

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA FAO-PENMAN MONTEITH CON
MEDICIONES DE RADIACIÓN NETA EN UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

TESIS

Que presenta:

PASCUAL ERVIDAN PÉREZ DÍAZ

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

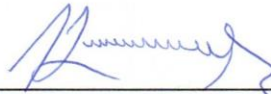
Saltillo, Coahuila

Mayo 2024

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA FAO-PENMAN MONTEITH CON
MEDICIONES DE RADIACIÓN NETA EN UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

TESIS

Elaborada por PASCUAL ERVIDAN PÉREZ DÍAZ como requisito parcial para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS
DE PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría.



Dr. Alejandro Zermeño González

Director de Tesis



Dr. Homero Ramírez Rodríguez

Asesor



Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor



Dr. Audberto Reyes Rosas

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

Con mucha gratitud, elevo mis palabras de agradecimiento a Dios Todopoderoso, fuente de sabiduría y guía en cada paso de este viaje académico. Su amor incondicional y dirección divina han sido mi roca y mi fortaleza, inspirándome y sustentándome en los momentos de dificultad y de logro.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, a todas las personas que han contribuido de alguna manera en la realización de este trabajo de tesis. En primer lugar, agradezco a mi Asesor principal; Alejandro Zermeño González, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Su dedicación y sabiduría han sido fundamentales para dar forma a este proyecto y llevarlo a buen término.

También quiero extender mi gratitud a los coasesores que en todo momento estuvieron al pendiente, así como al Dr. José Alexander Gil que siempre estuvo presente apoyándome y orientándome, sus valiosos comentarios y sugerencias enriquecieron significativamente este trabajo.

Agradezco a mi familia el apoyo incondicional en este viaje. Su aliento, comprensión y amor han sido mi mayor fortaleza en los momentos difíciles y han hecho posible este logro.

Finalmente, agradezco a todo el equipo de trabajo (tesistas y gente de servicio social) que me apoyaron en el trabajo de campo. Su colaboración fue fundamental para la realización de esta investigación.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda y el apoyo de todas estas personas. A todos ustedes, les estoy profundamente agradecido.

¡Gracias!

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso,

En gratitud eterna por Tu amor incondicional, Tu guía infalible y Tu constante presencia en cada paso de este camino. Todo lo que he logrado en este viaje académico es un testimonio de Tu gracia y misericordia inagotables.

A mis padres Carmelino Pérez Roblero y Mariela Díaz Roblero

Por ser mis primeros maestros en el camino de la vida, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios generosos. Por siempre estar al pendiente de mí en cada circunstancia mil gracias.

A mis hermanos y hermanas

Por ser una fuente de inspiración y por creer en mí, por ser mis amigos más cercanos. Han sido un regalo invaluable en mi vida, y su fuerza y apoyo han sido un motivo para no renunciar en los momentos difíciles.

A mis profesores y mentores,

Por su sabiduría, su paciencia y su dedicación incansable en la enseñanza y el aprendizaje. Su influencia ha dejado un buen aprendizaje en mi mente y en la práctica.

A mis amigos y seres queridos,

Por su amor, y sus presencias constantes en mi vida. Por ayudarme en todo.

A Dios y a todos ustedes, con amor y gratitud.

P. Ervidan Pérez Díaz

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| AGRADECIMIENTOS..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| ÍNDICE GENERAL..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| ÍNDICE DE CUADROS | viii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivo general..... | 2 |
| Objetivos específicos..... | 2 |
| Hipótesis | 2 |
| REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| Proceso de evapotranspiración..... | 3 |
| Diferentes acepciones del termino evapotranspiración. | 3 |
| Evapotranspiración de referencia (ET _{ref}) | 3 |
| Factores que afectan la evapotranspiración. (Factor suelo, planta y clima). | 5 |
| Medidas y Cálculos de la Evapotranspiración. | 5 |
| Medidas directas de la evapotranspiración. | 5 |
| Tanque de evaporación..... | 6 |
| Lisimetría | 7 |
| Otras técnicas de medida directa de la evapotranspiración..... | 10 |
| Balances hídricos..... | 10 |
| Métodos fisiológicos. | 10 |
| Medida indirecta de la Evapotranspiración. | 11 |
| Métodos micrometeorológicos..... | 11 |
| Formulas empíricas. | 12 |
| Tendencias futuras en la determinación de la evapotranspiración..... | 14 |
| Antecedentes. | 14 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 16 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 21 |
| Radiación neta y flujo de calor en el suelo medidos y estimados | 21 |
| Evapotranspiración de referencia medida y estimada | 26 |

| | |
|--|----|
| Tasa de evapotranspiración del pasto y la ET de referencia | 30 |
| CONCLUSIONES | 33 |
| REFERENCIAS..... | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_{c\ aj}$) Tomada del manual 56. (Allen et al 1998). | 15 |
| Figura 2. Taque evaporímetro tipo A. | 19 |
| Figura 3. Implementación de un lisímetro de alta resolución para estudios de dinámica de agua y su eficiencia de uso en Andisoles bajo uso agrícola. | 21 |
| Figura 4. Lisímetro de drenaje. | 22 |
| Figura 5. Balance hídrico del suelo. | 23 |
| Figura 6. Estación meteorológica automatizada (Campbell Sic., Logan, Utah, USA) para obtener las variables meteorológicas, para la determinación de la evapotranspiración de referencia FAO Penman-Monteith. | 30 |
| Figura 7. mini lisímetros de PVC; para medir la tasa de evapotranspiración diaria del pasto (por diferencia de peso de los mini lisímetros) | 32 |
| Figura 8. Ajuste de regresión lineal de los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 de la radiación neta estimada (FAO-56) y la radiación neta medida (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN, Netherlands). | 38 |
| Figura 9. Ajuste de regresión lineal de los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 del flujo de calor estimado (FAO-56) y el flujo de calor medido (Transductor de flujo de calor y termopar de cuatro puntas). | 40 |
| Figura 10. Ajuste de regresión lineal entre los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 de la tasa diaria de evapotranspiración de referencia estimada (ET_{r_est}) (método FAO-56) y la medida (ET_{r_med}) (con mediciones de radiación neta y flujo de calor en el suelo). | 43 |
| Figura 11. Tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) medida y estimada con los datos de la estación de observaciones meteorológicas de junio de 2022 a octubre de 2023. | 44 |
| Figura 12. Ajuste de regresión entre la tasa diaria de evapotranspiración del pasto de la estación de observaciones meteorológicas (promedio de seis micro lisímetros) y la tasa de evapotranspiración de referencia (FAO-56). | 45 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) medidos y estimados (valor integrado promedio diario de cada mes), y las diferencias (Dif) entre lo medido y lo estimado (%). Valores obtenidos con los datos de la estación de observaciones meteorológicas. | 37 |
| Cuadro 2. Evapotranspiración de referencia (ETref) mensual (mm), medida (con mediciones directa de radiación neta y flujo de calor en el suelo), y la ETref estimada (con base al método FAO-56), de cada mes en que se realizaron mediciones del año 2022 y 2023. | 41 |

RESUMEN

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA FAO-PENMAN MONTEITH CON
MEDICIONES DE RADIACIÓN NETA EN UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Por:

PASCUAL ERVIDAN PÉREZ DÍAZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Dr. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ -ASESOR-

Saltillo, Coahuila,

Mayo 2024.

Para la programación eficiente del riego es importante conocer la tasa de evapotranspiración diaria de cada cultivo (ET_c) establecido en una determinada localidad. La ET_c se puede obtener a partir de la tasa de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) de acuerdo con el procedimiento del manual FAO-56 y un coeficiente de ajuste por desarrollo de cultivo (K_c). Sin embargo, la tasa diaria de ET_{ref} que se obtiene con estimaciones de radiación neta (R_n) y flujo de calor en el suelo (G) pueden ser diferentes a los que se obtienen cuando R_n y G son medidos. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar la diferencia entre la tasa diaria de ET_{ref} obtenida con el procedimiento del manual FAO-56 y la que se obtiene con mediciones de R_n (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN, Netherlands), y G (Transductor de flujo de calor y soil thermocouples). Los resultados del estudio mostraron que la tasa diaria de ET_{ref} con mediciones de R_n y G es 17.63 % mayor que ET_{ref} FAO-56, debido a un valor mayor de la R_n diaria medida (Net radiometer) (14.08 %) que la estimada (manual FAO-56), y un valor menor de G medido (36.6 %), que el estimado como el 10 % de la R_n (manual FAO-56). Esta diferencia se debe tomar en consideración al realizar la programación de riegos de un cultivo con base a la tasa diario de ET_{ref} , con base al manual FAO-56.

Palabras clave: Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo, flujo de calor en el suelo, manual FAO-56, radiación neta.

ABTRACT

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FAO PENMAN-MONTEITH USING NET
RADIATION MEASUREMENTS IN AN AUTOMATED WEATHER STATION

By

PASCUAL ERVIDAN PÉREZ DÍAZ

MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Dr. ALEJANDRO ZERMEÑO GONZÁLEZ –ADVISOR–

Saltillo, Coahuila,

May 2024.

For efficient irrigation timing, it is essential to know the daily evapotranspiration rate of each crop (ET_c) established in a specific location. ET_c can be obtained from the reference evapotranspiration rate (ET_{ref}) according to the procedure of the FAO-56 manual and the crop coefficient (K_c) of crop development (K_c). However, the daily rate of ET_{ref} obtained with estimates of net radiation (R_n) and soil heat flux (G) may differ from those obtained when R_n and G are measured. Therefore, the objective of this study was to evaluate the difference between the daily rate of ET_{ref} obtained with the procedure of the FAO-56 manual and that obtained with measurements of R_n (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN, Netherlands) and G (Heat flux transducer and soil thermocouples). The results of the study showed that the daily rate of ET_{ref} with R_n and G measurements is 17.63 % higher than ET_{ref} FAO-56 manual due to a higher value of the daily R_n measured (Net radiometer) (14.08 %) than the estimated one (manual FAO-56), and a lower value of measured G (36.6 %) than estimated as 10 % of the R_n (FAO-56 manual). This difference must be considered when scheduling crop irrigation based on the daily rate of ET_{ref} , based on the FAO-56 manual.

Keywords: Crop evapotranspiration, FAO-56, soil heat flux manual, net radiation, reference evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

Para un eficiente manejo del agua en la agricultura de una determinada localidad, es indispensable conocer la tasa diaria de evapotranspiración de los diferentes cultivos de esa región (ET_c). La tasa diaria de ET_c de un determinado cultivo se puede determinar con la tasa de ET de referencia (ET_{ref}) usando el método FAO Penman Monteith (Allen, 1998), que se ajusta con un coeficiente de cultivo (K_c), que depende de la condición de cobertura vegetal y de la etapa fenológica desarrollo del cultivo.

El método FAO Penman Monteith se ha utilizado ampliamente en diferentes regiones del mundo, de diversas condiciones climáticas para determinar la ET_{ref}, y con esta la tasa de evapotranspiración actual de los cultivos, y su aplicación para una adecuada programación de los riegos. Por ejemplo, Trezza (2008) comparó el método FAO Penman Monteith contra el del balance hídrico del suelo para la programación del riego en un cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Intrigliolo *et al.* (2009) usaron el método FAO Penman Monteith para determinar la tasa de evapotranspiración de una plantación de vid (cv Riesling) en la programación del riego. Moratiel y Martínez-Cob (2012) determinaron la ET_{ref} para calcular la ET_c de una plantación de vid (*Vitis vinífera*, cv. Red Globe) de un clima semiárido con malla sombra sobre el dosel de las plantas. Zermeño-González *et al.* (2017) realizaron comparaciones de la tasa de ET_c de un viñedo (*Vitis vinífera*) obtenidas con mediciones de covarianza eddy con la tasa de ET_{ref} obtenida con el método FAO Penman Monteith. La eficiencia de la programación de los riegos de una huerta de nogal pecanero se evaluó comparando la tasa de ET_{ref} (FAO Penman Monteith) con la tasa evapotranspiración de los árboles de la huerta que se obtuvo con mediciones de covarianza eddy (Zermeño-González *et al.*, 2023). Zia *et al.* (2021) usaron el método FAO Penman-Monteith para la programación de los riegos de una huerta de árboles de limón (*Citrus xlimon*).

En el método FAO Penman Monteith, la radiación neta (R_n) sobre la superficie de referencia (pasto de 12 cm de altura que cubre totalmente la superficie y que no tiene deficiencia de agua en el suelo) se estima a partir de datos de radiación que se obtienen a partir de la información correspondiente a la latitud, altitud, presión

barométrica de la localidad y del día del año. Además, el flujo de calor en la superficie del suelo (G), se estima como el 10 % de la R_n . Dicha información puede ser muy diferente a la radiación neta y flujo de calor en la superficie del suelo que se obtienen con mediciones directas en el sitio donde se ubica la estación meteorológica.

Objetivo general

Evaluar la diferencia entre la tasa de ET_{ref} con estimaciones de Radiación neta (R_n) y G ; con mediciones directas de dichas variables.

Objetivos específicos

- Obtener series de tiempo de la tasa de ET_{ref} diarias con estimación y con mediciones de R_n y G .
- Determinar coeficientes de ajuste para corregir la ET_r que se obtiene con datos estimados de R_n y G , a partir de los datos medidos.
- Comparar la tasa de ET_r con la ET_c medida con microlisímetros de pesada del pasto de la estación de observaciones meteorológicas

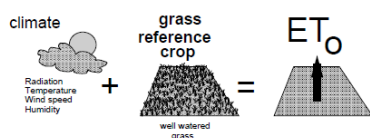
Hipótesis

La tasa de ET_{ref} obtenida con mediciones directas de R_n y G de la superficie de referencia, es diferente a la que se obtiene con los datos estimados de R_n y G , con los datos de la latitud y altitud de la localidad.

REVISIÓN DE LITERATURA

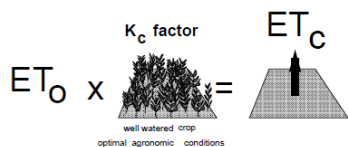
Proceso de evapotranspiración

Es un proceso combinado que incluye el agua que se pierde a través de evaporación directa desde el suelo y transpiración de las plantas. La evaporación es el proceso físico que transforma el agua en vapor. Por otro lado, la transpiración es un proceso biológico mediante el cual las plantas absorben agua del suelo a través de las raíces y la liberan en forma de vapor hacia la atmósfera. Al combinarse ambos procesos se puede comprender la disponibilidad de agua en el medio ambiente afectando a la hidrología y a la agricultura principalmente. (Allen *et al.*, 2006).



Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

Evapotranspiración por factores climáticos.



Evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar (ET_c)

Demanda de evapotranspiración de cultivos que se cultivan en grandes campos con agua óptima en el suelo, excelente manejo y condiciones ambientales, y que alcanzan la producción total en las condiciones climáticas dadas.

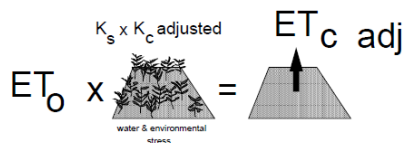


Figura 1. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), bajo condiciones estándar (ET_c) y bajo condiciones no estándar ($ET_c \text{ aj}$) Tomada del manual 56. (Allen *et al* 1998).

Diferentes acepciones del termino evapotranspiración.

Evapotranspiración de referencia (ET_{ref})

La evapotranspiración de referencia es un parámetro fundamental en la gestión del agua y la agricultura, ya que proporciona una medida estándar de la pérdida de agua de una superficie vegetal bajo condiciones climáticas específicas. La evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se define como la cantidad de agua que se evaporaría de una superficie vegetal hipotética, llamada cultivo de referencia,

que tiene una altura fija, una resistencia superficial y un albedo específicos, bajo condiciones meteorológicas y de humedad óptimas. Es una medida estandarizada que permite comparar la demanda evaporativa de diferentes regiones y cultivos. La evapotranspiración de referencia se mide en (mm d^{-1}) y es un parámetro que se basa en una superficie de referencia de un pasto bien regado que cubre la superficie del suelo con una altura de 12 cm, resistencia superficial de 70 s m^{-1} y albedo de 0.23. (Allen *et al.*, 1998).

La evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) es una variable crucial en los estudios hidrológicos, agrícolas y ambientales, estimada principalmente mediante modelos empíricos, ecuaciones de regresión y algoritmos de aprendizaje automático basados en datos meteorológicos. (Toro-Trujillo *et al.*, 2015. Koç y Erkan., 2023)

Evapotranspiración actual (ET_a)

La evapotranspiración actual ($\text{mm planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) se define como la cantidad de agua que fisiológicamente pasa a través de una planta cumpliendo su función fisicoquímica dentro de las plantas y que sale a través de los estomas, regresando a la atmosfera en forma de vapor (Pivec y Brant., 2018). La evapotranspiración actual también se define como la cuantificación de la cantidad actual de agua que se evapora de la superficie terrestre y se transpira por las plantas (Awada *et al* 2021). La evapotranspiración actual es uno de los procesos más importantes y difíciles de calcular en el ciclo hidrológico esto se puede referir a la cantidad de perdida de agua de la superficie del suelo a través de los procesos combinados de evaporación y transpiración de las plantas. (Jin *et al.*, 2013).

Allen *et al.*, (1998) menciona que la ET_a o Evapotranspiración del cultivo se puede obtener al multiplicar la $ET_{ref} * K_c$. El coeficiente de cultivo (K_c) es una medida que indica la cantidad de agua necesaria para un cultivo en comparación con la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}). Se utiliza para ajustar la (ET_{ref}) y tener en cuenta las particularidades del cultivo y su etapa de desarrollo.

Mehta y Pandey., (2014) determinaron ET_c multiplicando la ET_{ref} por los valores de K_c específicos de los cultivos de trigo y maíz en Gujarat en la India. Así como Neves *et al* (2023) hizo un estudio de comparación entre la ET_c del cultivo o con la

evapotranspiración de referencia obtenida con el método Penman-Monteith y el Kc, contra un lisímetro de pesada electrónico de gran escala para caña de azúcar, obteniendo valores precisos para Kc de la caña de azúcar.

Factores que afectan la evapotranspiración. (Factor suelo, planta y clima).

La evapotranspiración (ET) se ve influenciada por una serie de factores, que incluyen el suelo, las plantas y el clima. La cantidad de agua disponible en el suelo desempeña un papel fundamental en la regulación de la ET, estudios demuestran que las restricciones hídricas en el suelo a menudo limitan este proceso. (Qiu et al., 2022, Liang-De et al., 2022)

La dinámica de la evapotranspiración se ve directamente afectada por la profundidad de las raíces, en conjunto con las condiciones climáticas. Esta relación se puede ver en los modelos que incluyen la absorción de agua por parte de las raíces al calcular la distribución de la ET. (Dani., 2022)

Los factores climáticos, como la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y las precipitaciones, ejercen una influencia considerable en las tasas de evapotranspiración. Entre ellos, la temperatura la humedad del suelo, las respuestas de las plantas al estrés hídrico y las altas temperaturas son factores claves que afectan a la evapotranspiración durante las sequias y las adaptaciones de las plantas reducen el impacto del estrés hídrico. (Zhao et al., 2022).

Medidas y Cálculos de la Evapotranspiración.

Medidas directas de la evapotranspiración.

Los lisímetros y los tanques de evaporación son métodos utilizados para medir directamente la evapotranspiración. Los lisímetros en particular se consideran precisos y fiables para medir la evapotranspiración actual a escala de campo. (Pütz, & Groh., 2023).

Tanque de evaporación.

Tanque evaporímetro Clase A: es un dispositivo que integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre la superficie del agua (Allen, 1998).

Este método es una técnica utilizada para medir la evaporación en conjunto con los anemómetros está diseñado específicamente para determinar la (ET_{ref}), que es crucial en la gestión de riego. Para la aplicación de este método es necesario determinar un coeficiente que varía según las condiciones climáticas locales. Dicho coeficiente se utiliza para ajustar la evaporación medida por el tanque evaporímetro clase A y los atmómetros a las condiciones específicas del lugar donde se encuentra el cultivo. El coeficiente de tanque se calcula a partir de datos históricos y mediciones directas de la evaporación y puede ajustarse periódicamente para reflejar cambios estacionales o condiciones climáticas inusuales. Una vez determinado el coeficiente, se utiliza para convertir la evaporación medida por el tanque evaporímetro y los atmómetros en una estimación precisa de la ET_o , que luego se utiliza para programar los riegos de manera eficiente y optimizar el uso del agua en la agricultura (Allen et al., 1998, Sobrinho et al 2020)

Ajustar correctamente los coeficientes del tanque es crucial para garantizar la exactitud de estas mediciones, lo que, a su vez, contribuye a una gestión más efectiva del riego y los recursos hídricos en la agricultura. (Ortiz et al., 2018).



Figura 2. Taque evaporímetro tipo A.

Lisimetría

Los lisímetros son herramientas esenciales en la investigación agrícola para medir con precisión el balance de agua en el suelo y la evapotranspiración de los cultivos. Existen dos tipos principales: los de pesaje de precisión, que permiten mediciones muy exactas de la evapotranspiración y los de drenaje que calculan la evapotranspiración restando el agua drenada del agua total ingresada. Es crucial que la vegetación este dentro y alrededor del lisímetro sea del mismo material vegetal para obtener datos precisos. Aunque son muy útiles son caros de construir y usar, y se usan principalmente en la investigación agrícola debido a su complejidad. (Allen et al., 1998)

Los lisímetros son dispositivos que miden la cantidad de agua utilizados por la combinación entre vaporización y transpiración de las plantas de manera in situ puede ser suelo no alterado (monolito) o suelo alterado. Es una de las muchas formas de obtener la evapotranspiración. Los lisímetros miden el peso de la planta y el suelo que este contenido dentro del recipiente, es el método directo para estimar la evapotranspiración de los cultivos (Dong & Hansen 2023).

2.3.1.2.1 Lisímetro de pesada

Es un dispositivo que mide directamente la cantidad de agua evaporada y transpirada por un cultivo, se utiliza para determinar la evapotranspiración actual (ET_c) en condiciones no estándar. Consiste en un tanque lleno de suelo, en condiciones iguales a los del campo de experimentación la pérdida de agua se mide por pesada del recipiente con el suelo y el cultivo (García et al., 2012)

Por otra parte, Moorhead., et al (2019), señalan que es un sistema utilizado para medir la evapotranspiración con precisión consistente en un contenedor o recipiente enterrado en el suelo que contiene un cultivo o una muestra representativa del suelo que se desea estudiar, que permite calcular la cantidad total de agua que el cultivo utiliza; proporcionan datos directos y específicos para un área de interés particular. Sin embargo, los lisímetros son costosos de instalar y mantener, lo que limita su uso a investigaciones o estudios que requieren alta precisión y financiamiento adecuado (Fenner *et al.*, 2019).

Los lisímetros de bajo costo son una alternativa viable para medir la evapotranspiración en diversos entornos. Estos dispositivos pueden ser construidos utilizando materiales asequibles y técnicas sencillas lo que convierte en ideal para medir la (ET_{ref}) en cualquier entorno como pastizales y humedales (Saha et al 2022).



Figura 3. Implementación de un lisímetro de alta resolución para estudios de dinámica de agua y su eficiencia de uso en Andisoles bajo uso agrícola.

Lisímetro de drenaje

Es un dispositivo que mide la cantidad de agua que se drena del suelo de un sitio experimental específico. No mide directamente la evapotranspiración sino la cantidad de agua que fluye a través del suelo. (Kelso-Bucio et al.,2012).

La evapotranspiración se determina por un balance de entrada y de salida de agua, es medida por un periodo determinado por la diferencia entre cantidad de agua

drenada, recogida en los lisímetros y la cantidad de agua ingresada (García et al., 2012).

Ouédraogo *et al.*, (2022) y León *et al.*, (2022), señalan que los lisímetros de drenaje son herramientas fundamentales en la investigación de la evapotranspiración de referencia porque permiten medir con precisión la cantidad de agua que sale al drenar el sistema. Estos miden la cantidad de agua que se pierde por evaporación y transpiración a través de la vegetación, así como la cantidad de agua que se pierde por drenaje. La evapotranspiración puede representar una parte significativa del balance hídrico en los lisímetros con valores que pueden variar entre el 57% y el 90% de las entradas de agua.

Los lisímetros son herramientas valiosas para monitorear la evapotranspiración y estudiar los efectos del cambio climático en el balance hídrico del suelo. Con este sistema se obtiene datos precisos del agua drenada esto ayuda a los parámetros del equilibrio hídrico, como la precipitación, la lixiviación de nutrientes y otros compuestos solubles en el suelo. (Meissner et al 2020).

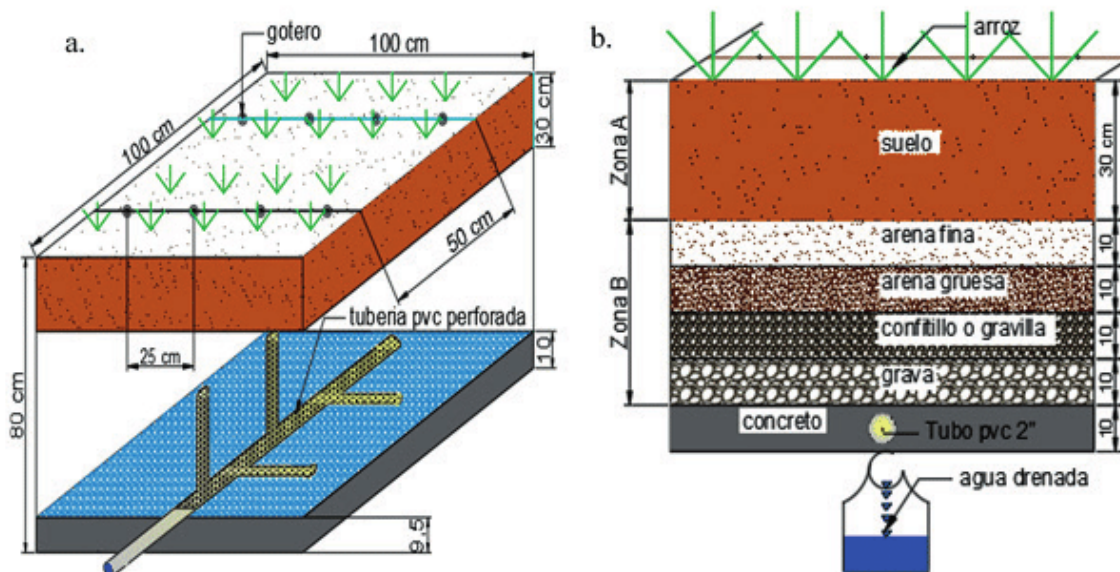


Figura 4. Lisímetro de drenaje

Otras técnicas de medida directa de la evapotranspiración

Balances hídricos.

La evapotranspiración puede ser determinada midiendo el balance de agua en el suelo, este método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo durante un periodo específico (Figura 5).

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta S$$

Donde el riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), mientras que el drenaje profundo (D) eventualmente recargará el acuífero. El agua también puede moverse hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia dentro o fuera de la zona radicular (ΔFS). Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo. (Allen et al., 1998, Faramiñán et al 2021).

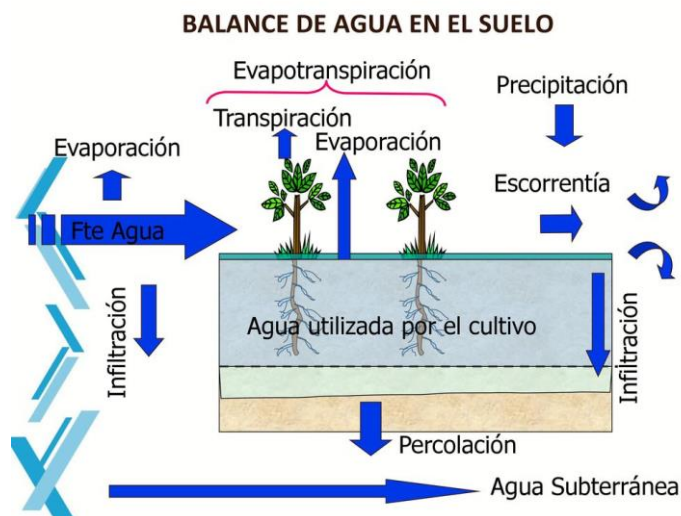


Figura 5. Balance hídrico del suelo.

Métodos fisiológicos.

Los métodos fisiológicos para estimar la evapotranspiración se centran en medir la pérdida de agua de un árbol individual. A diferencia de los enfoques hidrológicos y micrometeorológicos, que son mejores para evaluar áreas más grandes, los métodos fisiológicos se concentran en la dinámica del agua de plantas específicas.

Estos métodos son valiosos para comprender cómo un árbol en particular maneja su agua, lo que es crucial en estudios detallados de la vegetación y en la gestión de cultivos. (Jian-hua., 2005). Además, se puede estimar la transpiración de los árboles mediante mediciones del flujo de savia. Este enfoque brinda información detallada sobre el uso de agua de cada árbol, lo que permite entender mejor cómo las plantas regulan su consumo de agua en respuesta a diferentes condiciones ambientales. (Novák., 2012). Los métodos fisiológicos ofrecen información detallada sobre la dinámica de la pérdida de agua de las plantas, complementando las técnicas de estimación de la evapotranspiración a mayor escala. (Villalobos *et al.*, 2015).

Medida indirecta de la Evapotranspiración.

Métodos micrometeorológicos.

Los métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración (ET) son herramientas fundamentales que ofrecen valiosa información sobre los complejos procesos de intercambio de calor y humedad entre la superficie terrestre y la atmósfera. Estos métodos incluyen la técnica de covarianza de remolinos (CE), el método de equilibrio energético-relación de Bowen y el método del centelleómetro. (Bambach *et al.*, 2022, Chittolina *et al.* 2022) .

La técnica de covarianza de remolinos (CE) mide directamente los flujos turbulentos de calor, humedad y otros parámetros entre la superficie y la atmósfera, utilizando instrumentación especializada como anemómetros sónicos y analizadores de gases. El método de equilibrio energético-relación de Bowen se basa en la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente, calculando la ET a partir de estas mediciones. El método del centelleómetro emplea la centelleometría para medir la intensidad de las fluctuaciones ópticas en la atmósfera, lo que permite inferir propiedades de la turbulencia y estimar así la ET. (Allen *et al.*, 2021, Vamsi *et al.*, 2022, Rocha *et al.*, 2022).

Los métodos micrometeorológicos como el Equilibrio Energético del Índice de Bowen (BREB) y la Covarianza de Foucault (EC) desempeñan un papel crucial en

la determinación de la Evapotranspiración Real (ETa) en cultivos, como el trigo de invierno. (Şaylan et al., 2018)

Formulas empíricas.

Los métodos indirectos son una serie de ecuaciones no lineales complejas, que se basan en supuestos y mediciones meteorológicas, entre estos métodos se pueden mencionar: FAO Penman–Monteith (FAO56PM), Thornthwaite, Blaney y Criddle, Priestly y Taylor, Hargreaves y Samani, Método de Papadakis, Método de Ivanov, Método de Turc (1961), Método Jensen-Haise (1963), Método de Grassi y Christiansen entre otros métodos (Sánchez., 2001, Küçüktopcu., *et al* 2023).

La ecuación de Penman-Monteith de la FAO-56 se destaca como uno de los métodos más precisos para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_r). Sin embargo, su precisión va de la mano con su complejidad debido a la gran cantidad de variables climáticas que requiere. (Pinos., 2022)

Según (Allen et al., 1998, Toro-Trujillo et al., 2015, Djaman., 2017, Pinos., 2022) concuerdan que la ecuación de Penman-Monteith de la FAO-56 es ampliamente reconocida pero desafiante:

Precisión: Esta ecuación es altamente precisa y se considera el estándar de oro para calcular la (ET_{ref}). Utiliza una combinación de factores climáticos, como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la presión atmosférica, para proporcionar estimaciones precisas de la evaporación y la transpiración.

Complejidad: La ecuación de Penman-Monteith es compleja debido a la gran cantidad de variables climáticas que requiere. Esta complejidad puede dificultar su aplicación práctica, especialmente en áreas donde no se disponga de mediciones precisas de todas las variables requeridas.

Requerimientos de Datos: Para aplicar la ecuación de Penman-Monteith, se necesitan mediciones precisas de múltiples variables climáticas, lo que puede ser un desafío en entornos donde las estaciones meteorológicas no estén bien equipadas o los datos satelitales no estén disponibles.

Este método, se basa en datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento, es una combinación que se basa en un balance de energía (Allen., et al 2006, Wang., et al. 2017, Ezenne., et al 2023).

El método FAO 56 Penman-Monteith se puede calcular mediciones de radiación solar (R_s), temperatura (T), humedad relativa (RH) del aire y velocidad del viento (U). Además, requiere mediciones o estimaciones de radiación neta (R_n), flujo de calor del suelo (G) y déficit de presión de vapor (VPD). Los procedimientos para estimar estos parámetros son descritos por diferentes autores (Doorenbos y Pruitt, 1977; Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Ortega-Farias et al., 2000; Irmak et al., 2003).

Al incluir la radiación neta y el flujo de calor en el suelo se requiere de sensores calibrados y caros es muy difícil que se lleguen a medir, esto limita mucho los estudios de las áreas agronómicas por la escasez de datos (Tomar., 2016)

La ecuación que se describe en dicho método es:

$$LE_{ref} = \frac{S \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{(\Delta e)}{r_a} \cdot (f)}{S + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Donde LE_{ref} es el calor latente de referencia ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación contra la temperatura correspondiente a la temperatura del aire ($kPa\ K^{-1}$), R_n es la radiación neta sobre la superficie de referencia ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), G es el flujo de calor en la superficie del suelo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) que se estima como el 10% de la R_n , ρ_a es la densidad del aire ($kg\ m^{-3}$), C_p es la capacidad calorífica del aire ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) Δe es el déficit de vapor del aire (kPa), γ es la constante psicrometría de la localidad ($kPa\ K^{-1}$), r_a es la resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor ($s\ m^{-1}$), r_s es la resistencia del dosel al flujo de vapor de agua ($s\ m^{-1}$) el factor f ($8.64e4$) es para la transformación de unidades de $s\ m^{-1}$ a d^{-1} (Allen et al 1998). La misma que se describe en el capítulo de materiales y métodos.

Tendencias futuras en la determinación de la evapotranspiración.

Las futuras tendencias en la determinación de la evapotranspiración están marcadas por avances en tecnología, modelización y análisis de datos. Los estudios resaltan la importancia de monitorear la evapotranspiración para la gestión eficiente de los recursos hídricos, la agricultura y la comprensión del cambio climático. (Riessbaum et al., 2023). Así como técnicas de aprendizaje automático para desarrollar conjuntos de datos (ET) (Mossie et al., 2023).

Antecedentes.

Algunos de los muchos estudios especialmente realizados en climas áridos y semiáridos y con climas fríos es necesario cuantificar el uso del agua como el estudio realizado por (López-Urrea et al 2020) en canola (*Brassica napus* L.) donde midieron la evapotranspiración por dicho método con el fin de eficientar el uso del agua y así obtener los K_c de dicho cultivo. Así como (Kadam et al 2020) determinaron la evapotranspiración en suelos arcillosos en un cultivo de papa, determinando la programación de riegos como el K_c del cultivo en una región semiárida con el método Fao Penman Monteith.

Es utilizado en varios estudios para estimar las necesidades de agua de los cultivos y desarrollar estrategias de riego adaptadas a cultivos específicos donde se han demostrado que este método es eficaz para automatizar sistemas de riego. (Ogidan et al 2023).

El método ha sido probado también en arroz y cítricos en la cuenca hidrográfica Parit Keladi de Indonesia con el fin de determinar las necesidades hídricas de dichos cultivos. (Tasya et al. 2023).

Este método es preciso para calcular la (ET_{ref}) sin embargo cuando hay datos faltantes la precisión puede disminuir. La velocidad del viento es crucial en este método puede afectar significativamente los resultados, en cultivo de maíz (*zea mays*) el método es preciso con 1 y 2 m/s.

Se puede determinar la evapotranspiración actual con con el método Fao Penman Monteith y se hace multiplicando la ($ET_{ref} * K_c$ del cultivo), como lo obtuvo (Dhruw & Pandey 2023) con cultivos de arroz, trigo, garbanzos.

Este método ha sido ampliamente estudiado y comparado con otros métodos que ofrecen alternativas para estimar la evapotranspiración como es el caso de (Ramachandran et al 2023) que propusieron modelos simplificados de Valiantzas donde mostraron una buena precisión, lo que permitió un uso práctico en la gestión del agua de los cultivos. También (Abeyesiriwardana et al 2023) realizaron un estudio donde compararon tres métodos; Shuttleworth-Wallace, Thornthwaite y Pan donde el método pan y S-W resultaron tener mejores resultados en la zona seca.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la estación de observaciones meteorológicas del Jardín Hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. La estación es de forma circular, de 12 m de diámetro con pasto de la variedad San Agustín (*Stenotaphrum secundatum*) que cubre totalmente la superficie del suelo. El pasto se riega con cuatro aspersores fijos (12 L/h) a una frecuencia de dos días, para mantener una adecuada humedad del suelo para que la tasa de evapotranspiración del pasto cumpla con la demanda evaporativa de la atmosfera. El crecimiento del pasto se mantuvo a una altura de aproximadamente 12 cm realizando podas a la frecuencia requerida (usando una maquina podadora). El manejo del pasto de la estación se realizó para simular las condiciones de la superficie de referencia indicadas en el método FAO Penman Monteith.

En el centro de la estación se tiene una estación meteorológica automatizada marca Campbell (Campbell Sci., Inc. Logan, Utah, USA) (Figura 1). Con esta estación se mide continuamente a una frecuencia de 1 s y promedio de 30 min la temperatura y humedad relativa del aire (HC2S3 temperature and relative humidity probe, Campbell, Sci., Logan, Utah), velocidad y dirección del viento a 2 m de altura (Met One 034B Wind Set, Campbell, Sci., Logan, Utah), radiación solar incidente (Silicon Pyranometer; model SP-510, Apogee Inst., Logan, Utah, USA), presión barométrica (CS100 Barometric Pressure Sensor, Campbell, Sci., Logan, Utah), sensor de lluvia (TE 525 Tipping Bucket Rain Gage, Campbell, Sci., Logan, Utah). Además, para obtener la radiación neta sobre el pasto (equivalente a la superficie de referencia) y el flujo de calor en la superficie del suelo, se instaló un Net Radiometer (LITE Net Radiometer; K&E and ZONEN, Netherlands), un transductor de flujo de calor (modelo HFP01, Campbell, Sci., Logan, Utah) y un termopar (chromel – constantan) de cuatro puntas (Campbell Sci., Inc., Logan, Utah, USA). El flujo de calor en la superficie del suelo se obtuvo sumado al flujo de calor medido a 8 cm bajo la superficie del suelo, el cambio en la energía del estrato de suelo sobre el transductor de flujo de calor. Todos los sensores descritos se conectaron a un datalogger

CR1000 (Campbell, Sci., Inc., Logan, Utah, USA) para mediciones continuas (frecuencia de 1 s) de todas las variables descritas y generar promedios de 30 min.



Figura 6. Estación meteorológica automatizada (Campbell Sic., Logan, Utah, USA) para obtener las variables meteorológicas, para la determinación de la evapotranspiración de referencia FAO Penman-Monteith.

Adicionalmente, en la estación se instalaron seis mini lisímetros de PVC (de 11 cm de diámetro y 15cm de profundidad) para medir la tasa de evapotranspiración diaria del pasto (por diferencia de peso de los mini lisímetros), y seis micro tensiómetros (0 a 40 kPa) para determinar la tensión de humedad del suelo.

Mini lisímetros

Se fabricaron 6 mini lisímetros de PVC rd42 “sanitario” (de 11 cm de diámetro y 15cm de profundidad), en la parte inferior se le puso malla plástica; sujeta con cinta TUK SKU#350072 MODELO:659377 CINTA PARA DUCTO 48 MM X 50 M GRIS TUK (cinta gris), el suelo se extrajo de manera de monolito sin disturbarse (se hizo con un tubo de fierro galvanizado de 11 cm de diámetro). Estos minilísimetros fueron pesados en el sitio experimental por una báscula marca (ohaus fd6). Las mediciones se empezaron a tomar a partir de agosto del año 2022 a junio de 2023 todos los días a las 8:00 AM. Obteniendo la evapotranspiración diaria mediante pesada.

Dichos lisímetros fueron elaborados en el departamento de Riego y Drenaje en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro campus Saltillo.



Figura 7. mini lisímetros de PVC; para medir la tasa de evapotranspiración diaria del pasto (por diferencia de peso de los mini lisímetros)

La tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se obtuvo con la siguiente ecuación (Allen *et al.*, 2006; Zermeño-González *et al.* 2017):

$$LE_{ref} = \frac{S \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{(\Delta e)}{r_a} \cdot (f)}{S + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Donde LE_{ref} es el calor latente de referencia (MJ m⁻² d⁻¹), S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación contra la temperatura correspondiente a la temperatura del aire (kPa K⁻¹), R_n es la radiación neta sobre la superficie de referencia (MJ m⁻² d⁻¹), G es el flujo de calor en la superficie del suelo (MJ m⁻² d⁻¹) que se estima como el 10% de la R_n, ρ_a es la densidad del aire (kg m⁻³), C_p es la capacidad calorífica del aire (J kg⁻¹ K⁻¹) Δe es el déficit de vapor del aire (kPa), γ es la constante psicrométrica de la localidad (kPa K⁻¹), r_a es la resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor (s m⁻¹), r_s es la resistencia del dosel al flujo de vapor de agua (s m⁻¹) el factor f (8.64e4) es para la transformación de unidades de s m⁻¹ a s d⁻¹. La constante psicrométrica de la localidad se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{P_b \cdot C_p}{L \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

Donde P_b es la presión barométrica del sitio (kPa), L es el calor de vaporización del agua (MJ kg⁻¹) y ε es la relación entre el peso molecular del vapor de agua y el aire seco. (0.622). Para la superficie de referencia que corresponde a una extensa área de vegetación de una altura de 12 cm de cobertura total de la superficie sin déficit de agua en el suelo, la resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua se obtiene con la siguiente ecuación:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (3)$$

Donde u_2 es la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para la misma superficie vegetal la resistencia del dosel corresponde a 70 s m^{-1} . La densidad del aire de la localidad se puede obtener con la ecuación:

$$\rho_a = \frac{3.848 \cdot (P_b - e_a)}{T_a} \quad (4)$$

Donde P_b es la presión barométrica de la localidad (kPa), e_a es la presión actual del vapor de agua (kPa), y T_a es la temperatura del aire (K). En las estaciones de observaciones meteorológicas, la radiación neta (R_n) sobre la superficie de referencia se estima a partir de mediciones de la radiación solar incidente, la radiación extraterrestre y la radiación de onda larga emitida por la superficie de referencia que son función de la latitud y altitud del lugar y del día del año, de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (5)$$

Donde R_{ns} es la radiación de onda corta absorbida por la superficie de referencia (MJ m^{-2}) y R_{nl} es la radiación de onda larga emitida por la misma superficie. R_{ns} se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_{ns} = (1 - \alpha_s) \cdot R_{sw} \quad (6)$$

Donde α_s es el índice de reflectividad de la superficie de referencia a la radiación solar incidente (R_{sw}).

La igualdad o diferencia de la tasa diaria de ET_{ref} diaria a través de los diferentes meses del año, obtenida con datos estimados de radiación neta (R_n) y flujo de calor en el suelo (G) y de la ET_{ref} con datos medidos de R_n y G , se evaluó con la prueba de Welch ($\alpha \leq 0.05$) para poblaciones de datos con distribución normal o la de Wilcoxon ($\alpha \leq 0.05$) para condiciones de no normalidad de los datos. También se realizaron comparaciones entre la tasa de ET_{ref} y la tasa de evapotranspiración del pasto (medida con los mini lisímetros)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Radiación neta y flujo de calor en el suelo medidos y estimados

La radiación neta (R_n) promedio diaria de cada mes que se midió (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN, Netherlands) fue mayor que la estimada (en función de la radiación solar medida y la radiación atmosférica estimada con datos geográficos de la localidad), para todos los meses evaluados a excepción de agosto de 2022 y de septiembre de 2023 que son los meses de mayor lluvia de la localidad donde se realizó el estudio. Octubre fue el mes de mayor diferencia entre la R_n medida y la R_n estimada en ambos años de evaluación. En octubre de 2022 fue 21.25 % mayor y en octubre de 2023 42.05 % mayor (Cuadro 1). En promedio la R_n medida promedio diaria de cada mes fue 15.76 % mayor que la R_n estimada en todos los meses evaluados del 2022 y 2023. Este resultado implica que la tasa de evapotranspiración de referencia FAO Penman-Monteith podría ser mayor con la radiación neta medida sobre la superficie de referencia, que con la R_n estimada (FAO-56).

El estudio realizado por Carmona *et al.* (2017) también encontró que la R_n promedio medida con un Net Radiometer (CNR-1, Keep and Zonen) fue en promedio 15 % mayor que la R_n estimada (método FAO-56). En otro estudio, Gavilán *et al.* (2007) mostraron que la radiación neta medida con un Net Radiometer REBS Q7.1 fue 7 % mayor que la R_n estimada (método FAO-56). Similarmente, el estudio de Temesgen *et al.* (2007) demostró que la R_n promedio obtenida con un Net Radiometer (CNR-1, Keep and Zonen) es 8 % mayor que la estimada con el métodos FAO-56. Estos estudios indican que la R_n que se obtiene con mediciones utilizando Net Radiometers es mayor que la obtenida con estimaciones de R_n de acuerdo al método FAO-56. Nuevamente, estos resultados sugieren que la tasa de evapotranspiración de referencia determinada con mediciones de radiación neta puede ser mayor que la obtenida con las estimaciones de la R_n (método FAO-56)

En las estaciones de observaciones meteorológica generalmente no se tienen datos de flujo de calor en la superficie del suelo (G), ya que esto implica medición de flujo de calor a una determinada profundidad (sensor de transductor de flujo de

calor) y mediciones de temperatura del suelo a diferentes profundidades. Sin embargo, los datos de flujo de calor en la superficie del suelo, que se estiman como el 10 % de la R_n diaria, pueden ser muy diferentes a los valores de G obtenidos con mediciones dentro de la estación. Los resultados de este estudio mostraron que, el flujo de calor en la superficie del suelo (promedio diario de cada mes) medido con el transductor de flujo de calor (HFP01) y el termopar de cuatro puntas, fue menor que el estimado como el 10 % de la radiación neta estimada (FAO-56) para todos los meses de 2022 y 2023 evaluados. En promedio, para todos los meses evaluados de 2022 y 2023 el flujo de calor en la superficie del suelo (promedio diario de cada mes) medido fue 0.605 MJ m^{-2} y el estimado 0.965 MJ m^{-2} . Esta diferencia expresada en porcentaje muestra que el flujo de calor en la superficie del suelo estimado fue 59.50 % mayor que el medido. Aunque, el flujo de calor en la superficie del suelo es mucho menor que la radiación neta, el valor menor del flujo de calor medido puede resultar en una mayor tasa de evapotranspiración de referencia que la obtenida con método FAO-56. El estudio de Gavilán *et al.* (2007) mostró que el flujo de calor en la superficie del suelo estimado fue hasta 33 % mayor que el que se obtiene con mediciones directas.

Cuadro 1. Radiación neta (Rn) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) medidos y estimados (valor integrado promedio diario de cada mes), y las diferencias (Dif) entre lo medido y lo estimado (%). Valores obtenidos con los datos de la estación de observaciones meteorológicas.

| Año, mes | Rn medida (MJ m ⁻²) | Rn estimada (MJ m ⁻²) | Dif (%) | G medido (MJ m ⁻²) | G estimado (Mj m ⁻²) | Dif (%) |
|----------------|---------------------------------------|---|------------|--------------------------------------|--|------------|
| 2022, junio | 13.34 | 13.06 | 2.10 | 1.06 | 1.31 | -23.58 |
| 2022, julio | 13.26 | 12.67 | 4.44 | 0.94 | 1.27 | -35.11 |
| 2022, ago | 11.40 | 11.54 | -1.23 | 0.80 | 1.15 | -43.75 |
| 2022, sept | 10.51 | 10.13 | 3.62 | 0.50 | 1.01 | -102 |
| 2022, oct | 9.60 | 7.56 | 21.25 | 0.43 | 0.76 | -76.74 |
| 2022, nov | 7.59 | 6.08 | 19.90 | 0.33 | 0.61 | -84.85 |
| 2022, dic | 6.09 | 4.95 | 18.72 | 0.35 | 0.50 | -42.86 |
| 2023, enero | 6.19 | 5.15 | 16.82 | 0.51 | 0.52 | -1.33 |
| 2023, feb | 7.57 | 6.94 | 8.34 | 0.66 | 0.69 | -5.89 |
| 2023, marzo | 9.82 | 8.62 | 12.20 | 0.67 | 0.86 | -28.68 |
| 2023, abril | 12.81 | 10.89 | 15.02 | 0.73 | 1.09 | -48.26 |
| 2023, mayo | 13.61 | 11.26 | 17.23 | 0.64 | 1.13 | -75.97 |
| 2023, junio | 16.83 | 13.09 | 22.23 | 0.63 | 1.31 | -107.32 |
| 2023, julio | 17.02 | 12.71 | 25.33 | 0.56 | 1.27 | -125.63 |
| 2023, ago | 13.01 | 11.76 | 9.62 | 0.43 | 1.18 | -174.17 |
| 2023, sept | 9.36 | 10.71 | -14.43 | 0.60 | 1.07 | -77.44 |
| 2023, oct | 11.77 | 6.82 | 42.05 | 0.44 | 0.68 | -53.50 |

Para estimar el valor de la radiación neta medida en función de la radiación neta estimada se realizó una regresión lineal entre ambas usando los valores integrados diarios de los meses evaluados de 2022 y 2023 (Figura 1). El ajuste de regresión se realizó con ordenada al origen igual a cero. El alto valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9483$) indica que, con el coeficiente de la ecuación lineal ajustada es posible realizar buenas determinaciones de la radiación neta medida en función de la radiación neta estimada (FAO-56). El valor del coeficiente de regresión de la ecuación (pendiente) (1.1408), revela que, en promedio, la radiación neta medida (diaria) es 14.08 % mayor que la radiación neta estimada (diaria). Por lo que, si se quiere determinar la evapotranspiración de referencia considerando la radiación neta medida (diaria), solo se debe multiplicar la radiación neta estimada (diaria) (FAO-56) por el factor 1.1408.

Resultados similares fueron reportados por Carmona *et al.* (2017), donde la pendiente de la relación entre la R_n medida y la estimada fue de 1.15, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.920. En otra La relación entre la R_n medida (REBS Q7.1 Net Radiometer) y la R_n estimada (manual FAO-56) fue 1.07 con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.93 (Irmak *et al.*, 2010). Mediciones de R_n en cinco localidades de Sur África (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN) y su comparación con la R_n (manual FAO-56) resultó en coeficientes de regresión entre 1.04 y 1.22 con un R^2 entre 0.89 y 0.96 (Myeni, *et al.*, 2020). En resumen, el valor del coeficiente de regresión (pendiente) entre la R_n medida y la estimada (manual FAO-56) obtenido en este estudio (1.1408), está en el rango de los valores reportados por estudios previos.

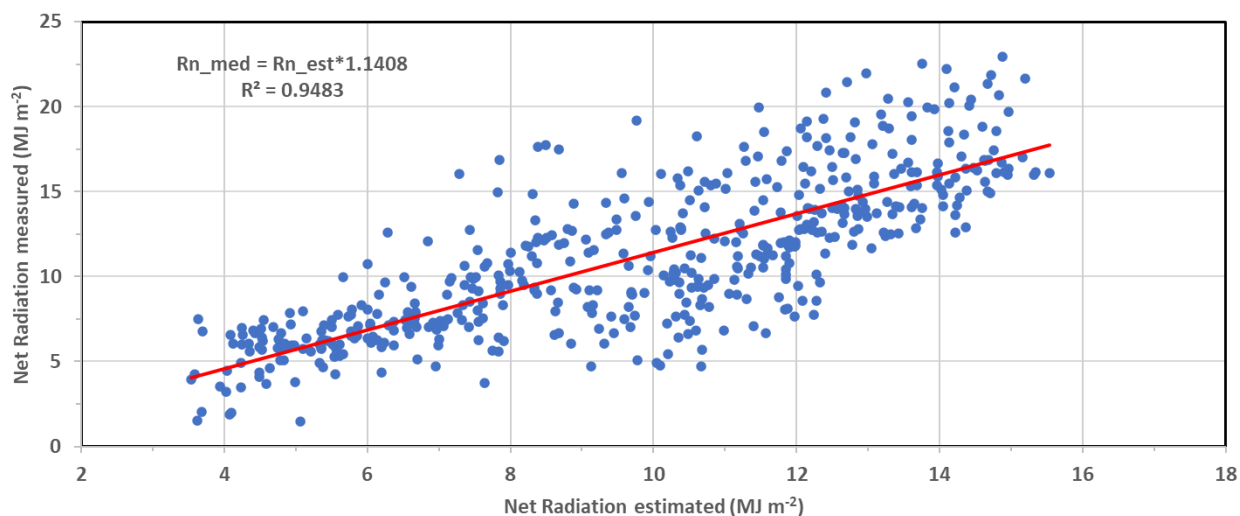


Figura 8. Ajuste de regresión lineal de los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 de la radiación neta estimada (FAO-56) y la radiación neta medida (LITE Net Radiometer; KEEP and ZONEN, Netherlands).

También se realizó una regresión lineal entre el flujo de calor en la superficie del suelo (G) medido y el estimado (diario)(FAO-56), usando los valores integrados diarios de los meses evaluados de 2022 y 2023 (Figura 2). El ajuste de regresión se realizó con ordenada al origen igual a cero (Figura 2). El valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8736$) muestra que, usando el coeficiente de la ecuación lineal ajustada se puede determinar con razonable precisión el flujo de calor en la superficie del suelo medido (en base diaria), a partir del flujo de calor en la superficie del suelo estimado (FAO-56).

El valor del coeficiente de regresión (pendiente) de la ecuación (0.634), indica que, en promedio, el flujo de calor en la superficie del suelo (base diaria) es 36.6 % menor que el flujo de calor del suelo estimado. Por lo que, para determinar el flujo de calor medido a partir del flujo de calor estimado, solo se requiere multiplicar el flujo de calor del suelo medido (FAO-56) por el factor 0.634. Nuevamente, el valor menor del flujo de calor en la superficie del suelo puede resultar en una tasa mayor de evapotranspiración de referencia que la obtenida con el método FAO-56 (ya que en la ecuación Penman-Monteith, al valor de R_n se le resta el valor de G).

El coeficiente de determinación entre los valores del flujo de calor en el suelo medido y estimado del estudio de Gavilán *et al.* (2007) fue de hasta 0.75, con un coeficiente de regresión (pendiente) de 0.840.

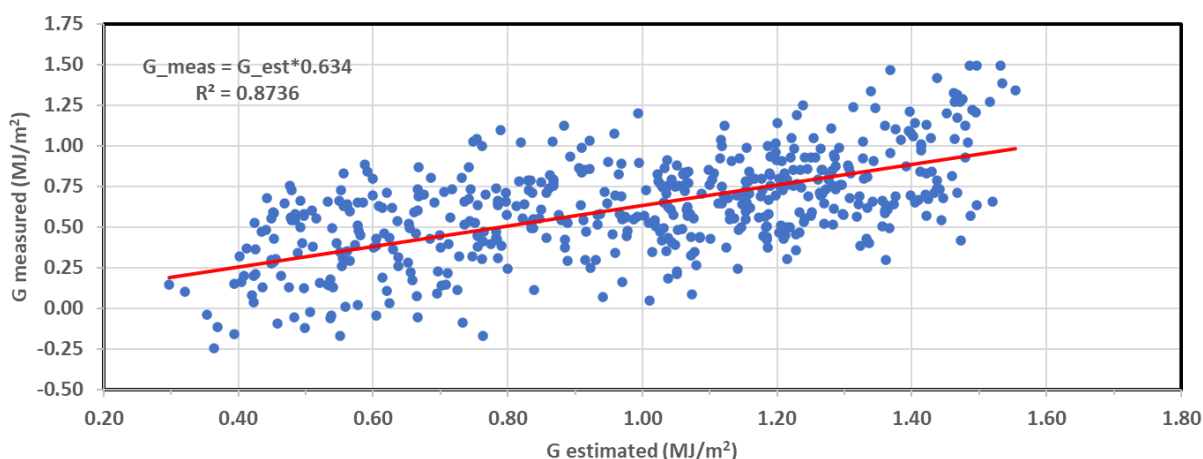


Figura 9. Ajuste de regresión lineal de los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 del flujo de calor estimado (FAO-56) y el flujo de calor medido (Transductor de flujo de calor y termopar de cuatro puntas).

Evapotranspiración de referencia medida y estimada

La evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) medida con mediciones directas de radiación neta (R_n) y flujo de calor en la superficie del suelo (G) fue mayor que la ET_{ref} estimada con base a determinaciones de R_n y G (manual FAO-56) (Cuadro 2) para todos los meses evaluados del 2022 y el 2023. Solo en septiembre de 2023 la ET_{ref} medida fue menor que ET_{ref} estimada, debido a una menor radiación neta en dicho mes. Los valores mayores de ET_{ref} medidos y estimados se observaron en junio y julio del 2022 y 2023, donde la ET_{ref} medida fue en promedio 30.45 mm mayor que la ET_{ref} estimada (Cuadro 2), que para una tasa de evapotranspiración promedio diaria de 5 mm correspondería a seis días. Si se tiene un cultivo de cobertura total y se quieren programar los riegos con base a la ET_{ref}, al usar la ET_{ref} estimada (Manual FAO-56) se tendría un retardo de seis días en la aplicación del riego. En promedio, para todos los meses evaluados ET_{ref} medida fue 24.51 % mayor que ET_{ref} estimada (Cuadro 2). La diferencia mayor se observó en octubre

de 2023, que se debió a una mayor diferencia de la R_n medida respecto a la R_n estimada (Cuadro 1). Estudios realizados en una zona de clima mediterráneo de Turquía mostraron que la ET_{ref} medida fue 10 % mayor que la ET_{ref} estimada (Kuzucu y Tas, 2024), este resultado fue menor al que se obtuvo en este estudio (24.51 %).

El estudio de Gavilán y Castillo-Llanque (2009) en Córdoba, España indicó que la ET_{ref} medida es 9 % mayor que ET_{ref} estimada (Manual FAO-56), también menor que el observado en este estudio. Sin embargo, mediciones realizadas por Chen y Robinson (2009) en 19 puntos de cinco regiones de Carolina del Norte, USA mostraron que la ET_{ref} medida fue 21 % mayor que la ET_{ref} estimada. Este resultado es más parecido al observado en este estudio (24.51 %).

Cuadro 2. Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) mensual (mm), medida (con mediciones directa de radiación neta y flujo de calor en el suelo), y la ET_{ref} estimada (con base al método FAO-56), de cada mes en que se realizaron mediciones del año 2022 y 2023.

| Año, mes | ET _{ref} medida (mm) | ET _{ref} estimada (mm) | % diferencia medida – estimada |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 2022, junio | 148.59 | 135.90 | 9.34 |
| 2022, julio | 149.36 | 140.38 | 6.39 |
| 2022, ago | 122.37 | 119.53 | 2.37 |
| 2022, sept | 98.64 | 83.26 | 18.48 |
| 2022, oct | 93.83 | 76.60 | 22.48 |
| 2022, nov | 81.08 | 52.70 | 53.84 |
| 2022, dic | 75.12 | 48.79 | 53.98 |
| 2023, enero | 83.77 | 69.40 | 20.70 |
| 2023, feb | 89.37 | 71.89 | 24.31 |
| 2023, marzo | 121.13 | 113.75 | 6.49 |
| 2023, abril | 134.34 | 100.72 | 33.39 |
| 2023, mayo | 144.45 | 137.20 | 5.28 |
| 2023, junio | 196.64 | 149.46 | 31.57 |
| 2023, julio | 182.03 | 129.02 | 41.09 |
| 2023, ago | 148.64 | 128.48 | 15.69 |
| 2023, sept | 113.58 | 120.46 | -5.71 |
| 2023, oct | 110.68 | 62.53 | 77.01 |

La tasa diaria de ET_{ref}, medida (con mediciones de R_n con un net radiometer y mediciones de flujo de calor en la superficie del suelo) también fue mayor que la tasa diaria de ET_{ref} estimada (Procedimiento FAO-56), de los meses evaluados del 2022 y el 2023 (Figura 3). El coeficiente de la función lineal de regresión (pendiente) fue 1.1763 con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9608 (Figura 3), por lo que, para obtener el valor de la tasa diaria de ET_{ref} medida, se debe multiplicar el

valor de la ET_{ref} estimada (FAO-56) por dicho coeficiente. Esto también significa que la ET_{ref} promedio diaria medida fue 17.73 % mayor que la estimada (Procedimiento FAO-56). Este resultado implica que, al programar la irrigación de un cultivo con base a la ET_{ref} estimada, esta se debe multiplicar por el factor 1.1763 para determinar los riegos por aplicar, de otra forma se tendría un déficit de riego del 17.63 %.

Otros estudios también han reportados valores de ET_{ref} medida mayores que la ET_{ref} estimada (manual FAO-56). Por ejemplo, Da Cunha et al. (2014) reportaron que la ET_{ref} medida (midiendo la R_n con un LITE KEEP and ZONEN Net Radiometer) fue 24.4 % mayor que la ET_{ref} estimada. Similarmente, otros estudios previos han observado valores de 6 % a 29 % de ET_{ref} medida (midiendo R_n con Net Radiometers) mayores que los obtenidos con estimaciones de la ET_{ref} (manual FAO-56) (Tagliaferre et al., 2010; Turco et al., 2005; Oliveira et al., 2001). Para obtener la ET_{ref} medida y su comparación con la ET_{ref} estimada (procedimiento FAO-56), Tagliaferre et al. (2010) recomiendan que R_n se mida con un LITE KEEP and ZONEN Net Radiometer; mientras que, Cunha et al. (2008) recomiendan el uso del Q-7.1 REBS net radiometer o el LITE KEEP and ZONEN Net Radiometer.

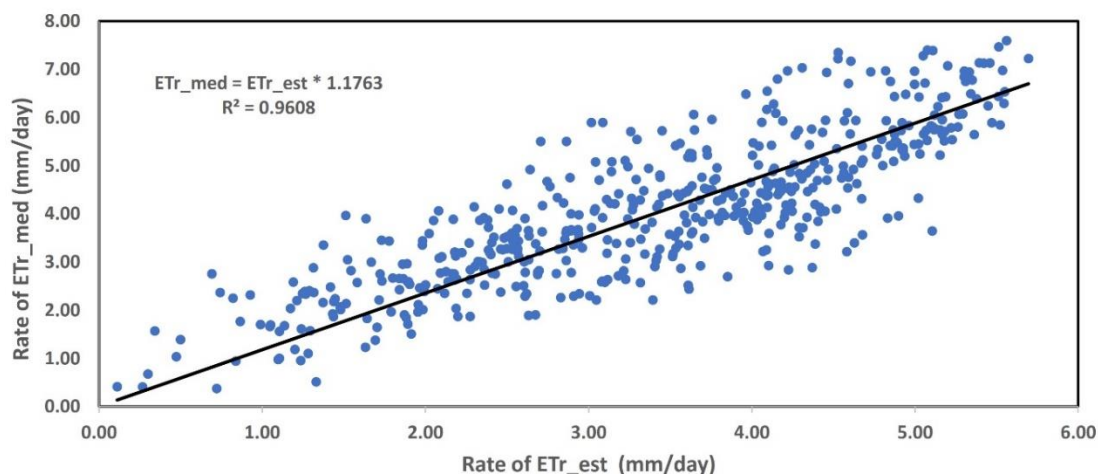


Figura 10. Ajuste de regresión lineal entre los datos diarios del junio de 2022 a octubre de 2023 de la tasa diaria de evapotranspiración de referencia estimada (ET_{ref}_est) (método FAO-56) y la medida (ET_{ref}_med) (con mediciones de radiación neta y flujo de calor en el suelo).

Para los datos generados de junio de 2022 a octubre de 2023, la comparación de la tasa diaria de ETref medida (midiendo Rn con un Net radiometer) con la ETref estimada (Manual FAO-56) muestra que la tendencia de ETref medida se mantiene sobre la de ETref estimada (Figura 4). La prueba de Wilcoxon ($p = 2.2e-16$) indica que la media de la serie de tiempo correspondientes a la ETref medida (3.96 mm) fue estadísticamente mayor que la de ETref estimada (3.25 mm)

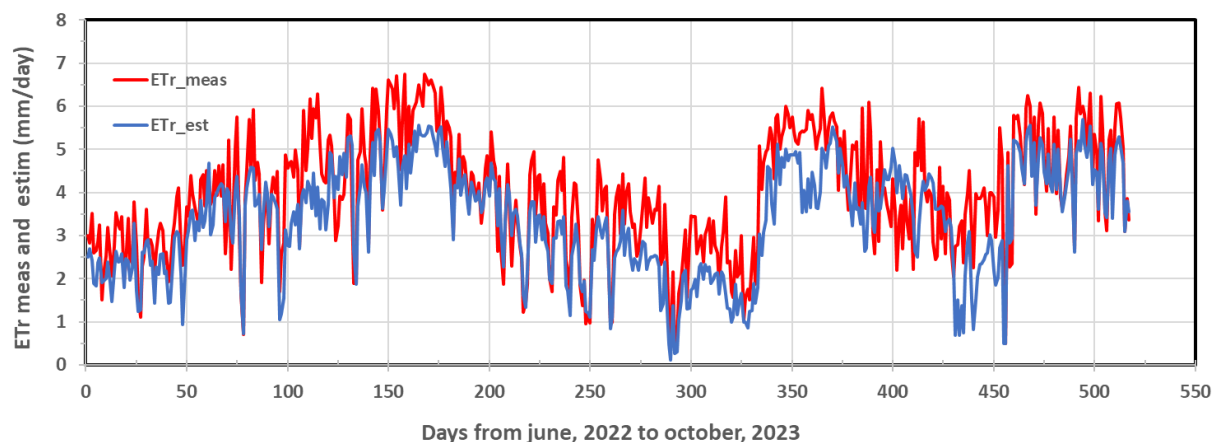


Figura 11. Tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ETref) medida y estimada con los datos de la estación de observaciones meteorológicas de junio de 2022 a octubre de 2023.

Tasa de evapotranspiración del pasto y la ET de referencia

En localidades donde no se cuenta con una estación de observaciones meteorológicas, la evapotranspiración de referencia (FAO-56) se podría estimar con base a mediciones de la evapotranspiración de un pasto u otra superficie vegetal de cobertura total del suelo, de porte bajo y sin limitaciones de humedad del suelo. En la Figura 5 se muestra la relación entre la tasa de evapotranspiración diaria del pasto de la estación de observaciones meteorológicas (promedio de seis micro lisímetros de pesada) y la evapotranspiración de referencia (FAO-56) para los mismos días. El ajuste de regresión muestra que la tasa de evapotranspiración de referencia (FAO-56) se puede estimar multiplicando la tasa de evapotranspiración del pasto por el factor 0.8219. Esto también significa que la tasa de evapotranspiración del pasto es 17.81 % mayor que la evapotranspiración de referencia (FAO-56). Esta relación

se puede usar para la programación de la irrigación de cultivos con base a la tasa de evapotranspiración de referencia en regiones que no tienen una estación de observaciones meteorológicas, pero es posible implementar mediciones de evapotranspiración de una superficie vegetal de cobertura total del suelo, de porte pequeño y sin déficit de agua en el suelo. Estudios previos también han mostrado que la evapotranspiración medida en lisímetros es mayor que la ET de referencia (manual FAO-56). El estudio de Diop *et al.* (2015) mostró que la tasa de evapotranspiración obtenida con lisímetros de pesada de un pasto (*Medicago sativa* L.) y de alfalfa (*Medicago sativa*) fueron de 12.5 a 21 % mayores que la ET de referencia (manual FAO-56). Lui *et al.* (2017) observaron que la ET de referencia fue hasta 0.79 mm/día menor que la observada con mediciones de lisímetros en pasto *Festuca arundinacea* Schreb. El coeficiente de regresión (pendiente) entre la tasa de evapotranspiración de un cultivo de alfalfa (como superficie de referencia) y la evapotranspiración de referencia (manual FAO-56) fue 0.910, valor ligeramente mayor al observado en este estudio (0.8219) (Kiraga, *et al.*, 2024).

En zonas de clima semiárido con altas velocidades del viento, los valores mayores de la tasa de transpiración realizadas en lisímetros (con cultivos de referencia) respecto a la tasa de evapotranspiración de referencia (manual FAO-56) se pueden atribuir al transporte por advección de masas de aire de alto déficit de presión de vapor de los alrededores hacia la superficie de los lisímetros (Tolk *et al.*, 2006; Evett *et al.*, 2012).

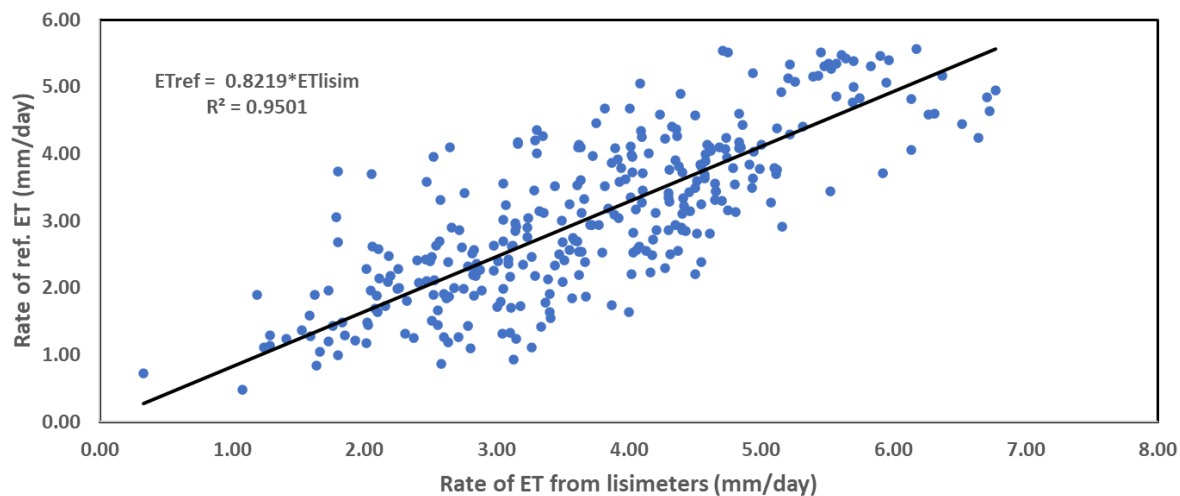


Figura 12. Ajuste de regresión entre la tasa diaria de evapotranspiración del pasto de la estación de observaciones meteorológicas (promedio de seis micro lisímetros) y la tasa de evapotranspiración de referencia (FAO-56).

CONCLUSIONES

La tasa de evapotranspiración de referencia diaria (ET_{ref}) que se obtuvo con mediciones de radiación neta (usando un Net Radiometer) y de flujo de calor en el suelo fue mayor (17.63 %) que la que se determina con el método FAO-56. Esto debido a que la radiación neta (R_n) que se midió (con un Net Radiometer) fue mayor (14.08 %) que la R_n estimada (método FAO-56). Además de que, el flujo de calor en la superficie del suelo que se obtuvo con mediciones (transductor de calor y temperatura del suelo) fue menor (36.6 %) que la obtenida como el 10 % de la R_n . Para localidades donde no se cuenta con una estación de observaciones meteorológicas, la tasa de ET_{ref} (FAO-56) se puede obtener a partir de mediciones de Evapotranspiración de un pasto o cualquier superficie vegetal de cobertura total, porte pequeño y sin limitaciones de humedad del suelo, multiplicadas por el factor 0.8219.

REFERENCIAS

- Abeyasiriwardana, H.D.; Muttill, N. Rathnayake, U. A. (2022) Comparative Study of Potential Evapotranspiration Estimation by Three Methods with FAO Penman–Monteith Method across Sri Lanka. *Hydrology*, 9, 206.
<https://doi.org/10.3390/hydrology9110206>
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome (1998)
- Allen, R., Foken, T., Kilic, A., Trezza, R., Ortega-Farias, S. (2021). Evapotranspiration Measurements and Calculations. In: Foken, T. (eds) *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Handbooks. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-52171-4_57
- ASCE-EWRI 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. R.G. Allen, I.A. Walter, R.L. Elliot, al. et (Eds.), *Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Final Report, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, VA 213 pp*
- Awada, H.; Di Prima, S.; Sirca, C.; Giadrossich, F.; Marras, S.; Spano, D.; Pirastru, M. Daily Actual Evapotranspiration Estimation in a Mediterranean Ecosystem from Landsat Observations Using SEBAL Approach. *Forests* 2021, 12, 189.
<https://doi.org/10.3390/f12020189>
- Bambach, N., Kustas, W., Alfieri, J.G., Prueger, J.H., Hipps, L.E., McKee, L., Castro, S., Volk, J.A., Alsina, M.M., McElrone, A.J.(2022). Evapotranspiration uncertainty at micrometeorological scales: the impact of the eddy covariance energy imbalance and correction methods. *Irrig Sci* 40, 445–461.
<https://doi.org/10.1007/s00271-022-00783-1>
- Benli, B., S. Kodal, A. Ilbeyi, H. Ustun. 2006. Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter *Agric. Water Manage.*, 81: 358-370.
- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.*, 27: 779-787.

Chittolina, M., Souza, R., Anselmo, E.E & Rocha, H. (2022) Hydrological response of a headwater catchment in southeastern Brazil Part II: Estimate of evapotranspiration with micrometeorological and water budget methods. Authorea. DOI: 10.22541/au.164614539.98829547/v1.

Dani, O., Florida, Museum, of, Natural, History. (2022). Estimating global scale evapotranspiration using soil-based evaporation characteristic length and root zone depth distribution. doi:10.5194/egusphere-egu22-4269.

Djaman, K., Irmak. S., Rathje, W.R., Martin, D.L., Eisenhauer, D.E.(2013). Maize evapotranspiration, yield production function, biomass, grain yield, harvest index, and yield response factors under full and limited irrigation. Trans. ASABE56(2): 273-293.

Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977) Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 24. FAO, Rome, Italy.

Dong, Y., & Hansen, H. (2023). Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. *Smart Agricultural Technology*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100147>

Ezenne, G.I., Nkpouto U. Eyibio, Jane L. Tanner, Felix U. Asoiro and Sunday E. Obalum (2023). An overview of uncertainties in evapotranspiration estimation techniques. *Journal of Agrometeorology*. 25, 1 (Feb. 2023), 173–182. <https://doi.org/10.54386/jam.v25i1.2014>

Faramiñán, A.M.G., Carmona, F., Rivas, R.E., Degano, M. F & Abadie, P.A. (2021). Monitoreo de la evapotranspiración real horaria por medio del balance energético y un lisímetro de pesada, Instituto Geológico y Minero de España; Boletín Geológico y Minero; 132; 1-2; 1-2021; 47-56

Fenner, William; Dallacort, Rivanildo; Faria Junior, Cleonir A.; Freitas, Paulo S. L. de; Queiroz, Tadeu M. de; Santi, Adalberto (2019). Development, calibration and validation of weighing lysimeters for measurement of evapotranspiration of crops. SciELO journals. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7974914.v1>

García, M., Puppo, L., Hayashi, R., y Morales, P. (2012). Metodología para determinar los parámetros de un suelo a campo. Grupo del desarrollo de Riego. Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas/Avda. E. Garzón 780, 12900 Montevideo/ mgarciap@fagro.edu.uy

Herrera-Puebla, Julián et al. (2020). Determinación del coeficiente de cultivo para la estimación de la evapotranspiración del arroz en Cuba. *Rev Cie Téc Agr* . vol.29, n.3, pp.5-20. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542020000300005&lng=es&nrm=iso Epub 01-Sep-2020. ISSN 2071-0054

Intrigliolo, D. S., A. N. Lakso, and R. M. Piccioni. (2009). Grapevine cv. "Riesling" water use in the northeastern United States. *Irrig. Sci.* 27: 253-262.

Irmak, S., A. Irmak, R.G. Allen, J.W. Jones. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 129 (5) (2003): 336-347.

Irmak, S., A. Irmak, T.A. Howell, D.L. Martin, J.O. Payero, K.S. (2008). Copeland Variability analyses of alfalfa-reference to grass-reference evapotranspiration ratios in growing and dormant seasons *J. Irrig. Drain. Eng., ASCE*, 134 (2): 147-159.

Jian-hua, S. (2005). Research progress on surveying and calculation of evapotranspiration of plants and its prospects. *Advances in Water Science*.

Jin, X.; Guo, R.; Xia, W. Distribution of Actual Evapotranspiration over Qaidam Basin, an Arid Area in China. *Remote Sens.* (2013), 5, 6976-6996. <https://doi.org/10.3390/rs5126976>

Kadam, S.A., Gorantiwar, S.D., Mandre, N.P. et al. (2021). Crop Coefficient for Potato Crop Evapotranspiration Estimation by Field Water Balance Method in Semi-Arid Region, Maharashtra, India. *Potato Res.* 64, 421–433 <https://doi.org/10.1007/s11540-020-09484-8>

- Kabenge, I., S. Irmak, G.E. Meyer, J.E. Gilley, S. Knezevic, T.J. Arkebauer, D. Woodward, M. Moravek (2013). Evapotranspiration and surface energy balance of a common reed-dominated riparian system in the Platte River Basin, central Nebraska, USA Trans. ASABE, 56 (1): 135-153.
- Kelso Bucio, Henry-Arturo, Khalidou-Mamadou, Bâ, Sánchez Morales, Saúl, & Reyes López, Delfino. (2012). Automatización de un lisímetro de pesada. Revista mexicana de ciencias agrícolas, Texcoco , v. 3, n. spe4, p. 807-811. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900025&lng=es&tlng=es.
- Koç DL, Erkan Can M. (2023). Reference evapotranspiration estimate with missing climatic data and multiple linear regression models. PeerJ 11:e15252 <https://doi.org/10.7717/peerj.15252>
- Küçüktopcu, E.; Cemek, E.; Cemek, B.; Simsek, H. (2023). Hybrid Statistical and Machine Learning Methods for Daily Evapotranspiration Modeling. Sustainability, 15, 5689. <https://doi.org/10.3390/su15075689>
- León, Juan & Parra, Vicente & Peña, Robinson & Silva, Juan & Román, Daniel & Salazar, Francisco. (2022). Design, installation and calibration of a block of lysimeters to adjust the crop coefficient. Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia. 39. e223926. 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n2.04.
- López-Urrea, R., Sánchez, J. M., de la Cruz, F., González-Piqueras, J., & Chávez, J. L. (2020). 25 Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-26 irrigated canola. Agricultural Water Management, 239, 106260. 27 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106260>
- Liang-De, Z., Qiang, Z., Hongli, Z., Ping, Y., Hongyu, L., Juanli, W., Fu-nian, Z., Yong, Qiang, W., Jianshun, W. (2022). Environmental factors driving evapotranspiration over a grassland in a transitional climate zone in China. Meteorological Applications, 29(3) doi: 10.1002/met.2066
- Martinez, C.J., M. Thepadia. (2010). Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida, USA J. Irrig. Drain. Eng., 136 (7): 494-501.
- Meissner, R; Rupp, H; Haselow, L. (2020). Use of lysimeters for monitoring soil water balance parameters and nutrient leaching. Climate Change and Soil Interactions. pp.171-205. DOI:10.1016/B978-0-12-818032-7.00007-2.

- Mehta, R y Pandey, V. (2014). Reference evapotranspiration (ET_o) and crop water requirement (ET_c) of wheat and maize in Gujarat. *Journal of Agrometeorology*, 17(1):107-113.
- Miranda, F.R., R.S. Gondim, C.A.G. Costa. (2006). Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.) *Agric. Water Manage.*, 82 (1–2): 237-246.
- Moorhead, J.E.; Marek, G.W.; Gowda, P.H.; Lin, X.; Colaizzi, P.D.; Evett, S.R.; Kutikoff, S. (2019). Evaluation of Evapotranspiration from Eddy Covariance Using Large Weighing Lysimeters. *Agronomy*, 9, 99. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020099>
- Moratiel, R., and A. Martínez-Cob. (2012). Evapotranspiration of grapevine trained to a gable trellis system under netting and black plastic mulching. *Irrig. Sci.* 30: 167-178.
- Mossie, T., Peres, D.J., Gullotta, A., Sciuto, G., Cancelliere, A. (2023). Trend Analysis and Identification of the Meteorological Factors Influencing Reference Evapotranspiration. *Water*, 15(3):470-470. doi: 10.3390/w15030470
- Neves, V,H., Gasparotto, L., Rossales, W., Vinícius, M., Marin F,R. (2023). Evapotranspiração da cana-de-açúcar mensurada em lisímetro de pesagem eletrônico de grande porte. *Agrometeoros*, 31 doi: 10.31062/agrom.v31.e027046.
- Novák, V. (2012). Methods of Evapotranspiration Estimation. In: *Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System. Progress in Soil Science.* Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3840-9_9.
- Novick, K., R. Oren, P. Stoy, J.Y. Juang, M. Siqueira, G. Katul. (2009). The relationship between reference canopy conductance and simplified hydraulic architecture *Adv. Wat. Resour.*, 32: 809-819.
- Observatorio de Igueldo. (2006). Tanque evaporímetro. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/11422>

- Ogidan OK, Oluwagbayide SD and Ale TO (2023). A Microcontroller-Based Irrigation Scheduling Using FAO Penman-Monteith Equation. Turkish Journal of Agricultural Engineering Research (TURKAGER), 4(1): 15-25. <https://doi.org/10.46592/turkager.1170630>
- Ortiz, R. Tamayo, Ch. Chile, M. & Méndez, A. (2018). Coeficiente del tanque evaporímetro Clase A para estimar la evapotranspiración de referencia para el valle de Tumbaco. Siembra, 5(1), 16-25. <https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1424>
- Ouédraogo, A. A., Berthier, E., & Gromaire, M.-C.(2022).Evapotranspiration in urban stormwater planter boxes: A study of eight lysimeters under temperate climate, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7672, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7672>
- Pinos, J. (2022). “Estimation methods to define reference evapotranspiration: A comparative perspective.” Water Pract. Technol. 17 (4): 940–948. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.028>
- Pivec, J y Brant V. (2018) The actual consumption of water by selected cultivated and weed species of plants and the actual values of evapotranspiration of the stands as determined under field conditions. Soil and Water Research, 4 doi: 10.17221/476-SWR
- Pütz, T & Groh, J., (2023) Lysimetry, Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition), Elsevier, Pages 379–386, ISBN 9780123485304, <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00391-X>.
- Qiu, Wen, C., Meiwei, L., Jin-Lin, L., Guoqing, L., Kyoichi, O., Norikazu, Y., Sheng, D. (2022). Characterization of dominant factors on evapotranspiration with seasonal soil water changes in two adjacent forests in the semiarid Loess Plateau. Journal of hydrology, 613:128427-128427. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128427
- Quille Mamani, J.A., Ramos-Fernández, L. & Ontiveros-Capurata, R. E.. (2021). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de arroz en Perú mediante el algoritmo METRIC e imágenes VANT/Estimation of rice crop evapotranspiration in Perú based on the METRIC algorithm and UAV images. Revista de Teledeteccion. 58. 23-38. 10.4995/raet.2021.13699.

- Ramachandran, J., Lalitha, R., Vallal Kannan S & Sivasubramanian, K. (2023). Investigation of Valiantzas' Simplified forms of FAO56 Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Models in a semi-arid region. *Mausam*, 74(3):815-824. doi: 10.54302/mausam.v74i3.931
- Riessbaum, F., Fratini, G., Gerot, K., McCoy, J., Miller, B., Walbridge, R., Frodyma, A., Fuhrman, I., Parr, A., Trutna, D., and Burba, G. (2023): Prospects of Direct Evapotranspiration Measurements for the Immediate Societal benefits, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, Apr 2023, EGU23-955, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-955>
- Rocha A,E., Souza J, L., Bastos, G., Araujo, R., Bastos, G., Endres, L., Chagas, M. (2019). Micrometeorological methods to estimate sugarcane evapotranspiration in coastal northeastern region of Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, 13(9):1422-1428. doi: 10.21475/ajcs.19.13.09.p1257.
- Saha AK, Boughton EH, Li H, Sonniér G, Gomez-Casanovas N, McMillan N, Zhang X. (2022). Evapotranspiration in a subtropical wetland savanna using low-cost Lysimeter, Eddy Covariance and Modeling approaches. *Ecohydrology*;15(8):e 2475. <https://doi.org/10.1002/eco.2475>
- SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. I. . (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista De Geografía Norte Grande*, (28), 3–10. <https://www.revistadisena.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/46563>
- Şaylan, L., Özkoca Y., Çaldağ, B., & Bakanoğulları, F., (2018). Comparison of Micrometeorological Methods used for the Determination of Actual Evapotranspiration. 4(1):13-22. Doi:10.26558/ijcst.392854
- Scott, R.L. (2010). Using watershed water balance to evaluate the accuracy of eddy covariance evaporation measurements for three semiarid ecosystems *Agric. For. Meteorol.*, 150: 219-225.
- Sobrinho, O. P. L., Júnior, W. L. C., dos Santos, L. N. S., da Silva, G. S., Pereira, Á. I. S., & Tavares, G. G. (2020). Empirical methods for reference evapotranspiration estimation. *Scientia Agraria Paranaensis*, 203-210. DOI: <https://doi.org/10.18188/sap.v19i3.21487>

- Sun, Z.G., Q.X. Wang, B. Matsushita, T. Fukushima, Z. Ouyang, M. (2008). Waternabe A new method to define the VI-Ts diagram using subpixel information: a case study over a semiarid agricultural region in the North China Plain Sensors, 8: 6260-6279.
- Tabari, H., M. Grismer, S. Trajkovic. (2011). Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions Irrig. Sci., 31 (2): 107-117.
- Tasya, D.A. Nurhayati, N., Danang, G. (2023). Application of the penman-monteith method to determine the crop water requirements. Jurnal Teknik Sipil, Available from: DOI: <http://dx.doi.org/10.26418/jtst.v23i1.59595>
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate Geogr. Revue 38 p.
- Tomar, A.S. (2016). Performance of radiation-based reference evapotranspiration equation developed for Indian sub-humid conditions. J. Agrometeorol., 18(1): 76–82. <https://doi.org/10.54386/jam.v18i1.905>
- TORO-TRUJILLO, A. María et al . Modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá Antioqueño (Colombia). Agrociencia, Texcoco , v. 49, n. 8, p. 821-836, dic. 2015. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000800001
- Trezza, R., Y. Pacheco, Y. Suárez, A. Nuñez, y I. Umbría. (2008). Programación del riego en caña de azúcar en una zona semiárida del estado Lara, Venezuela, utilizando la metodología FAO-56. Bioagro 20: 21-27.
- Vamsi Krishna, G., Jothiprakash, V., & Sivakumar, B.(2022). Prediction of evapotranspiration using a nonlinear local approximation approach, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, EGU22-11467, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11467>
- Vicente, Marcelo & Leite, Caio & Medeiros, Ronaldo & Lucas, Patrícia & Dias, Santos H. & Santos, Juscelina. (2018). EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO O MÉTODO FAO PENMAN-MONTEITH COM DADOS FALTANTES. 11. 217-228.

- Villalobos, F.J., Testi, L., Fereres, E. (2016). The Components of Evapotranspiration. In: Villalobos, F., Fereres, E. (eds) Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_9
- Watson, I., and D. Burnett. 1995. Hydrology: An Environmental Approach, CRC Press, Boca Raton, FL (1995)
- Zermeño-González, A., A. I. Melendes-Alvarez, L. A. Fuerte-Mosqueda, J. P. Munguia-López, L. Ibarra-Jiménez. (2017). Tasas de evapotranspiración del cultivo de la vid y su relación con la de referencias del método FAO-Penman-Monteith. *Agrociencia* 51(1): 1-12.
- Zermeño-González, A., A. Escalante-Pérez, J. A. Gil-Marín, H. Ramírez-Rodríguez, M. Cadena-Zapata, A.I. Melendres-Alvarez, J. Méndez-González. (2023). Determination of the water use efficiency of a pecan nut orchard based on the irrigation scheduling and the evapotranspiration rate in northern Mexico. *The Open Biotechnology Journal* 17:1-9.
- Zhao, M., Aa, G., Liu, &, and Konings, A.(2022) Evapotranspiration frequently increases during droughts, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-6904, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6904>
- Zia, H.; Rehman, A.; Harris, N.R.; Fatima, S.; Khurram, M. (2021). An Experimental Comparison of IoT-Based and Traditional Irrigation Scheduling on a Flood-Irrigated Subtropical Lemon Farm. *Sensors*, 21, 4175. <https://doi.org/10.3390/s21124175>