no debe ser superior a 0.5 e.

c. Verificación de requisitos

Errores máximos permitido, EMP. Independientemente de la variación que permita entre resultados, el error de cualquier resultado de pesada individual no debe ser superior al error máximo permitido para la carga aplicada.

Variaciones debidas a la temperatura: la indicación sin carga no debe variar en más de una división de la escala de verificación cuando la diferencia en la temperatura ambiente es de 5°C.

Variaciones debidas al tiempo: en condiciones ambientales razonablemente constantes, un instrumento debe cumplir con los siguientes requisitos.

Fatiga: Cuando en el IBP se mantiene una carga cercana a 1/3 de su capacidad máxima, la diferencia entre la indicación obtenida inmediatamente después de colocar la carga y la indicación observada durante los siguientes 30 minutos no debe ser superior a 0.5 e. Sin embargo, la diferencia entre la indicación obtenida al cabo de 15 minutos y la obtenida al cabo de 30 minutos no debe ser superior a 0.2 e. Si no se cumplen estas condiciones, la diferencia entre la indicación obtenida inmediatamente después de colocar la carga en el instrumento y la indicación observada durante las siguientes cuatro horas no debe ser superior al valor absoluto del error máximo permitido para la carga aplicada.

Retorno a cero: una vez que la indicación se ha estabilizado después de retirar una carga cercana a 1/3 Max que haya permanecido en el instrumento por media hora, no debe ser superior a 0.5 e.

Ensayo de pesada: Aplicar cargas de ensayo a partir de cero incrementando hasta Max y de forma similar retirar las cargas de ensayo hasta retornar a cero. Se deben seleccionar por lo menos 5 cargas de ensayo incluyendo Max y Min.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La experimentación se llevó a cabo dentro del invernadero cercano a la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, localizado a una altitud de 2250 m sobre el nivel del mar, coordenadas 19° 29' N y 98° 54' O.

Primero, se describe el mini lisímetro de pesaje que se fabricó y utilizó para medición de la lámina de agua evaporada y la preparación de los sustratos (tezontle y peat moss). Posteriormente, se presenta la metodología que se siguió para la identificación de las etapas de Evaporación 1 y 2 y la cuantificación de los parámetros de evaporación (AFE y AET). También se presenta la modelación y observación del coeficiente de reducción Kr. Finalmente se determinaron los contenidos de humedad θ_{SAT} , θ_{CC} , θ_{PMP} , $\theta_{0.5PMP}$ de acuerdo con los conceptos y el modelo evaporación de FAO 56 para los medios porosos que se consideraron.

4.1 Mini lisímetro

En este apartado, se describen los materiales requeridos para la implementación del mini lisímetro de pesaje que se utilizó para la medición de la lámina de agua evaporada. El instrumento para pesar del lisímetro fue sometido a las pruebas de desempeño de acuerdo con el PROY-NOM-010-SCFI.

La lámina de agua evaporada mínima, LAE_{mín}, que puede medirse con el mini lisímetro se determinó del cociente entre la división de escala de verificación *e* (g) del instrumento para pesar y la superficie expuesta del contenedor, S (cm²). Considerando una densidad del agua igual a 1g /cm³, y expresando *e* en cm³, la mínima lámina de agua evaporada medible se determinó con la expresión:

$$LAE_{min} (mm) = e / S [cm^{3}/cm^{2}]$$
 (4.1)

4.1.1 Contenedores

Los contenedores de lisímetro se seleccionaron de plástico transparente con 12 cm de profundidad y una superficie expuesta rectangular de área 710.2 cm². Los contenedores se perforaron en la base para permitir el drenaje de agua.

4.1.2 Instrumento para pesar

a. Celda de carga

Una celda de carga de 5 kg de capacidad se utilizó como elemento sensible del instrumento para pesar y fue necesario fabricar un armazón para su montaje. El armazón se conforma de una base metálica y una plataforma de carga. A continuación, se lista el material que se requirió: perfil PTR $\frac{3}{4}$ " (60 cm), placas de acero (7.5 x 7.5 cm²), un tablón de madera de pino (30 cm x 30 cm)., dos tuercas tipo inserto para madera y 2 tornillos 1/4". Se utilizó arco eléctrico para soldar la base metálica. El sensor se fijó al armazón con 4 tornillos y 4 tuercas 3M.

La transducción de la señal del sensor a valores de carga se hizo con un microcontrolador Arduino y un amplificador HX711 (Dong & Hansen, 2023). Adicionalmente, se integraron los siguientes componentes electrónicos: módulo reloj, módulo mSD, tarjeta MSD 16 GB, display LCD 16x2. Todos los componentes del sistema electrónico se adquirieron por MercadoLibre. Para facilitar las conexiones y el montaje de los componentes, se diseñó y fabricó una tarjeta PCB a la que se soldaron pines y borneras con un cautín, pasta térmica e hilo de estaño para soldar. La tarjeta PCB se diseñó con el software libre EasyEDA y se pagó su fabricación a la empresa JLCPCB. Los componentes fueron dispuestos sobre la tarjeta PCB y se resguardo dentro de un gabinete plástico.

La calibración de la celda de carga se hizo con el programa "Calibration" (Kallhovd, 2017). El factor de calibración se obtuvo al someter la celda de carga sólida y calibrada de 5 kg que representa el 100% de la carga nominal de la celda, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- 1. Colocar el sistema de pesaje sobre una superficie nivelada y estable.
- 2. Remover cualquier carga aplicada sobre la plataforma.
- 3. Enviar "t" por el monitor serie para configurar la compensación de tara
- 4. Colocar la masa calibrada sobre la plataforma.
- 5. Enviar el peso de esta masa calibrada desde el monitor serie".
- 6. El monitor serial regresa el factor de calibración de la celda de carga.

b. Software

El código de trabajo del sistema de pesaje se desarrolló en IDE Arduino con base en los ejemplos incluidos en la librería HX711 (Kallhovd, 2017). En él se indicó el factor de celda que se obtuvo durante la calibración del sensor. De manera similar, se desarrollaron las líneas de código para habilitar los módulos: reloj, almacenamiento de datos y salida de datos por la pantalla LCD. El código etiqueta con fecha y hora los datos de los sensores y los almacena en la memoria mSD.

c. Requisitos metrológicos

Las pruebas de desempeño del instrumento para pesar no automático que se utilizó durante esta investigación se hicieron de acuerdo con el proyecto de norma oficial mexicana PROY-NOM-010-SCFI-2017. El instrumento bajo prueba "IBP" se sometió a las pruebas de pesada, repetitividad y retorno a cero. La división de escala, d, y la división de escala de verificación, e, se seleccionaron: d = e = 1g. Durante las pruebas, adicionalmente se aplicó una sobrecarga de 30% sobre de la carga nominal de la celda de carga.

Adicionalmente se evaluó el desempeño de las celdas de carga cuando son sujetas a una aplicación constante de carga durante varios días. McCauely & Nackley (2022), mencionan que comúnmente las celdas de carga presentan una desviación por efecto de la temperatura y que el error debe ser corregido utilizando modelos de compensación. Por lo que se fabricaron tres básculas sobre las que se colocó una carga de 5 kg sostenida durante 6 días para evaluar la relación entre la temperatura del aire y el error observado en los registros de cada celda de carga (C1, C2, y C3). El registro de temperatura se hizo con el termómetro interno de módulo reloj DS 3231. No hay proyecto de NOM para requisitos técnicos de metrología para básculas de funcionamiento automático.

4.2. Medición de los parámetros de evaporación

4.2.1. Preparación de sustratos

Se utilizaron los siguientes medios poroso: Tezontle_{100%} (T), Peat_{100%} (P), y Mezcla 1:1 (M); para el tezontle se seleccionó un tamaño de partícula 4-6 mm y el peat moss fue cernido a través de un tamiz 6 mm, simplemente para desmoronar partículas aglomeradas. Se requirió de 22 litros de material por cada tratamiento.

El modelo de evaporación FAO 56 da inicio con θ_{cc} en la superficie del suelo. Esta condición se estableció como sigue: individualmente los sustratos (T, M y P) fueron saturados (θ_{sat}) dentro de un recipiente plástico de 25 litros. Para optimizar la absorción del agua, el sustrato permaneció en esta condición por 24 horas.

Por cada medio poroso se prepararon tres unidades de medición, de las cuales, una fue referencia de la tasa máxima de evaporación (unidades: T_R , P_R , M_R). Las dos unidades restantes por cada medio poroso fueron sujetas a secado. Estas últimas etiquetadas con las letras T, M y P más un subíndice compuesto de la letra S (secado) más su número de repetición, 1 y 2. De esta manera se requirió de nueve contenedores de lisímetro para la medición de lámina de agua evaporada.

En cada contenedor se colocó sustrato suficiente para completar una profundidad de 10 cm (Z_e) con 2 cm libres hasta el borde superior del contenedor. Las nueve unidades se colocaron dentro del invernadero directamente sobre una superficie despejada, en tres filas y tres columnas, a una distancia de 1 m entre ellas. Previamente a permitir el drenaje del agua por gravedad, se registró el peso de cada unidad experimental. Los contenedores permanecieron cubiertos con plástico y se dejaron drenar por gravedad durante 16 horas. El peso de cada unidad transcurridas las 16 horas se consideró correspondiente a el peso cuando el sustrato tiene un contenido de humedad θ_{cc} .

4.2.2. Cuantificación de AFE y AET

Hora y fecha de inicio de ciclo de evaporación: 8:00 hr del 11 día de abril. En este punto se consideró que el contenido de humedad en todas unidades experimentales fue θ_{cc} y

con lámina evaporada acumulada fue 0 mm. En estas condiciones, la evaporación ocurre sin restricciones por contenido de humedad del sustrato, etapa 1 de evaporación.

Los cambios de masa se registraron cada hora colocando los contenedores momentáneamente sobre el receptor de carga del instrumento para pesar (IBP). Para convertir los registros de cambios de masa por hora a lámina agua evaporada, se consideró una densidad del agua igual 1 g/cm³ y una superficie expuesta del contenedor de 710.2 cm².

Diariamente, la acumulación de lámina evaporada se inició y reinició a las 8:00 am. Los cambios de masa se registraron manualmente cada hora entre las 8:00 am y 5:00 pm. Para el resto del día, la lámina evaporada se estimó al distribuir linealmente la diferencia de pesos entre las 5:00 pm y las 8 am del día siguiente.

Para mantener la etapa 1 de evaporación en las unidades de referencia (T_R , P_R , M_R ,), se conservó su contenido de humedad próximo a θ_{cc} . Lo anterior se consiguió al suministrar el volumen de agua evaporada en periodos de una hora con un atomizador de mano.

El final de la Etapa 1 de evaporación se identificó cuando en las unidades de secado la evaporación se redujo en 5%, respecto a la lámina de agua evaporada acumulada en la unidad de referencia respectiva. La lámina evaporada total acumulada a este punto corresponde al parámetro de evaporación Agua Fácilmente Evaporable (AFE).

El ciclo de secado terminó una vez que las unidades experimentales alcanzan un peso constante; de acuerdo con el modelo de evaporación FAO 56 el contenido de humedad en este punto es 0.5 θ_{PMP} . El parámetro de evaporación ATE, se determinó de la lámina de agua evaporada entre los θ_{CC} y $\theta_{0.5PMP}$ al final del ciclo de secado de acuerdo con la expresión:

$$AET = (\theta_{CC} - 0.5 \ \theta_{PMP}) \ Z_e \tag{4.2}$$

4.2.3. Determinación del Coeficiente de reducción, Kr

Las etapas del modelo de evaporación FAO 56 se caracterizan por el valor del coeficiente de reducción K_r ; igual a 1 durante la primera etapa de evaporación y que se reduce

proporcionalmente al contenido de humedad del suelo durante la segunda etapa (Allen *et al*, 1998, Ritchie, 1972, Philip, 1957).

El coeficiente de reducción Kr_{OBS} al final de cada día, se calculó del cociente entre la lámina evaporada diaria de las unidades sujetas a secado (LAE_S) y la lámina evaporada que se presentó en las unidades de referencia (LAE_R).

$$Kr_{OBS} = LAE_S / LAE_R$$
 (4.3)

El coeficiente de reducción de evaporación FAO 56 se modeló con los contenidos de humedad al final de la etapa uno de evaporación y al final del ciclo de secado.

4.2.4. Características de humedad: θ_{cc} y θ_{PMP} .

Al final del ciclo de secado, de cada unidad experimental de secado se eliminó el agua remanente en horno hasta peso constante a una temperatura de 60°C para los sustratos con peat moss y 110°C para el tezontle para determinar las características de humedad de cada sustrato.

El θ_{cc} en los tres tratamientos se determinó de la diferencia de peso del sustrato después del escurrimiento del agua gravitacional y del peso del sustrato completamente seco dividido por el volumen de sustrato en cada contenedor igual a 7102 cm³ litros, para una densidad de agua igual a 1g/cm³

El θ_{PMP} se determinó de acuerdo con la expresión multiplicando por dos el contenido de humedad al final del ciclo de secado $\theta_{0.5PMP}$.

Para determinar el θ_{SAT} en las unidades sujetas a secado se agregó un volumen de agua suficiente para ocupar la totalidad de la fracción no sólida del sustrato. El volumen de agua contenido en el punto de saturación representa el volumen de aire después de que el tezontle se secó a la estufa hasta peso constante y corresponde al espacio poroso (EP) o porosidad total del sustrato (EPT).

De la expresión 4.2, se determinó el θ_{PMP} con el contenido de humedad al final del ciclo de secado igual 0.5 θ_{PMP} . Se comparan los contenidos de humedad θ_{CC} , θ_{PMP} , y θ_{SAT} ,

respectivamente, con el máximo contenido de humedad de las fracciones de agua fácilmente disponible y agua de reserva y el espacio poroso total (EPT). Las curvas de liberación de agua se obtuvieron de acuerdo con la metodología que desarrollada por DeBoodt (1972). Las curvas fueron solicitadas al laboratorio de física de suelos del Postgrado de Edafología del COLPOS. La succión se hizo con 10 cm, 50 cm, y 100 cm de columna de agua.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

Primero se presentan las características y los resultados de las pruebas de desempeño del instrumento para pesar del lisímetro, que permitió hacer las pruebas de evaporación en los sustratos. Posteriormente para cada medio poroso, se presentan:

- La identificación de las etapas 1 y 2 de evaporación.
- La cuantificación de los parámetros de evaporación: AFE y ATE.
- El cálculo y modelación del coeficiente de reducción (FAO 56).
- Comparación entre: las características de humedad y sus respectivas curvas de liberación agua.

5.1 Mini-lisímetro

El mini lisímetro se fabricó a un costo de \$891.00 M.N. Cuenta con un contenedor de plástico con una profundidad de 12 cm y una superficie expuesta de 710.2 cm². Su instrumento para pesar cumple con los requisitos metrológicos de un instrumento para pesar de funcionamiento no automático de exactitud Clase III, con una división de escala de verificación e = 1g. Lo que permite la lectura mínima de lámina evaporada de ~ 0.014 mm. En el dispositivo indicador se presentan también datos de fecha, hora y temperatura.

McCauely & Nackley, (2022), desarrollaron un mini lisímetro de pesada a un costo de \$175 dólares, con un instrumento para pesar de 10 kg de capacidad con una escala de verificación e = 0.25 g. Dong & Hansen, (2023), estimaron un costo de \$327 dólares la fabricación de un lisímetro con instrumento para pesar de 100 kg de capacidad, empleando para la transducción de la señal de la celda de carga un Arduino MEGA. En comparación con otros microcontroladores, Arduino cuenta con una gran cantidad de
bibliotecas de código abierto que facilitan desarrollo de prototipos en una amplia variedad de proyectos (Gao *et al.*, 2021). Los autores resaltan que las ventajas de este tipo de prototipos son el bajo costo de implementación y la facilidad de repetición.

El mini lisímetro de pesaje que se implementó para la medición de lámina de agua evaporada se muestra en la Figura 5.1



Figura 5.1. Vista general del mini lisímetro: (i) El contenedor y (ii) el instrumento para pesar de funcionamiento no automático de capacidad máxima de 5 kg.

En los Anexo A1, A2, y A3 se presentan: una lista detallada de los materiales y el presupuesto de fabricación del mini lisímetro, un dibujo del instrumento de pesaje y el software de trabajo del mini lisímetro, respectivamente.

5.1.1 Instrumento para pesar

En la Figura 5.2 se observan: (i) la tarjeta PCB para el montaje y conexión de los componentes electrónicos, (ii) el interior del módulo terminal, y (iii) la integración del instrumento para pesar (PROY-NOM-010-SCFI-2014). En el Anexo A.4 se presentan el diagrama de conexión de componentes electrónicos para la fabricación de la tarjeta PCB.



Figura 5.2. Módulos del instrumento para pesar.

Por otro lado, de las pruebas de operación de carga momentánea se determinó que el instrumento para pesar cumple con los requisitos metrológico de un instrumento para pesar de funcionamiento no automático, con exactitud Clase III, para una división de la escala de verificación e = 1 g.

Para una densidad del agua igual 1 g/cm³ y con el supuesto de que la lámina evaporada se libera homogéneamente desde toda la superficie de los contenedores; la lámina evaporable mínima que se puede medir con el lisímetro es de ~0.014 mm (1 cm³ / 710.2 cm²).

Durante las pruebas de desempeño de funcionamiento con carga sostenida, se observó que el error en los registros de carga supera el error máximo permitido para instrumento de pesar Clase III y escala de verificación e = 1g (PROY-NOM-010-SCFI). Por lo que se determinó utilizar el lisímetro de manera manual, colocando cada unidad de evaporación sobre el instrumento para pesar cada hora para determinar los cambios de masa.

Los resultados de las pruebas de operación con carga momentánea y carga sostenida se presentan a continuación:

5.1.1.1. Prueba de desempeño de la báscula a carga instantánea

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de desempeño del instrumento para pesar (Figura 5.3).



Figura 5.3. Pruebas de desempeño del instrumento para pesar.

• Prueba de pesada

El Error Observado (EO) al aplicar cada carga fue menor al error máximo permitido (EMP) para esa carga, con división de escala e = 1g (Cuadro 5.1).

Carga calibrada	Carga o	bservada	Error	obser.	Error máx permisible	A Pasa A si
(g)	(g)		(9	(g)		EO < EMP
	Creciente	Decreciente	Creciente	Decreciente	!	
0	0.06	-0.01	0.06	0.01	0.5	OK
10	10.07	10.03	0.07	0.03	0.5	OK
500	500.24	500.17	0.24	0.17	0.5	OK
1000	1000.24	1000.25	0.24	0.25	1.0	OK
2000	2000.44	2000.45	0.44	0.45	1.0	OK
4229	4230.08	4230.2	1.08	1.2	1.5	OK
4729	4730.12	4730.09	1.12	1.09	1.5	OK
4999	5000.08	5000.17	1.08	1.08	1.5	OK
6499	6500.03		1.13	1.03	1.5	OK

Cuadro 5.1. Resultados de la prueba de pesada

• Prueba de retorno a cero

La desviación de la indicación cero después de un periodo de carga de media hora de duración fue 0.25 e y 0.37 e, para las cargas Max y 1.3 Max, respectivamente (Cuadro 5.2). Los errores observados fueron menores a < 0.5 e, error máximo permitido para esta prueba, por lo que el IBP pasa la prueba.

Cuadro 5.2. Resultados de retorno a cero, para el sistema de pesada.

	Inicio	Final
Hora	13:40:00	14:10:00
Temperatura (°C)	27.25	27.25
Carga Max (g)	4999.72	0.25
Carga 1.3 Máx (g)	6500.22	0.37

• Prueba de repetibilidad

La diferencia entre los resultados de cinco pesadas de las cargas 0.5Max, Max y 1.3Max es menor al error máximo que se permite para esa carga (Cuadro 5.3).

0.5 Máx (g)	Máx (g)	1.3Max (g)
2500.33	4999.88	6500.12
2500.26	4999.67	6500.22
2500.31	4999.45	6500.11
2500.08	4999.34	6500.15
2500.13	4999.53	6500.23

Cuadro 5.3. Prueba de repetividad

5.1.1.2 Prueba de desempeño de la báscula a carga constante sostenida.

Durante las pruebas de operación con carga sostenida (Figura 5.4), en las tres celdas de carga (C1, C2 y C3), se registraron errores que se relacionaron con la variación de temperatura a lo largo del día, por lo que se desarrollaron modelos que permitieran compensar dicho error. A continuación, se presentan los modelos que se desarrollaron para compensar el error en los registros de carga.

Modelos para compensación del error

Las series de tiempo del error tienen una tendencia decreciente y una estacionalidad que coinciden con los ciclos de calentamiento enfriamiento del día (Figura 5.5.A). La tendencia decreciente del error de carga se corrigió restableciendo "cero" (tara) a las 14:00 horas de todos los días, hora en que comenzó la reducción de temperatura del aire dentro del invernadero (Figura 5.5.B).



Figura 5.4. Pruebas de operación de básculas de lisímetro con carga sostenida (5 kg).



Figura 5.5. Series de tiempo temperatura y error de peso por celda de carga.

La relación entre la temperatura y el error de carga que se registró en cada celda de carga (C1, C2, y C3) puede observarse en la Figura 5.6.



Figura 5.6. Curvas de error por temperatura para diferentes celdas de carga.

Para compensar el error por efecto de temperatura, se consideraron los periodos de enfriamiento y calentamiento y se ajustó modelos polinómicos de tercer grado (Figura 5.7, Figura 5.8 y Figura 5.9).



Figura 5.7. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por temperatura para la celda de carga (C1).



Figura 5.8. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por temperatura para la celda de carga (C2).



Figura 5.9. Curva de histéresis y modelos de compensación de error de peso por temperatura para la celda de carga (C3).

Con la aplicación de los modelos a los registros de peso se redujo el error que se genera por el efecto de la temperatura sobre la celda de carga (Cuadro 5.4).

Celda de carga	C1	C2	C3	

Cuadro 5.4. Error promedio observado e	en las series de carga, para las tres celdas	de carga.
--	--	-----------

Celda de carga	C1	C2	C3
Originales (g)	9.79	11.91	8.40
Tara (g)	7.65	2.46	8.62
Compensados (g)	1.39	0.41	1.13

Aunque la corrección de los datos reduce el error promedio (Figura 5.10), los modelos que se desarrollaron son insuficientes para compensar automáticamente nuevas series de datos debido a la incertidumbre que existe en torno al error, ya que el error registrado puede ser diferente de acuerdo con el historial de temperatura previo a la puesta en marcha del instrumento (Ivshin & Pence, 1994).



Figura 5.10. Compensación de error en las series de tiempo de peso con el modelo ajustados para cada celda de carga.

5.2 Modelos de evaporación

5.2.1. Tasa de evaporación de referencia: Etapa 1 de evaporación

El humedecimiento que se realizó en períodos de 1 hora, para forzar la etapa uno de evaporación en las unidades de referencia, permitió medir la lámina de agua evaporada diaria que ocurre sin restricciones de humedad en los medios porosos bajo análisis (T₁₀₀, M, P_{100%}). Las láminas de agua evaporada acumulada por día durante la investigación se presentan el Cuadro 5.5.

Abril 2023	T 100	M 1:1	P100
Fecha	mm día⁻¹	mm día⁻¹	mm día⁻¹
11	3.25	2.91	3.25
12	3.94	3.69	3.93
13	3.08	3.01	3.07
14	3.98	3.88	4.1
15	3.94	3.82	4.11
16	3.58	3.48	3.73
17	3.53	3.34	3.48
18	3.99	3.74	3.92
19	3.67	3.57	3.68
20	3.82	3.59	3.8
21	3.39	3.29	3.47
22	3.22	2.89	3.22
23	4.04	3.86	4.19
24	3.89	3.65	3.87
25	4.08	4.01	4.14
26	4.08	4.08	4.15
27	4.11	4.08	4.21
LAE	3.74	3.58	3.78
Σ LAE	63.59	60.89	64.32

Cuadro 5.5. Lámina de agua evaporada acumulada día en las unidades de evaporación de referencia, Etapa 1 de evaporación.

La lámina evaporada que ocurre sin restricción por contenido de humedad medida en los medios porosos se requirió para la identificación del final de la etapa 1 de evaporación, así como para el cálculo del coeficiente de reducción durante la 2da etapa de evaporación en las unidades sujetas a secado.

En la Figura 5.11, se presentan las curvas de evaporación acumulada total (LAE_{TOTAL}) sin restricción por contenido de humedad para los tres medios porosos considerados. Los medios porosos T_{100%} y P_{100%} presentaron un promedio de LET de 64 mm, y el medio poroso M 60.89 mm de agua.



Figura 5.11. Lámina de agua evaporada acumulada en las unidades de evaporación de referencia, Etapa 1 de evaporación.

5.2.2. Parámetros de evaporación (AFE y AET)

5.2.2.1. Tezontle

En las unidades de secado (T_{S1} y T_{S2}), medio poroso tezontle, la Etapa 1 de evaporación tuvo una duración de seis horas (8:00 - 14:00 hrs, Figura 5.12). Durante esta etapa, el contenido de humedad en la superficie del tezontle en dichas unidades cubrió la demanda evaporativa de la atmósfera.



Figura 5.12. Láminas de agua evaporada acumulada para identificar el final de la etapa 1 de evaporación (FAO 56), para el tezontle (con dos repeticiones TS1 y TS2) y la evaporación de referencia (TR).

Al final de la etapa 1 de evaporación, la tasa de evaporación de los contenedores T_{S1} y T_{S2} se redujo en más del 5% en comparación con la tasa de evaporación en la unidad de referencia T_R . La unidad de referencia T_R cubrió la demanda evaporativa de la atmósfera debido al re-humedecimiento que se aplicó cada hora. La lámina de agua evaporada acumulada al final de la Etapa 1 de evaporación (14:00 hrs, 11 de abril) corresponde al parámetro de evaporación AFE (ver Anexo 5 y 6 - Tezontle).

El parámetro de evaporación ATE se determinó de la lámina de agua evaporada entre los θ_{CC} y $\theta_{0.5PMP}$ al final del ciclo de secado de acuerdo con la expresión (4.3) de materiales y métodos (ver Anexo 7 -Tezontle).

En el cuadro 5.6 se indica un resumen de los parámetros de AFE y ATE para el medio poroso Tezontle_{100%}.

	Unidades de secado, repeticiones 1 y 2			
	T _{S1}	T _{S2}	Promedio	
AFE (mm)	1.71	1.69	1.7	
ATE (mm)	17.39	17.27	17.33	

Cuadro 5.6. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua Evaporable Total (AFE y AET) para el Tezontle_{100%}

En FAO 56 se reportan valores del rango 2 – 7 mm de AFE y 6 – 12 mm para AFE en suelos arenosos. El AET fue de 17.23 mm en promedio para el tezontle, que supera con respecto al máximo de AET de 12 mm para la arena, según FAO 56.

Assouline *et al.*, (2023), mencionan que la presencia de partículas pedregosas en la superficie del suelo reduce la duración de la etapa 1 de evaporación, lo que limita la evaporación total acumulada proporcionalmente con su contenido volumétrico de agua inicial. Esto se observó en el medio poroso Tezontle, en esencia un material pedregoso, la duración de la etapa de evaporación 1 es muy reducida, con un parámetro AFE_m de solo 1.7 mm y tan solo 6 horas de evaporación antes del final de la etapa 1 de evaporación, además de presentar la menor capacidad de retención de humedad. En contraste, el medio poroso Peatmoss (P₁₀₀) presentó la mayor capacidad de retención de agua (69%, volumen), y un parámetro de evaporación AFE_m = 13.48 mm. cifra que le proporcionó la capacidad de permanecer en la etapa 1 de evaporación por tres días.

5.2.2.2. Mezcla

En los contenedores M_{S1} y M_{S2} , el final de la etapa 1 se presentó después de 30 horas de evaporación con una reducción de la taza de evaporación de más del 5% en comparación con la tasa de evaporación en la unidad de referencia M_R (Figura 5.13). La lámina de agua evaporada acumulada al final de la Etapa 1 de evaporación (14:00 hrs del 12 de abril) corresponde al parámetro de evaporación AFE (ver Anexo 5 y 6 - Mezcla).



Figura 5.13. Láminas de agua evaporada acumulada para identificar el final de la etapa 1 de evaporación (FAO 56), para la mezcla (con dos repeticiones MS1 y MS2) y la evaporación de referencia (MR).

El parámetro de evaporación ATE se determinó de la lámina de agua evaporada entre los θ_{CC} y $\theta_{0.5PMP}$ al final del ciclo de secado de acuerdo con la expresión (4.3) de materiales y métodos (Anexo 7). En el cuadro 5.7 se indica un resumen de los parámetros de AFE y ATE para el medio poroso Mezcla 1:1.

Unidades de secado, repeticiones 1 y 2					
	M _{S1}	M _{S2}	Promedio		
AFE (mm)	4.86	4.92	4.89		
ATE (mm)	30.50	30.35	30.42		

Cuadro 5.7. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua Evaporable Total (AFE y AET) para Mezcla 1:1 (v/v).

FAO 56 reporta valores de 4 - 8 mm de AFE y 9 - 14 mm de AET para suelos arenoso franco. Los valores de AET del tratamiento Mezcla duplican el límite superior del rango reportado en suelos tipo arenoso franco.

5.2.2.3. Peatmoss

En los contenedores P_{S1} y P_{S2} , el final de la etapa 1 se presentó después 89 y 96 horas de evaporación respectivamente, con una reducción de la taza de evaporación de más del 5% en comparación con la tasa de evaporación en la unidad de referencia P_R (Figura 5.14). La lámina de agua evaporada acumulada al final de la Etapa 1 de evaporación (1 y 7 horas, 15 abril) corresponde al parámetro de evaporación AFE (ver Anexo 5 y 6 - Peatmoss).





El parámetro de evaporación ATE para peat moss se determinó de la lámina de agua evaporada entre los θ_{CC} y $\theta_{0.5PMP}$ al final del ciclo de secado de acuerdo con la expresión (4.3) de materiales y métodos (Anexo 7).

En el cuadro 5.8 se indica un resumen de los parámetros de AFE y ATE para el medio poroso peatmoss.

Cuadro 5.8. Parámetros de evaporación Agua Fácilmente Evaporable y Agua Evaporable Total (AFE y AET) para el Peatmoss 100%

	PS1	PS2	Promedio
AFE (mm)	13.73	13.23	13.48
ATE (mm)	55.93	56.08	56.01

Unidades de secado, repeticiones 1 y 2

FAO 56 reporta valores de 8 – 12 mm de AFE y 22 – 39 mm de AET tipo arcilloso. Los valores de AET del tratamiento Peatmoss duplican el valor promedio del AET en suelos tipo arcilloso.

5.2.3. Coeficiente de reducción, Kr, en tezontle: observado y modelo FAO56

Tras el final de la etapa 1, el contenido de humedad en la superficie de los sustratos sujetos a secado fue insuficiente para cubrir la demanda evaporativa de la atmósfera. En la Figura 5.15 se observa la reducción en la lámina evaporada acumulada para los tres medios porosos (T, M y P) en condiciones de secado tras el final de la etapa 1 de evaporación. La curva R, en azul claro, es un promedio de la lámina evaporada acumulada total de los tres medios porosos dentro de la etapa 1 de evaporación, condición controlada con el re-humedecimiento horario de cada unidad.





El Kr expresa la restricción de evaporación en la superficie de los sustratos en consecuencia del abatimiento del contenido de humedad. Representa la relación entre la lámina de agua evaporada en condiciones limitantes por contenido de humedad y su respectiva lámina evaporada acumulada sin tal limitación, para un periodo de tiempo determinado.

En las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18. se graficó el Kr diario para cada medio poroso, ver Anexo 7. En ellas se observa la reducción del Kr es proporcional al contenido de humedad remanente en cada sustrato, sin embargo, no decrece de manera lineal como considera el modelo de evaporación FAO 56.

El desvanecimiento del Kr observado en cada sustrato se ajustó a un modelo polinómico de 3er, (curvas amarillas). En verde, se presenta la modelación lineal del Kr_{FAO56}; el modelo se trazó en base al θ_{AFE} al inicio de la etapa 2 de evaporación y $\theta_{0.5PMP}$ al final del ciclo de secado de cada sustrato.



Figura 5.16. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción Kr del tezontle.



Figura 5.17. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción Kr de la mezcla.



Figura 5.18. Relación entre el contenido de humedad y el coeficiente de reducción Kr del peatmoss.

Las características de humedad propias de cada medio poroso (T_{100} %, P_{100} y M), determinan la velocidad a la que el Kr decrece durante la segunda etapa de evaporación. En el Tezontle₁₀₀, el Kr decrece muy rápidamente en consecuencia de su limitada capacidad de retención de agua, en contraste con el Peatmoss_{100%} cuya capacidad de retención de agua hace atenúa la velocidad a la que disminuye su Kr (Figura 5.19).



Figura 5.19. Relación del coeficiente de reducción Kr y el contenido de humedad (V/V) para los medios porosos considerados.

Al inicio de la etapa 2 de evaporación se observó que el Kr decreció suficientemente rápido por abajo del trazo del modelo Kr con FAO 56 y disminuye a medida que perdía contenido de humedad en la superficie del sustrato. Por lo que, el modelo FAO 56 difiere con respecto al el Kr observado en esta etapa de evaporación. En ninguno de los tratamientos, el coeficiente de reducción Kr decrece linealmente debido a que el aporte de agua para cubrir la demanda evaporativa de la atmósfera ocurre de manera diferencial en el perfil del sustrato.

5.2.4. Contenidos de humedad y Curvas de Liberación de Agua (CLA)

Las características de humedad capacidad de campo (θ_{cc}) y punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}) son útiles en aplicaciones de riego para determinar la disponibilidad de agua en el suelo y ambos pueden expresarse como contenidos volumétricos de agua del suelo (Porta, 2003). Sin embargo, comúnmente, la caracterización física de los sustratos hortícolas se hace con base en el estudio de la distribución de las fases: sólida, líquida y gaseosa, expresadas en unidades volumétricas. La relación entre dicha distribución y el potencial del agua en el sustrato se puede observar en las curvas de liberación de agua (CLA). Las CLA expresan la disponibilidad de agua para diferentes contenidos de humedad y se determinan por un método hidrostático que consiste en colocar los materiales en pequeños cilindros sobre una mesa de tensión, para drenarse con diferentes potenciales de agua, que dan lugar a los conceptos de: Agua Fácilmente Disponible (AFD), Agua de Reserva (AR), Agua Difícilmente Disponible (ADD), Capacidad de Aire (CA) y Espacio Poroso Total (EPT). Conceptos que se desarrollaron para representar explícitamente la relación entre la distribución volumétrica agua-airesustrato y el potencial del agua en el sustrato durante el proceso de desorción de sustratos hortícolas (DeBoodt et al., 1974; Fonteno, 1989; Teepe et al., 2003; Vence et al., 2013).

El θ_{CC} (v/v) corresponde al volumen de agua por unidad de volumen que el sustrato puede retener en contra de las fuerzas gravitatorias y es homólogo al concepto de "capacidad de recipiente (CR)" definido como la capacidad de retención de agua del sustrato después del riego y drenaje e igual a la suma de las fracciones de agua AFD, AR y ADD, que se utiliza para la caracterización de humedad en sustratos hortícolas (Pire & Pereira, 2003).

Por otro lado, en las curvas de liberación de agua, el agua de reserva (AR) es la fracción de agua retenida por el sustrato entre 50 y 100 cm de tensión y su agotamiento puede crear una condición de estrés hídrico similar a aquella del punto de marchitez permanente, en el sentido de la dificultad que presentan los cultivos para absorber agua del medio. "El punto de marchitez permanente se define como el contenido de agua por

45

debajo del cual las plantas mesofíticas (en concreto el girasol enano) no son capaces de extraer agua del suelo" (Porta *et al.*, 2003).

En los cuadros 5.9, 5.10 y 5.11 se presentan las características de humedad θ_{SAT} , θ_{CC} , θ_{PMP} que se determinaron para cada tratamiento de acuerdo con el modelo y conceptos FAO 56 (Anexo 8). También se presentan el espacio poroso total, y el contenido de humedad a "capacidad de recipiente" y el contenido de humedad al agotarse la fracción de "agua difícilmente disponible" que se midieron en las curvas de liberación de agua, ver Anexo 9 (CLA, DeBoodt *et al.*, 1974). En general, las diferencias que existen entre las características de humedad de los sustratos y los resultados de las curvas de liberación de agua se deben a las diferencias técnicas (instrumental utilizado, experiencia del laboratorista o investigador) y conceptuales entre ambas metodologías para el estudio del agua en los sustratos.

• Tezontle

Cuadro 5.9. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la Curva de Liberación de Agua (C.L.A., DeBoodt et al., 1974) para el tezontle.

	Unidades de secado, repeticiones 1 y 2				
θ	T _{S1}	T _{S2}	C.L.A.		
Sat / EPT	0.5563	0.5644	0.6800		
CC / CR	0.1779	0.1767	0.2000		
Fin etapa 1	0.1609	0.1597			
0.5 PMP	0.0040	0.0040			
PMP / Máx ADD	0.0080	0.0080	0.0467		
Agotado por evaporación	0.1739	0.1727			

En Tezontle, con tamaño de partícula 4 – 6 mm, se determinó un θ_{CC} de 0.18 similar al θ_{CC} de 0.17 de los suelos arenosos con buena retención de humedad (FAO 56). Sin embargo, en tezontle, el contenido de humedad que puede agotarse por evaporación es de 0.17 (θ , V/V), mientas que los suelos arenosos, el contenido de humedad que puede evaporarse es tan solo 0.11 (θ , V/V). Lo que pone de manifiesto la buena capacidad de liberación de agua por parte de este medio poroso.

Vargas *et al.*, determinaron una capacidad de retención de humedad de 14.75% (vol) para un tamaño de partícula de 4 – 6.5 mm. En las Curva de Liberación de Agua medida en dicho medio poroso se determinó una capacidad de retención de humedad de agua de 20%.

• Peatmoss

Cuadro 5.10. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la curva de liberación de agua (DeBoodt et al., 1974) para el peatmoss.

	Unidades de secado, repeticiones 1 y 2				
θ	Ps1	Ps ₂	C.L.A.		
Saturación/ EPT	0.8060	0.8085	0.9000		
CC / CR	0.6883	0.6898	0.8214		
Fin etapa 1	0.5502	0.5546			
0.5 PMP	0.1290	0.1290			
PMP / ADD	0.2580	0.2580	0.0467		
Agotado por evaporación	0.5593	0.5160			

La capacidad de retención de agua del peatmoss bajo análisis es ampliamente mayor a los observados en los suelos de campo. Se determinó un θ_{CC} (V/V) de 0.69, cifra que supera el máximo θ_{CC} 0.4 en suelos arcillos (FAO 56).

• Mezcla

Cuadro 5.11. Contenidos de humedad (v/v) y fracciones de agua de la curva de liberación de agua (DeBoodt et al., 1974) para la mezcla.

	Unidades de secado, repeticiones 1 y 2			
θ	Ms1	Ms2	C.L.A.	
Saturación / EPT	0.5785	0.5796	0.6400	
CC / CR	0.3135	0.3120	0.2600	
Fin etapa 1	0.2651	0.2629		
0.5 PMP	0.0085	0.0085		
PMP / ADD	0.0170	0.0170	0.0487	
Agotado por evaporación	0.3050	0.3035		

En suelos arcillosos, FAO 56 reporta θ_{cc} entre 0.32 - 0.4 y θ_{PMP} de 0.20 - 0.24.

La mezcla entre sustratos de diferente naturaleza modifica sus nuevas propiedades físicas y varían en función de la proporción en que se mezclen (Gutierrez *et al.*, 2011). Cuando dos materiales de diferente tamaño de partícula son mezclados, aquel de menor tamaño de partícula ocupa el espacio poroso entre las partículas de mayor tamaño. Esta combinación de materiales, reduce el espacio poroso de aquel del material de partículas finas y en consecuencia su capacidad de retención de agua (Bures *et al.*, 1993). En la mezcla volumétrica 1:1, Tezontle y Peatmoss, se determinó un porcentaje de espacio poroso y capacidad de retención de agua intermedio entre el que presentan cuando son manejados individualmente.

VI. CONCLUSIÓN

El mini lisímetro de pesaje implementado permitió medir la lámina de agua evaporada en periodos de una hora, lo que permitió observar el desarrollo las etapas 1 y 2 de evaporación de cada uno de los tratamientos.

La identificación del inicio y final de ambas etapas de evaporación permitió cuantificar los parámetros Agua Fácilmente Evaporable (AFE) y Agua Evaporable Total (AET), correspondientes a cada uno de los tratamientos, así como observar la reducción de evaporación durante la segunda etapa de evaporación con el cálculo del coeficiente de reducción, Kr. Los modelos ajustados permiten mejorar la predicción de la reducción en la tasa de evaporación a medida que se pierde contenido de humedad en cada uno de los tratamientos considerados.

Las diferencias conceptuales en los conceptos y metodologías que se utilizan para estudiar la disponibilidad de agua en los suelos y sustratos, dificultan la correlación inequívoca entre los conceptos de capacidad de campo y capacidad de recipiente, y los conceptos de punto de marchitez permanente y el agotamiento de agua de reserva. Por lo que se requiere profundizar en el entendimiento de ambas metodologías.

VII. LITERATURA CITADA

Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. <u>https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015</u>

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración de cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (56; Riego y drenaje).
- Beeson, R. C. (2011). Weighing lysimeter systems for quantifying water use and studies of controlled water stress for crops grown in low bulk density substrates. *Agricultural Water Management*, 98(6), 967–976. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.005
- Bunt, A. C. (1988). Loam or loamless media? En *Media and Mixes for Container-Grown Plants* (pp. 1–5). Springer Netherlands. <u>https://doi.org/10.1007/978-94-011-7904-1</u>
- Cruz, E., Sandoval, M., Can, A., Robles, B., Bugarín, R., & Juárez, P. (2012). Sustratos en la horticultura. Artículo de Revisión. *Biocinecias*, *2*, 17–26.
- Cruz, E., Sandoval, M., Volke, V., Ordaz, V., Tirado, J. L., & Sánchez, J. (2010). Generación de mezclas de sustratos mediante un programa de optimización utilizando variables físicas y químicas. *Terra Latinoamericana*, 28, 219–229. https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n3/v28n3a4.pdf
- DeBoodt, M., Verdonck, O., & Cappaert, I. (1974). Method for measuring the waterrelease curve of organic substrates. *Faculty of Agricultural Sciences*, *37*(20), 2054–2062. https://doi.org/https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1974.37.20
- Dong, Y., & Hansen, H. (2023). Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. Smart Agricultural Technology, 4, 1–8. <u>https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100147</u>
- Dumroese, R. K., Pinto, J. R., & Montville, M. E. (2015). Using container weights to determine irrigation needs: a simple method. *Native Plants Journal*, *16*(1), 67–71. <u>https://doi.org/10.3368/npj.16.1.67</u>
- Flores, R., Livera, M., Colinas, M., Gaytán, E., & Muratalla, A. (2008). Producción de plántulas de ciclamen (Cyclamen persicum Mill.) en sustratos basados en polvo de bonote de coco. *Revista Chapingo*, 14, 309–318. <u>http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60914311</u>
- Fonteno, W. C. (1989). An approach to modeling air and water status of hoticultural substrates. *Acta Horticulturae*, 238, 67–74. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.238.7
- Gayosso, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Antonio Estrada -Botello, M., & Garruña-Hernández, R. (2023). Sustratos para producción de flores. *Agrociencia*, *50*(5), 617–631. <u>http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000500617&lng=es&tlng=es</u>.
- Gao, W., Luo, X., Liu, Y., Zhao, Y., & Cui, Y. (2021). Development of an arduino-base integrated system for sensing of hydrogen peroxide. *Sensors and actuators reports,* 3, (1–10). <u>https://doi.org/10.1016/j.snr.2021.100045</u>

- Howell, T. A., Schneider, A., & Jensen, M. E. (1991). History of Lysimeter Design and Use for Evapotranspiration Measurements. En Lysimeters For Evapotranspiration and Environmental Measurements (pp. 1–9). https://www.researchgate.net/publication/279560720
- Liu, H., Duan, A. wang, Li, F. sheng, Sun, J. sheng, Wang, Y. cong, & Sun, C. tao. (2013). Drip Irrigation Scheduling for Tomato Grown in Solar Greenhouse Based on Pan Evaporation in North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(3), 520–531. <u>https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60253-1</u>
- Martínez, P F., & Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En Sustratos, manejo del clima, automatización y el control en sistemas de cultivo sin suelo (pp. 37–77). Universidad Nacional de Colombia. <u>https://www.researchgate.net/publication/237100771 Sustratos para el cultivo si</u> <u>n suelo Materiales propiedades y manejo</u>
- McCauely, D. M., & Nackley, L. L. (2022). Development of mini-lysimeter system for use in irrigation automation of container-grown crops. *HardwareX*, *11*(1), 1–18. <u>https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00298</u>
- McCauley, D., Levin, A., & Nackley, L. (2021). Reviewing Mini-lysimeter Controlled Irrigation in Container Crop Systems. *HortTechnology*, *31*(6), 634–641. <u>https://doi.org/10.21273/HORTTECH04826-21</u>
- Michel, J. (2010). The physical properties of peat: a key factor for modern growing media. *Mires and Peat*, 6, 1–6. <u>http://www.mires-and-peat.net/</u>
- Philip J. (1957). Evaporation, moisture and heat fields in the soil. *Journal of meteorology*, 14, 354–366. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014%3C0354:EAMAHF%3E2.0.CO;2</u>
- Pire, R, & Pereira, A. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustrato de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. Bioagro 15(1): 55–63. <u>http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85715107</u>
- Porta, J, López-Acevedo, M, Roquero, C. 2003. 12 Agua del suelo. En Edafología para la agricultura y el medio ambiente (3ra edición). Ediciones Mundi Prensa, México D.F., México, pp: 307 347.
- PROY-NOM-010-SCFI-2017. Instrumentos de medición Instrumentos para pesar de funcionamiento no automático Requisitos técnicos y metrológicos, métodos de prueba y de verificación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5533602&fecha=01/08/2018#gsc.tab= 0.
- Ritchie, J. (1972). Model for predicting evaporation fron a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8, 1204–1213. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204</u>

- Ruiz, A., López I., Arteaga, R., & Ramirez, A. (2015). Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimada mediante balance de energía. *Agrociencia, 49,* 87–100.
- Schuch, U. K., & Burger, D. W. (1997). Water use and crop coefficients of wood ornamentals in containers. *American Society for Horicultural Science*, 122(5), 727– 734. https://doi.org/https://doi.org/10.21273/JASHS.122.5.727
- Teepe, R., Dilling, H., & Beese, F. (2003). Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Plant Nutr. Soil Science*, *166*, 111–119. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jpln.200390001
- Vargas, P., Castellanos, J., Muñoz, J., Sánchez, P., Tijerina, L., López, R., Martínez, C., & Ojodeagua, J. (2008). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tenzontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México*, *34*, 323– 331. <u>http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000300007&Ing=es&tIng=es</u>.
- Vence, L., Valenzuela, O., Svartz, H., & Conti, M. (2013). Elección del sustrato y manejo de riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencia del* suelo, 31, 153–164. <u>https://www.researchgate.net/publication/287764497_Water_retention_curves_as</u> a tool in the selection of a plant-growing substrate and the watering scheme
- W.M.O. (2021). Measurement of Evaporation. En *Guide to Instruments and Methods of Observation* (Vol. 1, pp. 347–358). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11628

ANEXOS

A.1 Presupuesto de fabricación del mini lisímetro de pesaje

El costo de los materiales para la fabricación del armazón y el costo de los componentes electrónicos que se requirieron para el sistema electrónico se presentan en el Cuadro A.1. El contenedor plástico de lisímetro costó \$65.00 pesos M.N. El costo total estimado del instrumento para pesar del lisímetro fue de \$891.07.

Descripción	Costo	Costo U por	Cantidad	Total
	comercial	elemento		
	M.N.	M.N.	M.N.	M.N.
Perfil PTR ¾" (6 m)	\$345.00	\$345.00	0.1	\$34.50
Placa de acero (15 x 15 cm)	\$66.00	\$66.00	0.5	\$33.00
Tabla de pino #2 cepillado (2.46 m)	\$265.00	\$265.00	0.1	\$26.50
Tornillo/tuerca 3M	\$6.00	\$6.00	4	\$24.00
Tuerca inserto tipo D (12 pz)	\$129.00	\$129.00	2	\$21.50
Tornillo ¼ x 1" (4 pz)	\$37.00	\$37.00	2	\$18.50
Arduino uno + cable USB	137.76	137.76	1	137.76
Celda de carga + HX711	93.99	93.99	1	93.99
Reloj DS 3231	99.18	99.18	1	99.18
Módulo Msd (4pz)	116.00	29.00	1	29.00
Tarjeta mSD	70.00	70.00	1	70.00
Display LCD 16x2	115.99	115.99	1	115.99
Gabinete plástico	59.00	59.00	1	59.00
Cable de alimentación	5.00	5.00	1	5.00
Placa PCB	108.00	21.60	1	21.60
Pines hembra (400)	67.99	0.17	56	9.52
Borneras 2 blques (10)	49.00	4.90	5	24.50
Jumper Hembra 10cm (120 pz)	76.00	0.63	4	2.53
TOTÁL				891.07

Cuadro A.1. Relación de materiales y componentes para la construcción del instrumento para pesar del mini lisímetro.

También se requirió de la siguiente herramienta e insumos: esmeril, discos de corte, taladro, juego de brocas acero y madera, serrucho, martillo, perico, juego de des armadores, juego de llaves Allen, soldadora inversora, electrodos cautín, pasta térmica, estaño, y equipo de protección personal.

A.2 Armazón fabricado para el montaje del sensor

El armazón que se fabricó para el montaje del sensor se muestra en la Figura A.1.



Figura A.1. Diagrama general del instrumento para pesar del mini lisímetro.

A.3 Software del instrumento para pesar

```
#include <SD.h>
#include <LiquidCrystal_l2C.h>
#include<DHT.h>
#include <Wire.h> // incluye libreria para interfaz I2C
#include <RTClib.h> // incluye libreria para el manejo del modulo RTC
#include <HX711 ADC.h>
#if defined(ESP8266)|| defined(ESP32) || defined(AVR)
#include <EEPROM.h>
#endif
//pins:
const int HX711_dout = 7; //mcu > HX711 dout pin
const int HX711 sck = 8; //mcu > HX711 sck pin
//HX711 constructor:
HX711_ADC LoadCell(HX711_dout, HX711_sck);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
RTC DS3231 rtc;
                   // crea objeto del tipo RTC DS3231
const int calVal_eepromAdress = 0;
unsigned long t = 0;
void setup() {
 lcd.init();
 lcd.backlight();
 lcd.clear();
 lcd.setCursor(0,0);
 if (! rtc.begin()) {
                    // si falla la inicializacion del modulo
Serial.println("Modulo RTC no encontrado !"); // muestra mensaje de error
               // bucle infinito que detiene ejecucion del programa
while (1);
//rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); // funcion que permite establecer fecha
v horario
 // al momento de la compilacion. Comentar esta linea
 Serial.begin(57600); delay(10);
 Serial.println();
 Serial.println("Starting...");
 LoadCell.begin();
 //LoadCell.setReverseOutput(); //uncomment to turn a negative output value to
positive
 float calibrationValue; // calibration value (see example file "Calibration.ino")
 calibrationValue = -394.58
 ; // uncomment this if you want to set the calibration value in the sketch //
#if defined(ESP8266)|| defined(ESP32)
 //EEPROM.begin(512); // uncomment this if you use ESP8266/ESP32 and want to
fetch the calibration value from eeprom
#endif
```

```
//EEPROM.get(calVal eepromAdress, calibrationValue); // uncomment this if you want
to fetch the calibration value from eeprom
 unsigned long stabilizingtime = 2000; // preciscion right after power-up can be
improved by adding a few seconds of stabilizing time
 boolean tare = true; //set this to false if you don't want tare to be performed in the
next step
 LoadCell.start(stabilizingtime, tare);
 if (LoadCell.getTareTimeoutFlag()) {
  Serial.println("Timeout, check MCU>HX711 wiring and pin designations");
  while (1);
 }
 else {
  LoadCell.setCalFactor(calibrationValue); // set calibration value (float)
  Serial.println("Startup is complete");
 }
 if (!SD.begin(10)) {
  Serial.println("Falla en tarjeta o no presente");
  // don't do anything more:
  while (1);
 }
 Serial.println("configurando tarj. sd.");
  File dataFile = SD.open("datalog2.txt", FILE_WRITE);
 if (dataFile) { }
 else {
  Serial.println("error en archivo datalog2.txt");
}
}
void loop() {
 static boolean newDataReady = 0;
 const int serialPrintInterval = 10000; //increase value to slow down serial print activity
 // check for new data/start next conversion:
 if (LoadCell.update()) newDataReady = true;
 // get smoothed value from the dataset:
 if (newDataReady) {
  if (millis() > t + serialPrintInterval) {
   float i = LoadCell.getData();
   Serial.print("Load_cell output val: ");
   Serial.println(i);
   File dataFile = SD.open("datalog2.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
     DateTime fecha = rtc.now();
     float t = rtc.getTemperature();
     float i_adjust;
     if((fecha.hour()>9)&&(fecha.hour()<18)){
     //algoritmo día
```

```
float a = 0.9735;
     float b = -14.0292;
     float R = a^{t+b}:
     i_adjust = i+R;
     }
     //algoritmo noche
     else { float a = 1.00;
     float b = -11.0757;
     float R = a^{t+b};
     i_adjust = i+R;
     }
     dataFile.print(fecha.day());
     dataFile.print("/");
     dataFile.print(fecha.month());
     dataFile.print("/");
     dataFile.print(fecha.year()); // Se puede cambiar entre dÃa y mes si se utiliza el
sistema Americano
     dataFile.print(", ");
     dataFile.print(fecha.hour());
     dataFile.print(":");
     dataFile.print(fecha.minute());
     dataFile.print(":");
     dataFile.print(fecha.second());
     dataFile.print(" ,");
     dataFile.print("mo: "); //masa ajustada
     dataFile.print(i);
     dataFile.print(",ma: "); //masa ajustada
     dataFile.print(i_adjust);
     dataFile.print(",T:");
     dataFile.println(t);
     dataFile.close();
     lcd.clear();
     lcd.setCursor(0,0);
     lcd.print(fecha.hour());
     lcd.print(":");
     lcd.print(fecha.minute());
     lcd.print(":");
     lcd.print(fecha.second());
     lcd.print(" T:");
     lcd.print(t);
     lcd.setCursor(0,1);
     lcd.print("mo:");
     lcd.print(i);
     lcd.print("ma:");
     lcd.print(i_adjust);
```

```
}
newDataReady = 0;
t = millis();
}
// receive command from serial terminal, send 't' to initiate tare operation:
if (Serial.available() > 0) {
    char inByte = Serial.read();
    if (inByte == 't') LoadCell.tareNoDelay();
}
// check if last tare operation is complete:
if (LoadCell.getTareStatus() == true) {
    Serial.println("Tare complete");
}
```

A.4 Diagrama de conexiones para la fabricación de la tarjeta PCB



Figura A.2. Diagrama de conexión para la fabricación de la tarjeta PCB.

A.5. Láminas de agua evaporada y coeficiente de reducción Kr horario.

• Tezontle

Cuadro A.2. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario del tezontle.

11 de abril	Lamina evaporada acumulada (mm)		Kr horario (adim)		
HORA	TREF	TS1	TS2		
8	0.00	0.00	0.00		
9	0.06	0.06	0.06	1.00	1.00
10	0.28	0.28	0.28	1.00	1.00
11	0.60	0.60	0.58	0.99	0.97
12	0.95	0.91	0.89	0.96	0.94
13	1.44	1.39	1.40	0.97	0.97
14	1.82	1.71	1.69	0.94	0.93
15	2.24	2.04	2.01	0.91	0.90
16	2.57	2.31	2.27	0.90	0.88
17	2.74	2.46	2.43	0.90	0.89
18	2.90	2.60	2.57	0.90	0.89
19	2.93	2.63	2.60	0.90	0.89
20	2.95	2.65	2.62	0.90	0.89
21	2.98	2.68	2.65	0.90	0.89
22	3.00	2.70	2.67	0.90	0.89
23	3.03	2.73	2.70	0.90	0.89
24	3.05	2.75	2.72	0.90	0.89
1	3.08	2.78	2.75	0.90	0.89
2	3.10	2.81	2.77	0.90	0.89
3	3.13	2.83	2.80	0.90	0.89
4	3.15	2.86	2.82	0.91	0.90
5	3.18	2.88	2.85	0.91	0.90
6	3.20	2.91	2.87	0.91	0.90
7	3.23	2.93	2.90	0.91	0.90
8	3.25	2.94	2.93	0.90	0.90

• Mezcla 1:1

12 de abril	12 de abril Lámina evaporada acumulada (mm)		Kr hora (adim)		
HORA	MR	MS1	MS2	MS1/PREF	MS2/PREF
8	0.00	0.00	0.00		
9	0.11	0.13	0.14	1.00	1.00
10	0.30	0.34	0.33	1.00	1.00
11	0.63	0.65	0.67	1.00	1.00
12	1.13	1.13	1.14	1.00	1.00
13	1.65	1.61	1.59	0.98	0.96
14	2.08	1.96	1.94	0.94	0.93
15	2.43	2.29	2.24	0.94	0.92
16	2.83	2.65	2.58	0.94	0.91
17	3.16	2.96	2.86	0.94	0.90
18	3.30	3.10	3.00	0.94	0.91
19	3.33	3.13	3.02	0.94	0.91
20	3.35	3.15	3.04	0.94	0.91
21	3.38	3.18	3.06	0.94	0.91
22	3.41	3.20	3.09	0.94	0.91
23	3.44	3.22	3.11	0.94	0.90
24	3.47	3.25	3.13	0.94	0.90
1	3.49	3.27	3.16	0.94	0.90
2	3.52	3.29	3.18	0.93	0.90
3	3.55	3.32	3.20	0.93	0.90
4	3.58	3.34	3.23	0.93	0.90
5	3.61	3.36	3.25	0.93	0.90
6	3.64	3.39	3.27	0.93	0.90
7	3.66	3.41	3.29	0.93	0.90
8	3.69	3.44	3.32	0.93	0.90

Cuadro A.3. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario de la mezcla.
• Peat moss

14 de abril	Lámina	evaporada acu	ımulada (mm)		Kr hora (adm)
HORA	Pref	Psı	Ps ₂	Ps1 / Pref	Ps2 / Mref
8	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
9	0.12	0.13	0.10	1.00	1.00
10	0.31	0.32	0.28	1.00	1.00
11	0.71	0.75	0.71	1.00	1.00
12	1.32	1.34	1.27	1.00	1.00
13	1.60	1.63	1.57	1.00	1.00
14	2.13	2.12	2.08	1.00	0.98
15	2.73	2.69	2.65	0.99	0.97
16	2.89	2.85	2.81	0.98	0.97
17	2.97	2.92	2.88	0.98	0.97
18	3.05	2.98	2.94	0.98	0.97
19	3.12	3.05	3.01	0.98	0.96
20	3.20	3.11	3.07	0.97	0.96
21	3.27	3.18	3.14	0.97	0.96
22	3.35	3.24	3.20	0.97	0.96
23	3.42	3.31	3.27	0.97	0.95
24	3.50	3.37	3.33	0.96	0.9518
1	3.57	3.43	3.40	0.96	0.9498
2	3.65	3.50	3.46	0.96	0.9480
3	3.73	3.56	3.52	0.96	0.95
4	3.80	3.63	3.59	0.95	0.94
5	3.88	3.69	3.65	0.95	0.94
6	3.95	3.76	3.72	0.9513	0.94
7	4.03	3.82	3.78	0.9496	0.94
8	4.10	3.89	3.85	0.9479	0.94

Cuadro A.4. Registro de las láminas de agua evaporada acumulada y Kr horario del peat moss.

A.6 Cuantificación del parámetro de evaporación AFE

Fecha		Tezontle		Mezcla		Peatmoss
Abril 2023	TS1	TS2	MS1	MS2	PS1	PS2
11	1.71	1.69	2.88	2.98	3.36	3.42
12			1.98	1.94	3.61	3.48
13					2.94	2.93
14					3.82	3.40
AFE	1.71	1.69	4.86	4.92	13.73	13.23

Cuadro A.5. Cuantificación de lámina de fácilmente evaporable, AFE (mm).

A.7 Cálculo del Kr

El cálculo del coeficiente de reducción se hizo con los registros de lámina de agua evaporada por día por sustrato.

	Lámina de agua evaporada (mm día -1)		Coeficiente (adimension	Coeficiente de reducción (adimensional)		
Fecha	TR	TS1	TS2	Kr (TS1 /TR)	Kr (TS2/TR)	
11/04/23	3.25	2.94	2.93	0.90	0.90154	
12/04/23	3.94	2.88	2.95	0.73	0.75	
13/04/23	3.08	1.68	1.88	0.55	0.61	
14/04/23	3.98	1.55	1.75	0.39	0.44	
15/04/23	3.94	1.15	1.25	0.29	0.32	
16/04/23	3.58	0.77	0.82	0.22	0.23	
17/04/23	3.53	0.73	0.77	0.21	0.22	
18/04/23	3.99	0.66	0.71	0.17	0.18	
19/04/23	3.67	0.55	0.58	0.15	0.16	
20/04/23	3.82	0.55	0.57	0.14	0.15	
21/04/23	3.39	0.43	0.45	0.13	0.13	
22/04/23	3.22	0.36	0.41	0.11	0.13	
23/04/23	4.04	0.43	0.46	0.11	0.11	
24/04/23	3.89	0.41	0.41	0.11	0.11	
25/04/23	4.08	0.41	0.43	0.10	0.11	
26/04/23	4.08	0.38	0.39	0.09	0.10	
27/04/23	4.11	0.3	0.32	0.07	0.08	

Cuadro A.6.	Tezontle: cálculo de Kr diario.
-------------	---------------------------------

• Mezcla

	Lámina de agua evaporada (mm día -1) Coef. de reducción (adim)				
Fecha	MR	M1	M2	Kr (MS1/TR)	Kr (MS2/TR)
11/04/23	3.06	3.03	3.13	0.99	1.00
12/04/23	3.88	3.61	3.48	0.93	0.90
13/04/23	3.16	2.65	2.43	0.84	0.77
14/04/23	4.08	2.65	2.21	0.65	0.54
15/04/23	4.01	1.90	1.61	0.47	0.40
16/04/23	3.65	1.31	1.19	0.36	0.33
17/04/23	3.51	1.12	1.09	0.32	0.31
18/04/23	3.92	1.13	1.16	0.29	0.30
19/04/23	3.74	0.9	0.9	0.24	0.24
20/04/23	3.77	0.84	0.88	0.22	0.23
21/04/23	3.45	0.74	0.79	0.21	0.23
22/04/23	3.03	0.57	0.60	0.19	0.20
23/04/23	4.05	0.72	0.78	0.18	0.19
24/04/23	3.83	0.68	0.71	0.18	0.19
25/04/23	4.21	0.72	0.7	0.17	0.17
26/04/23	4.06	0.59	0.64	0.15	0.16
27/04/23	4.08	0.55	0.59	0.13	0.14

Cuadro A.7. Mezcla: cálculo de Kr diario.

Peat moss

Cuadro A.8. Peat moss:	cálculo	de	Kr	diario.
------------------------	---------	----	----	---------

	Lámina de agua evaporada (mm día-1)		Coef. de reducción (adim)		
Fecha	PR	PS1	PS2	Kr (PS1/PR)	Kr (PS2/PR)
11/04/23	3.42	3.36	3.42	0.98	1.00
12/04/23	4.1	4.04	4.14	0.99	1.01
13/04/23	3.22	3.08	3.08	0.96	0.96
14/04/23	4.31	4.08	4.07	0.95	0.94
15/04/23	4.31	3.76	3.75	0.87	0.87
16/04/23	3.91	3.4	3.31	0.87	0.85
17/04/23	3.65	3.09	2.86	0.85	0.78
18/04/23	4.12	2.99	2.7	0.73	0.66
19/04/23	3.86	2.13	1.91	0.55	0.49
20/04/23	3.99	1.79	1.73	0.45	0.43
21/04/23	3.65	1.55	1.47	0.42	0.40
22/04/23	3.39	1.1	1.11	0.32	0.33
23/04/23	4.4	1.39	1.38	0.32	0.31
24/04/23	4.07	1.22	1.22	0.30	0.30
25/04/23	4.35	1.28	1.3	0.29	0.30
26/04/23	4.15	1.08	1.08	0.26	0.26
27/04/23	4.21	1.01	1.01	0.24	0.24

A.8. Características de humedad por sustrato.

• Tezontle

Cuadro A.9. Características de humedad del tezontle.

Peso en gramos, volumen en cm ³ , contenido	en gramos, volumen en cm³, contenido		тер
de humedad adimensional	IK	131	152
Peso Saturación + contenedor	9064	9056	9076
Peso Capacidad de campo + contenedor	6381	6369	6322
Peso fin Etapa 1 + contenedor		6248	6202
Peso 0.5 PMP + contenedor		5134	5096
Peso seco horno + contenedor		5105	5068
Peso a saturación (a)	8849	8841	8861
Peso capacidad de campo (b)	6166	6154	6107
Peso fin etapa 1 de evaporación (c)		6033	5987
0.5 PMP (d)		4919	4881
Peso seco horno (e)		4890	4853
Vol. agua a saturación (a-e)		3951	4008
Vol. agua retenido a capacidad de campo (b-e))		1264	1255
Vol. agua fin Etapa 1 de evaporación (c-e)		1142	1134
Vol. agua debajo 0.5 PMP (d-e)		29	29
Vol agua entre CC y 0.5PMP (f)		1235	1226
θ saturación		0.5563	0.5644
θ capacidad de campo		0.1779	0.1767
θ fin etapa 1		0.1609	0.1597
θ 0.5 PMP		0.0040	0.0040
θPMP		0.0080	0.0080
θ Agotado por evaporación		0.1739	0.1727

• Mezcla

Peso en gramos, volumen en cm ³ , contenido de humedad adimensional	MR	MS1	MS2
Peso Saturación + contenedor	7644	7632	7650
Peso Capacidad de campo + contenedor	5749	5750	5750
Peso Fin Etapa 1 + contenedor		5406	5401
Peso 0.5 PMP + contenedor		3584	3594
Peso seco horno + contenedor		3524	3534
Peso a saturación (a)	7429	7417	7435
Peso capacidad de campo (b)	5534	5535	5535
Peso Fin etapa 1 de evaporación (c)		5191	5186
Peso 0.5 PMP (d)		3369	3379
Peso seco horno (e)		3309	3319
Vol. agua a saturación (a-e)		4109	4116
Vol. agua retenido a capacidad de campo (b- e))		2226	2216
Vol. agua fin Etapa 1 de evaporación (c-e)		1883	1867
Vol. agua debajo 0.5 PMP (d-e)		60	60
Vol agua entre CC y 0.5PMP (f)		2166	2155
θ saturación		0.5785	0.5796
θ capacidad de campo		0.3135	0.3120
θ fin etapa 1		0.2651	0.2629
θ 0.5 PMP		0.0085	0.0085
θPMP		0.0170	0.0170
θ Agotado por evaporación		0.3050	0.3035

Cuadro A.10. Características de humedad de la Mezcla.

Peat moss

Cuadro A.11. Características de humedad en Peatmoss.

Peso en g, volumen en cm ³ , contenido de		DC1	DED
humedad adimensional	ĸ	F31	FJZ
Peso Saturación + contenedor	6039	6036	6042
Peso Capacidad de campo + contenedor	5199	5200	5199
Peso Fin Etapa 1 + contenedor		4220	4239
Peso 0.5 PMP + contenedor		1228	1216
Peso seco horno + contenedor		312	300
Peso a saturación (a)	5824	5821	5827
Peso capacidad de campo (b)	4984	4985	4984
Peso Fin etapa 1 de evaporación (c)		4005	4024
Peso 0.5 PMP (d)		1013	1001
Peso seco horno (e)		97	85
Vol. agua a saturación (a-e)		5724	5742
Vol. agua retenido a capacidad de campo (b-e))		4888	4899
Vol. agua fin Etapa 1 de evaporación (c-e)		3908	3939
Vol. agua debajo 0.5 PMP (d-e)		916	916
Vol agua entre CC y 0.5PMP (f)		3972	3983
θ saturación		0.8060	0.8085
θ capacidad de campo		0.6883	0.6898
θ fin etapa 1		0.5502	0.5546
θ 0.5 PMP		0.1290	0.1290
θPMP		0.2580	0.2580
θ Agotado por evaporación		0.5593	0.5160

A.9 Curvas de liberación de agua por sustrato (CLA).

Cuadro A.12. Curvas	s de liberación	de agua.
---------------------	-----------------	----------

SUSTRATO	POROSIDAD	AND	AFD	ADR	ADD
----------	-----------	-----	-----	-----	-----

	TOTAL	AEREACIÓN	RET. DE HUMEDAD				
Mezcla	64	36	28	33	17	4	5
Tezontle	68	56	11	42	12	3	5
Peat moss	90	20	70	7	38	39	5

Cuadro A.13. Características de humedad de sustratos por C.L.A.

Tratamiento	Sólido	SAT	CC	PP
Mezcla	0.36	0.64	0.26	0.05
Tezontle	0.32	0.68	0.20	0.05
Peat moss	0.10	0.90	0.82	0.05

Tezontle



Figura A.3. Tezontle: C.L.A.

• Mezcla



Figura A.4. Mezcla: C.L.A.



Peat moss

Figura A.5. Peat moss: C.L.A.