



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
FACULTAD DE AGRONOMIA E INGENIERIA FORESTAL  
DIRECCION DE INVESTIGACION Y POSTGRADO  
MAGISTER EN RECURSOS NATURALES

APLICACIÓN DE UN MODELO DEL TIPO VAN GENUCHTEN PARA LA  
ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN DE SUELO DESNUDO

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

*Magister* en Recursos Naturales

por:

Felipe Medel Ponce

Comité de Tesis

Profesor Guía: Francisco Meza Dabancens

Profesores Informantes:

Pilar Gil Montenegro

Francisco Suárez Poch

Enero 2021

Santiago-Chile

## Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi agradecimiento al proyecto FONDECYT 1170429 y al proyecto FONDEQUIP EQM 170024 que permitió la realización del presente trabajo.

En segundo lugar, agradezco al profesor Francisco Meza, por permitir que mis estudios de Magister fueran posibles. Agradezco por la confianza depositada durante el periodo en que trabajamos juntos.

Quisiera dar un reconocimiento a Víctor García, por el incondicional apoyo durante este proceso, de igual manera agradecer a Diego Moraga y Daniel Knopp por el apoyo y compañía.

Agradezco de manera especial a mis padres y hermana que son el impulso y motivación para mi desarrollo como profesional, ya que siempre han dado su apoyo y confianza en mí.

*Dedicatoria*

*En memoria de  
Ángel Custodio Ponce Chandia,  
esta va por ti Tata*

# Índice

<b>Abstract</b> .....	5
Introducción.....	6
Materiales y Métodos .....	12
Área de estudio y características del suelo .....	12
Obtención y procesamiento de datos .....	13
Evaporación de suelo .....	13
Estado hídrico del suelo.....	17
Estimación de Evaporación.....	17
Evaporación de suelo desnudo Método FAO .....	19
Resultados .....	20
Evaporación registrada de suelo desnudo .....	20
Registros de potencial hídrico .....	22
Modelo de evaporación de suelo desnudo .....	26
Validación del modelo .....	32
Evaporación de suelo desnudo con Modelo FAO.....	37
Discusión .....	39
Conclusión .....	42
Resumen.....	44
Referencias .....	45

# APLICACIÓN DE UN MODELO DEL TIPO VAN GENUCHTEN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN DE SUELO DESNUDO

Felipe Medel Ponce

Pontificia Universidad Católica de Chile

## Abstract

**Felipe Medel. Application of a van Genuchten type model for the estimation of the evaporation of bare soil.** Tesis, Magíster en Recursos Naturales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 48 pp. Evaporation from bare soils is an important variable for the dynamic of water in the soil-atmosphere continuum. This variable is also of great importance for irrigation management as it determines the amount of water available during the initial stages of crop development. Despite this, evaporation from bare soils has received less attention from researchers compared to evapotranspiration, as the methodologies require specialized equipment and a fairly detailed characterization of the soil. In this work, a method to estimate bare soil evaporation is proposed. This method is based on a modification of van Genuchten's model (1980) applied in a soil with a loamy texture. The van Genuchten's model (1980) has been used to estimate soil moisture and thereby to generate the water retention curve of a soil. The behavior of the water retention curve is expected to be similar to the bare soil evaporation curve (understood here as surfaces with less than 10% vegetation cover). We modified van Genuchten's equation replacing values of saturated soil water content ( $\theta_s$ ) and residual soil water content ( $\theta_r$ ) with values of maximum ( $E_{max}$ ) and minimum ( $E_{min}$ ) bare soil evaporation, respectively. Model parameters ( $\alpha$ ,  $n$  and  $m$ ) determined by optimization using the least squares method. The estimation finally provided a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.82 and a mean square error (RMSE) of  $0.28 \text{ mm day}^{-1}$ . The estimation would allow prediction of bare soil evaporation in summer months from measurements of water potential in a simple and low-cost way.

**Key words:** Evaporation of bare soil, van Genuchten, lysimeters.

## Introducción

La evaporación corresponde al proceso en el cual el agua que se encuentra en estado líquido en una superficie es removida como vapor de agua (FAO, 2006). El agua se puede evaporar desde distintos tipos de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación. Para que el cambio de estado ocurra, se requiere de energía, como por ejemplo la radiación solar directa. Además, la fuerza impulsora para retirar el vapor de agua es la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie y la presión de vapor de la atmósfera.

Cuando se efectúa el cambio de estado desde líquido a vapor de agua, ocurre una saturación de la atmósfera aledaña a la superficie evaporante, reduciendo la tasa de evaporación hasta, eventualmente, detenerse por completo. Por lo tanto, para que este cambio de estado siga ocurriendo es necesario que exista un recambio constante de aire de la atmósfera circundante a la superficie evaporante, es aquí donde la velocidad del viento cumple el rol de intercambiar aire húmedo por aire seco, para así permitir que la evaporación se mantenga activa (FAO, 2006). Por lo tanto, La radiación solar y la velocidad del viento son parámetros climatológicos importantes para considerar al momento de evaluar el proceso de evaporación o en su defecto de evapotranspiración cuando se consideran superficies con cobertura vegetal.

Sin embargo, es importante tener en consideración que la disponibilidad de agua ejerce control sobre la evaporación de un suelo. La literatura evidencia que la evaporación de suelo desnudo presenta una primera etapa que se encuentra limitada por la energía, es decir, la energía recibida por la superficie que permite el cambio del estado del agua líquida, y una segunda etapa que se encuentra limitada por el suelo (FAO, 2006); es aquí donde la cantidad de agua disponible para ser evaporada se convierte en un factor importante a considerar, dado que en ausencia de cualquier fuente de abastecimiento de agua a la superficie del suelo, la evaporación disminuye rápidamente pudiendo cesar casi totalmente en un corto lapso de tiempo. Otros autores precisan que la evaporación

que ocurre en un suelo desnudo, a diferencia de aquella que ocurre en aguas abiertas, es que en la primera la evaporación es constante mientras que en la evaporación que ocurre en suelo desnudo disminuye con el tiempo luego de haber aplicado una lámina de riego, o al agotarse o descender la napa freática (Quinn, Parker, y Rushton, 2018).

Medir la evaporación de suelo desnudo es relevante para conocer y caracterizar el comportamiento de la interacción suelo-clima presente en el área de estudio y entender su efecto sobre la hidrología y la disponibilidad de recursos hídricos. La evaporación de suelo desnudo ha recibido comparativamente menos atención por el mundo científico en comparación con la evapotranspiración, pero en superficies en las que la cobertura vegetal es mínima (menor al 10 %) la evapotranspiración no es un indicador confiable de la cantidad de agua que realmente se está consumiendo en un suelo desnudo (FAO, 2006). Un ejemplo de esta situación se observa en el caso de los estados iniciales de crecimiento de los cultivos.

La estimación de la evaporación ha sido desarrollada principalmente a partir de funciones matemáticas teóricas, pero también hay alternativas de medición directa. En cuanto a las mediciones teóricas, en el año 1948 se formuló la ecuación de Penman (1948), para estimar las tasas de evaporación desde superficies, como por ejemplo cuerpos de agua. En esta ecuación se estipula que la evaporación solo se puede estimar a partir de las condiciones del aire. La ecuación original de Penman (1948) que permite la estimación de la tasa de evaporación se presenta a continuación:

$$E \left( \frac{mm}{día} \right) = \frac{H\Delta + E_a\gamma}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

donde E corresponde a la evaporación (mm/día), H corresponde a la energía radiante neta disponible en la superficie (mm/día),  $\gamma$  (mm Hg °F<sup>-1</sup>), corresponde a la constante de la ecuación del higrómetro de bulbo húmedo y seco equivalente a 0,27,  $E_a$  es el valor de evaporación en mm/día que es obtenido asumiendo que la presión de vapor del aire  $e_a$  es igual a la presión de vapor de saturación  $e_s$ , Finalmente  $\Delta = de_a/dT_a$ , donde

$e_a$  corresponde a la presión de vapor del aire (mm. Hg) y  $T_a$  es la temperatura del aire (°F)

Años más tarde, Slatyer y McLlroy (1961) modificaron la ecuación de Penman (1948), en la cual incorporan la depresión del bulbo húmedo del suelo como factor importante a considerar. Monteith en 1965, estudió las ecuaciones y estableció que éstas no son válidas para superficies donde la presión de vapor es menor que la presión de vapor de saturación de la superficie evaporante. En 1974, Staple modificó la ecuación de Penman (1948) (ver ecuación 2) para proporcionar la condición de límite superior en el cálculo de la evaporación, es decir, la evaporación presenta un momento en el cual se estabiliza y no se incrementa más.

$$E_s = \frac{h \Delta H + \gamma E_a}{h \Delta + \gamma} \quad (2)$$

donde  $E_s$  corresponde a la evaporación de una superficie de suelo en mm/día, las variables son idénticas a la ecuación 1 salvo la adición de  $h$  la cual corresponde a la presión de vapor de la superficie del suelo en relación con la del agua libre (mm Hg).

Estas últimas modificaciones destacan al suelo como un factor importante a considerar para el cálculo de la evaporación, dado que inicialmente solo estaba estimado en función de variables atmosféricas.

c

$$CE_s = CE_x, \text{ cuando } \sqrt{CE_x} < \beta \quad (3)$$

$$CE_s = \beta \sqrt{CE_x}, \text{ cuando } \sqrt{CE_x} \geq \beta \quad (4)$$

donde  $CE_s$  corresponde a la evaporación acumulada de suelo desnudo,  $CE_x$  es la máxima evaporación de suelo acumulada estimada a partir de la evapotranspiración

potencial acumulada (mm/día),  $\beta$  es un factor hidráulico que define el punto de cambio entre la etapa 1 y 2 de la evaporación de suelo. Así, las ecuaciones 3 y 4 corresponden a la fase 1 y 2 de la evaporación respectivamente.

La FAO 2006, al igual que para el cálculo de la evapotranspiración, ha establecido un protocolo para la estimación de evaporación en suelo desnudo. Para ello se postula el método FAO Penman Monteith (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998; FAO, 2006; Mutziger, Burt, Howes, & Allen, 2005) como el método más confiable para estimar evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) (Allen et al., 1998), y se propone una derivación de la evapotranspiración de referencia para estimar el límite superior de la evaporación de suelo desnudo (FAO, 2006). La evaporación potencial de suelo desnudo, por tanto, se representa como un 15% adicional de la evapotranspiración de referencia  $ET_o$ . Ese 15% adicional es el incremento en respuesta del menor albedo de un suelo mojado. Sin embargo, dicho cálculo solo es correcto cuando el suelo se encuentra en óptimas condiciones de humedad (cercano a capacidad de campo), por lo tanto, no aplicable en otras condiciones de humedad del suelo. Es por ello que presentan un procedimiento para el cálculo en condiciones no estándar.

Se han realizado evaluaciones al modelo FAO correspondiente a la derivación del método de Penman Monteith para la obtención del límite superior de la evaporación de suelo desnudo, y se ha comparado con mediciones reales de evaporación de suelo desnudo, donde se sugiere que la metodología FAO presenta una precisión de  $\pm 15\%$  cuando se usan datos meteorológicos de calidad y cuando se tiene un conocimiento generalizado de las propiedades del suelo evaluado (Mutziger et al., 2005).

Estas metodologías teóricas tienen la desventaja de requerir una gran cantidad de mediciones o tener que utilizar supuestos para generar los resultados. A pesar de lo anterior, han entregado resultados con bastante cercanía a mediciones reales de evaporación.

Actualmente, gracias a la implementación de lisímetros, se ha logrado cuantificar de manera exitosa y precisa la evaporación desde suelo desnudos, y evaluar así el

funcionamiento de modelos semi-empíricos. La técnica de lisimetría, se ha utilizado para medir de forma precisa los componentes del balance hidráulico (Kirkham, Gee, & Jones, 1984). La lisimetría consiste en medir la variación en el peso de un bloque de suelo aislado, i.e., el lisímetro. Esta variación de peso está dada por la entrada o salida de agua, las cuales son determinadas por unidades registradoras de peso o más conocidas como células de carga (Campeche et al., 2011). Cabe destacar que estos equipos, a pesar de entregar con precisión el peso de la unidad de suelo aislado, igual han reportado errores (Campeche, 2002; Mariano, de Faria, de Freitas, Lena, y Johann, 2015) donde se destacan cuatro errores comunes en la medición: exactitud, precisión, sensibilidad y resolución. Por ello se requiere de una correcta inspección de los datos antes de ser utilizados. Adicionalmente, una desventaja importante que presenta el uso de lisimetría para calcular la evaporación mediante el balance hídrico, es que el valor de los equipos es demasiado alto, dificultando la adquisición de equipos de alta precisión y gran escala. Su representatividad depende de las condiciones en las cuales han sido dispuestos, es decir, si se encuentra al interior de un cultivo extenso y uniforme o en un área menor.

Teniendo en consideración el comportamiento de la evaporación de suelo desnudo, se ha observado que la relación entre el potencial hídrico y la evaporación de suelo podría ser similar a la curva de retención de humedad, que ha sido estimada a partir del modelo de van Genuchten (1980). Un ejemplo de curvas de retención de humedad se presenta en la Figura 1.

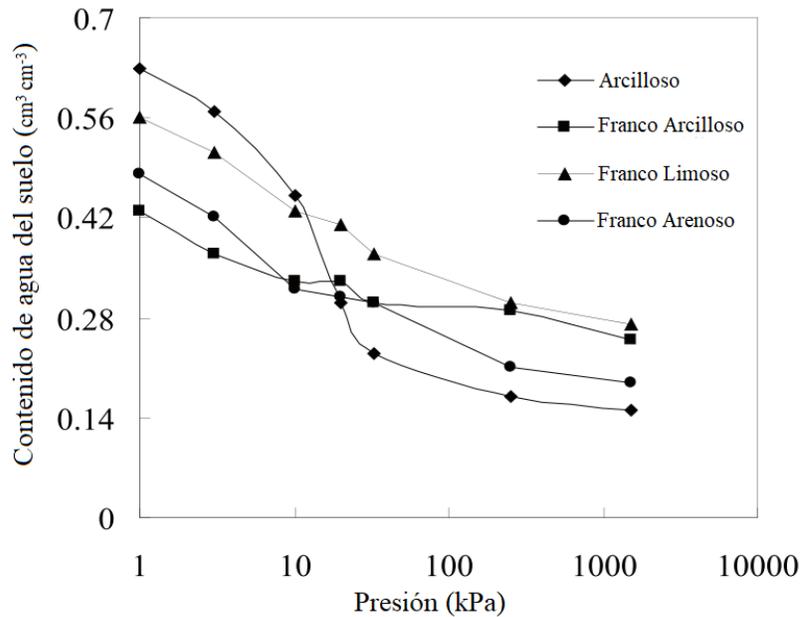


Figura 1: Curva de retención de humedad, expresa el contenido de agua en el suelo en función del potencial hídrico del suelo. Adaptado de (Yang y You, 2013)

Como es posible observar en la figura 1, el contenido de humedad se mantiene bajo en condiciones de bajo potencial hídrico o mayor presión, en cuanto la presión se acerca a cero, los valores de contenido de humedad del suelo van aumentando hasta llegar a un punto en el que teóricamente se mantiene constante ( $\theta_s$ ). Es esperable que la evaporación de suelo desnudo presente un mismo comportamiento y por lo tanto el modelo de van Genuchten (1980), sea una herramienta para la estimación de la evaporación de suelo desnudo

Con estos antecedentes, el propósito de este estudio fue calibrar un método alternativo para estimar la evaporación de un suelo desnudo a partir del estado hídrico del suelo. Para realizar lo anterior, esta investigación evalúa si una adaptación del modelo de van Genuchten (1980) permite estimar la evaporación de suelo desnudo de un suelo franco arcilloso.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio y características del suelo

El estudio se realizó en el campo experimental de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ubicado en la comuna de Pirque, región Metropolitana (33°40'25,65"S 70°35'0.9,22"O). El clima presente en el lugar es del tipo mediterráneo con estaciones bien marcadas, alcanzando precipitaciones acumuladas promedio en los últimos 30 años de alrededor de 389 mm/año las cuales se concentran principalmente en los meses de Mayo a Septiembre. La temperatura promedio anual de los últimos 30 años corresponde a 14,2°C. La Tabla 1 detalla las temperaturas y precipitaciones a nivel mensual.

*Tabla 1: Temperaturas (°C) y precipitaciones medias mensuales (mm) de los últimos 30 años de la estación de Pirque. Fuente: Recuperado de Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas en Línea (DGA, 2020)*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	20.0	19.4	17.7	14.0	11.1	9.2	8.4	9.9	11.6	13.9	16.7	18.6
Precipitación (mm)	0.7	2.5	5.7	25.4	60.7	104.0	69.3	62.7	36.5	16.4	8.1	5.2

Esta localidad se caracteriza por presentar suelos de origen aluvial del tipo Mollisol. El análisis textural del suelo de la zona de estudio indica que se trata de un suelo de textura Franca. Se realizó el análisis textural en 5 profundidades distintas (10, 30, 50, 75 y 140 cm) que coinciden con la ubicación de sensores que más adelante se especifican, estas muestras fueron obtenidas mediante un barreno. A los 10, 50 y 75 cm se presenta una textura del tipo Franca, a los 30 cm corresponde a una textura Franca Arcillosa y a los 140 cm una textura Franca arenosa. El suelo Franco presenta contenidos de humedad volumétrico de 22 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> ( con rango de 18 a 26 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) a capacidad de campo y 10 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (con rango de 8 a 12 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) a punto de marchitez permanente (Gil, Selles, Ferreyra, y Barrera, 2009). En la tabla 2 se presenta el detalle del análisis textural realizado.

Tabla 2: Análisis textural de suelo de la zona de estudio en 5 profundidades.

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
10	26	42	32	Franca
30	28	44	28	Franca Arcillosa
50	18	44	38	Franca
75	22	40	38	Franca
140	2	14	84	Areno Francosa

El monitoreo de la evaporación de suelo se llevó a cabo por 96 días desde el 26 de enero al 30 de abril del año 2020. Durante ese periodo se observó una temperatura media de 18.4 °C, con máxima y mínima de 33.7 y 0.1 °C respectivamente. La radiación solar diaria presentó valores medios de 20.93 MJ m<sup>-2</sup> con máxima 29.04 MJ m<sup>-2</sup> y mínima 5.35 MJ m<sup>-2</sup>

## Obtención y procesamiento de datos

### Evaporación de suelo

Para la obtención de la evaporación real de un suelo desnudo, se utilizaron dos unidades de lisímetro de gran escala. Cada unidad presenta un área de 2 m<sup>2</sup> y 160 cm de profundidad, alcanzando un volumen de 3,2 m<sup>3</sup>. Cada lisímetro contiene en su interior un volumen de suelo que fue alterado mínimamente para mantener sus características edáficas. Cabe destacar que la unidad es completamente impermeable en su parte lateral y basal, permitiendo así despreciar el escurrimiento subsuperficial como parte del cómputo de balance hídrico para la obtención de la evaporación de suelo desnudo. Estos equipos adicionalmente cuentan con unidades que permiten registrar en peso el volumen de agua que fue expulsado del lisímetro producto de una saturación en la parte basal del lisímetro (drenaje). La Figura 2 muestra una de las unidades de lisímetro utilizadas en el presente estudio.



*Figura 2: Lisímetro de pesada de gran escala en su momento de instalación (durante periodo de mediciones, las malezas en el interior fueron removidas).*

El lisímetro de gran escala registra por minuto el peso de cada unidad. Para conocer la pérdida de peso (evaporación) o incremento de peso (precipitación por lluvia o riego), es necesario conocer la diferencia de peso tanto de la unidad de lisímetro como del drenaje de cada unidad. Si bien el lisímetro permite conocer dichas diferencias por cada minuto, se ha reportado que existe oscilaciones en las mediciones de masa de los lisímetros producto del viento (Mariano et al., 2015), es por este motivo que es muy importante seleccionar una adecuada unidad de tiempo. Finalmente, es posible calcular la evaporación como sigue:

$$E_L = \frac{\Delta \text{Peso Lisímetro} - \Delta \text{Peso drenaje}}{\text{Area de lisímetro (2 m}^2\text{)}} \quad (5)$$

La diferencia de peso del lisímetro puede tomar valores negativos y positivos, correspondiendo a pérdidas y ganancias de peso. Lo mismo ocurre en el caso del drenaje, pero este recipiente, también libera agua del sistema cuando ya supera cierta capacidad (80 kg).

Para poder distinguir cuando las pérdidas de peso del drenaje corresponden a flujos que van hacia el lisímetro y no son salidas del sistema, este equipo registra el tiempo de funcionamiento de las bombas peristálticas de drenaje en ambas direcciones (hacia el lisímetro o hacia el drenaje), de esta forma cuando existen diferencias en peso que reflejen una reducción del peso del drenaje, sabremos que esta fue expulsada o dirigida hacia el lisímetro dado que tendrá un registro de funcionamiento cuando el flujo va hacia el lisímetro y por el contrario este registro no existirá cuando es expulsada del sistema. Para tener una idea mas clara ver figura 3 a continuación:

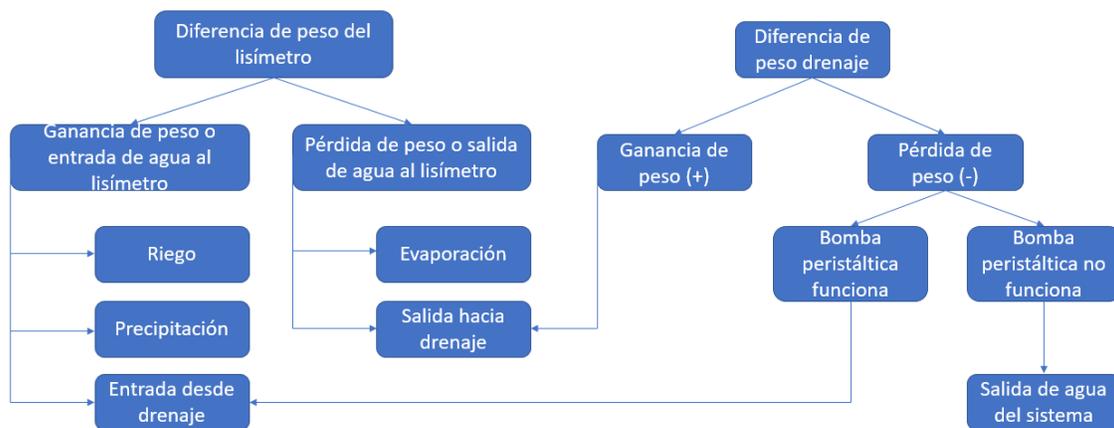


Figura 3: Esquema de flujos de agua en la unidad de lisímetro

Para efectos de este estudio, se realizó una revisión detallada de los registros de funcionamientos de las bombas peristálticas y estas no registraron impulsión de agua hacia los lisímetros, dado lo anterior las pérdidas de peso observadas en los drenajes no fueron consideradas en el cómputo de la evaporación de suelo desnudo.

Los valores obtenidos a partir de la ecuación considerados como evaporación serán aquellos que entreguen un valor negativo, por el contrario, aquellos que presenten valores positivos corresponde a incrementos en peso que están asociados a precipitaciones por lluvia o riego. Dado que este estudio está enfocado en evaporación de suelo desnudo, y que existe incertidumbre sobre el valor real de evaporación al momento del riego o precipitación, aquellos valores que fueron positivos no fueron considerados, por tanto, se trabajaron como cero evaporaciones. No obstante, el resultado de la precipitación y/o riego influye en los contenidos de humedad de los días posteriores y con ello afecta el valor de evaporaciones.

Con la ecuación 5, se realizó el cálculo de evaporación para un intervalo por cada minuto (evaporación de suelo desnudo en mm/min) y un intervalo horario (evaporación de suelo desnudo en mm/hora). Dado lo anterior, se obtuvo el valor de evaporación por cada minuto y por cada hora, estas fueron sumados para realizar el computo a nivel diario (mm/día), vale decir, para el caso del cálculo por minuto se sumaron los 1440 datos obtenidos por día y en el caso del cálculo por hora se sumaron los 24 datos resultantes.

Lo anterior, se compara con la evaporación de suelo desnudo calculada a nivel diario, es decir, la diferencia existente en el peso registrado a la misma hora en dos días distintos. Adicionalmente estos son comparados con la evaporación potencial de suelo desnudo  $E_{s0}$  propuesta en el documento FAO de Riego y Drenaje utilizada para estimar el Coeficiente de cultivo  $K_c$  en estadios iniciales del crecimiento e un cultivo, la cual se estima en la ecuación 6.

$$E_{s0} = ET_0 * 1.15 \quad (6)$$

donde,  $ET_0$  es la evapotranspiración de un cultivo de referencia. Al ser  $E_{s0}$  la evaporación potencial de un suelo desnudo es esperable que las evaporaciones observadas estén por debajo del valor potencial para el cálculo diario.

## Estado hídrico del suelo

La misma unidad de lisímetro, tiene incorporado dentro del perfil de suelo, dos tipos de sensores en cinco profundidades (10, 30, 50, 75 y 140 cm) que permiten caracterizar el perfil de suelo y su comportamiento en el tiempo. Un primer sensor, corresponde a una sonda de capacitancia FDR (Trime-Pico 64/32, MeterGroup, AG München) el cual proporciona el contenido de humedad volumétrico en el suelo ( $m^3/m^3$ ) y entrega la temperatura de suelo en grados Celsius. Un segundo sensor, corresponde a un tensiómetro (T8, MeterGroup, AG München) que entrega el potencial hídrico del suelo (hPa), sensor que será utilizado para efectos de este estudio. Estos sensores registran la información por cada 10 minutos.

Para generar datos con un mayor rango de humedad de suelo, cada unidad de lisímetro fue regada con distintas láminas de riego. Para lo anterior se instaló un sistema de riego por goteo en cada uno de los lisímetros, cada lisímetro contó con 14 goteros de 2 litros por hora (nominal) cada uno, sumando un total de 28 litros por cada hora de riego. Para un lisímetro se realizó un riego de 2 horas y el otro lisímetro con 4 horas de riego. Estos riegos se aplicaron en dos oportunidades (28 de enero de 2020 y 14 de febrero de 2020). Estos días no fueron considerados en el análisis dado que al estar recibiendo un aporte de riego y al mismo tiempo estar evaporando agua, no fue posible obtener el valor real de evaporación. Por lo tanto, se generó información de 92 días efectivos de evaporación dado que existieron días en los que el equipo no registro información.

## Estimación de Evaporación

El modelo de van Genuchten (1980), ha sido propuesto para determinar la curva de retención de humedad de un suelo. Este modelo representa a priori lo que se piensa que es el comportamiento de la evaporación de suelo en función del potencial hídrico del suelo. En este documento se propone el uso del modelo de van Genuchten (1980) como método para la obtención de la evaporación de un suelo desnudo a partir del estatus o el potencial hídricos que presenta el suelo.

En la ecuación original utilizada para la determinación de la curva de retención de agua, se obtiene el valor del contenido de humedad del suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), a partir de mediciones del potencial hídrico (Kpa) del suelo. La ecuación original propuesta por van Genuchten (1980) se presenta a continuación:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (7)$$

donde,

$\theta$  = contenido de humedad del suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

$\theta_r$  = contenido de humedad residual del suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

$\theta_s$  = contenido de humedad de saturación de suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

$h$  = potencial hídrico del suelo (kPa).

$\alpha$  = parámetro de escala inversamente proporcional al diámetro medio del poro.

$n$  y  $m$  = parámetros de forma de la característica del agua del suelo, siendo  $m = 1 - 1/n$ .

Se propone una modificación de la ecuación van Genuchten (1980), para la obtención de la evaporación de suelo desnudo. En este estudio se cambian los valores de contenido de humedad de suelo  $\theta_r$  y  $\theta_s$ , por la evaporación (mm/día) de suelo desnudo mínima y máxima respectivamente. La ecuación propuesta se observa a continuación:

$$E = E_{min} + \frac{E_{max} - E_{min}}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (8)$$

Para el caso de los parámetros  $\alpha$  y  $n$ , serán obtenidos minimizando el error cuadrático medio a manera de optimizar la ecuación que permitirá la estimación de la evaporación de suelo desnudo (Yang y You, 2013), para el caso del parámetro  $m$  este es calculado a partir de los parámetros  $\alpha$  y  $n$  tal cual se presenta en la ecuación 7. Para ello se iniciará con un modelo de evaporación con los valores de potencial hídrico (hPa) para cada profundidad con valores para  $\alpha$  y  $n$ , de 0.5 y 1 respectivamente, una vez obtenido el

modelo, se busca optimizar el resultado reduciendo al mínimo el error cuadrático medio (ecuación 9), mediante un cambio en los parámetros anteriormente mencionados.

$$\min = \sum_{i=1}^n (E_i - E(h_i, X))^2 \quad (9)$$

donde,  $E_i$  es la  $i$ -ésima medición de evaporación de suelo desnudo a partir del lisímetro a una profundidad determinada y  $h_i$  es la  $i$ -ésima medición de potencial hídrico del suelo (hPa) a la misma profundidad.

### Evaporación de suelo desnudo Método FAO

La FAO en su documento 56 de riego y drenaje, propone una metodología para la estimación del límite superior de evaporación de suelo desnudo o evaporación potencial (FAO, 2006). Dicha metodología se observa en la ecuación 6. Adicionalmente en el mismo documento, se presenta una metodología para estimar la tasa real de evaporación (mm/día), dicha ecuación se encuentra a continuación:

$$E_s = E_{so} \left[ \frac{AET - D_e}{AET - AFE} \right] \quad (10)$$

donde  $E_{so}$  es la evaporación potencial o de límite superior de suelo desnudo (mm/día), AFE es el “agua fácilmente evaporable en la superficie” (mm), AET es la cantidad máxima de agua evaporable (mm) y  $D_e$  es la reducción de agua de la superficie del suelo (mm). Este método será utilizado como comparación a los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto en esta investigación.

## Resultados

### Evaporación registrada de suelo desnudo

A partir de la ecuación 5, se calcularon los valores de evaporaciones de suelo desnudo para distintos periodos de tiempo, y se comparan con  $E_{s0}$ . Los resultados obtenidos se observan en la tabla 3.

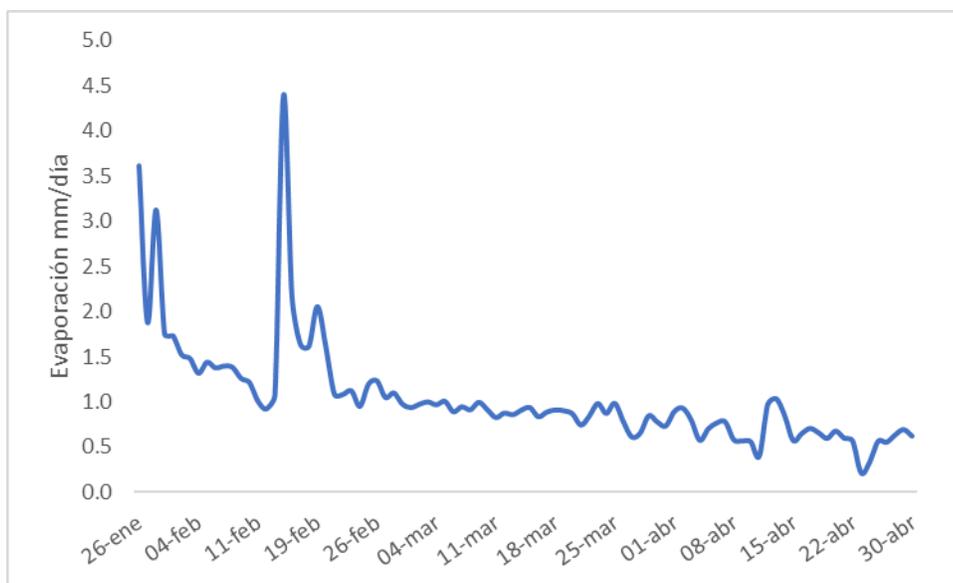
*Tabla 3: Comparación de evaporaciones diarias acumuladas calculadas por minuto, por hora y diaria, en contraste con la evaporación potencial o límite superior propuesto por FAO.*

	Evaporación (mm/día) calculada por:			Eso (mm/día)
	Minuto	Hora	Día	
Mínimo	17.46	1.12	0.84	4.83
Promedio	20.67	1.83	2.60	6.10
Máximo	24.15	6.17	12.28	9.98

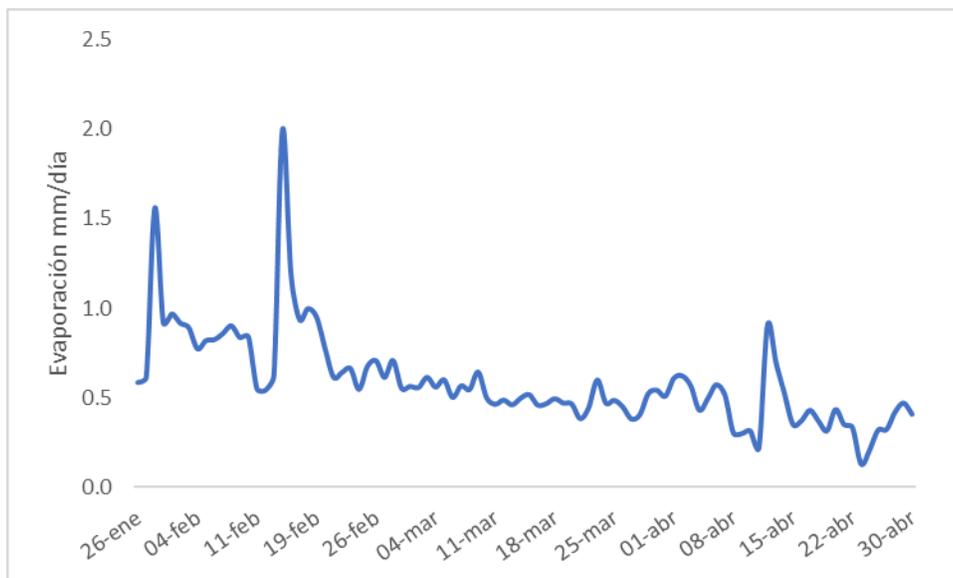
Al observar los datos, se comprueba que existe una sobre estimación de los valores de evaporación de suelo desnudo cuando se calcula con el menor intervalo de tiempo (minuto) como había sido reportado por autores anteriores (Campeche, 2002; Campeche et al., 2011), observándose evaporaciones, incluso por sobre la evaporación potencial de un suelo desnudo  $E_{s0}$  propuesta en el documento FAO de Riego y Drenaje utilizada para estimar el Coeficiente de cultivo  $K_c$  en estadios iniciales del crecimiento e un cultivo, la cual se estima en la ecuación 6.

Es por lo que se decide trabajar con los cálculos a nivel horario al encontrarse en un rango esperado de evaporación de suelo desnudo al agruparlos a nivel diario. La decisión anterior, se sustenta con la resolución temporal que presentan los tensiómetros que realizan registros cada 10 min.

Dado lo anterior el cálculo fue realizado por cada intervalo de hora, pero estos fueron agrupados a nivel diario con valores diurno (donde existió radiación solar). Los datos por hora se observan en las Figuras 4 y 5.



*Figura 4: Evaporación de suelo desnudo registrada por el lisímetro 1, dentro del periodo de tiempo del 26 de enero al 30 de abril del 2020*



*Figura 5: Evaporación de suelo desnudo registrada por el lisímetro 2, dentro del periodo de tiempo del 26 de enero al 30 de abril del 2020*

Como es posible observar en las gráficas de ambos lisímetros, ocurre un alza en la evaporación de suelo desnudo luego de aplicado un riego en los días 28 de enero y 14 de febrero.

### Registros de potencial hídrico

Las evaporaciones diarias de suelo desnudo presentan una tendencia a bajar paulatinamente al alejarse del evento de riego. En la figura 6, se observa el registro de potencial hídrico obtenido a partir de los tensiómetros insertos en las distintas profundidades de cada uno de los lisímetros, se observa y se evidencia una estrecha relación de la evaporación de suelo desnudo con el estatus hídrico presente en la superficie evaporante.

Se observan dos alzas en los valores, estas corresponden a dos riegos realizados a ambos lisímetros. Para el caso de ambos lisímetros se observa que la mayor variabilidad en el tiempo se presenta en las mediciones de potencial hídrico a los 10 cm de profundidad los cuales bajan drásticamente al pasar los días, esto se traduce en que el

agua se evapora principalmente del primer estrato de suelo y al pasar de los días el agua comienza a ser cada vez más difícil de extraer por evaporación al encontrarse más retenida por el suelo.

El efecto del tiempo de riego aplicado es posible observarlo en los límites inferiores a los que llega el potencial hídrico durante el tiempo transcurrido después del primer evento de riego. Como es posible observar, el lisímetro 1 alcanza un valor mínimo aproximado de -600 hPa aproximadamente con un tiempo de riego de 4 horas, mientras que el segundo lisímetro alcanza un valor mínimo de potencial matricial de -800 hPa con un tiempo de riego de 2 horas, esto quiere decir que el lisímetro que presentó una menor carga de agua aplicada y se secó más que el lisímetro que presentó una carga mayor y por lo tanto mayor dificultad de evaporar el agua demanda por la atmósfera.

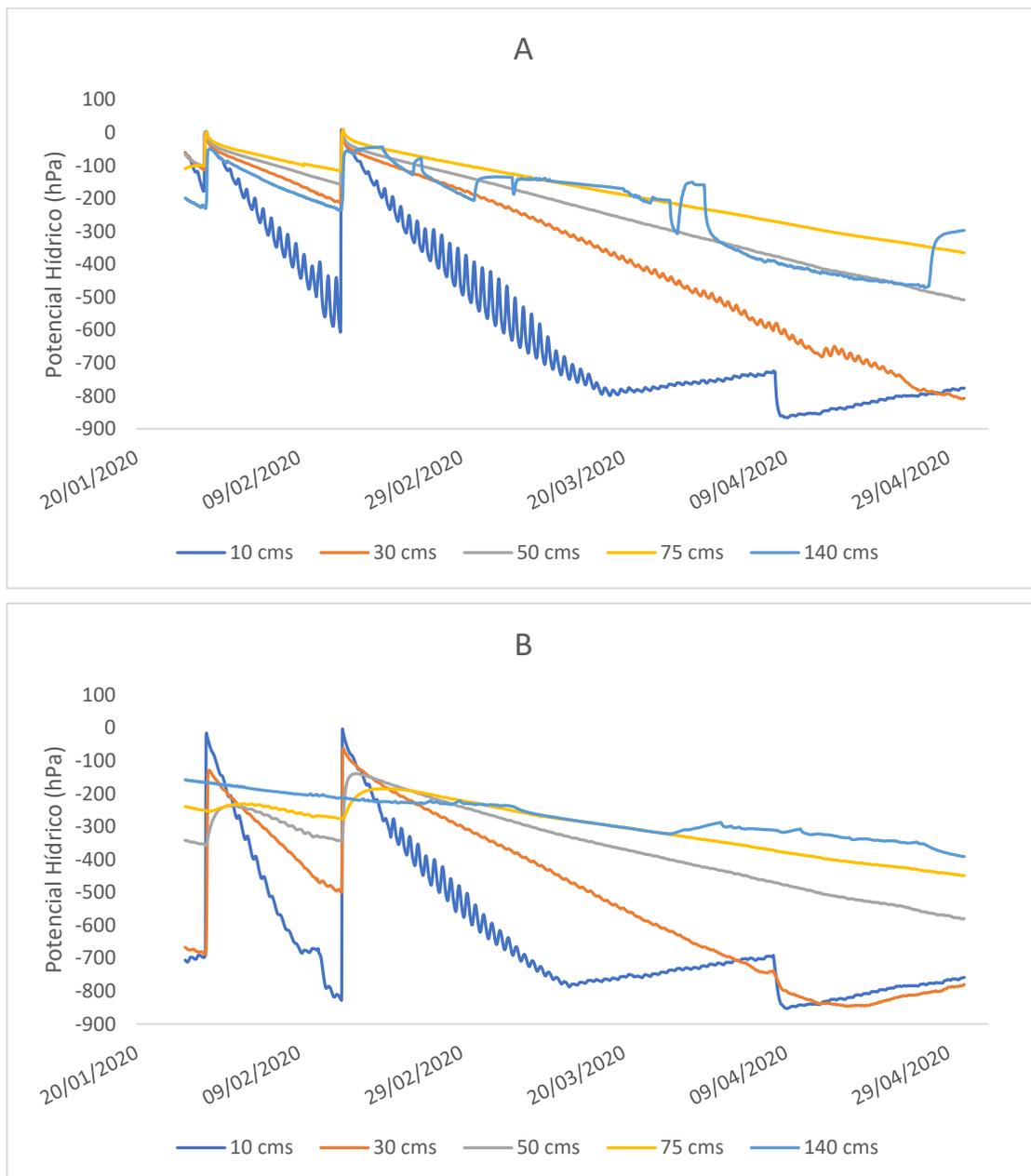
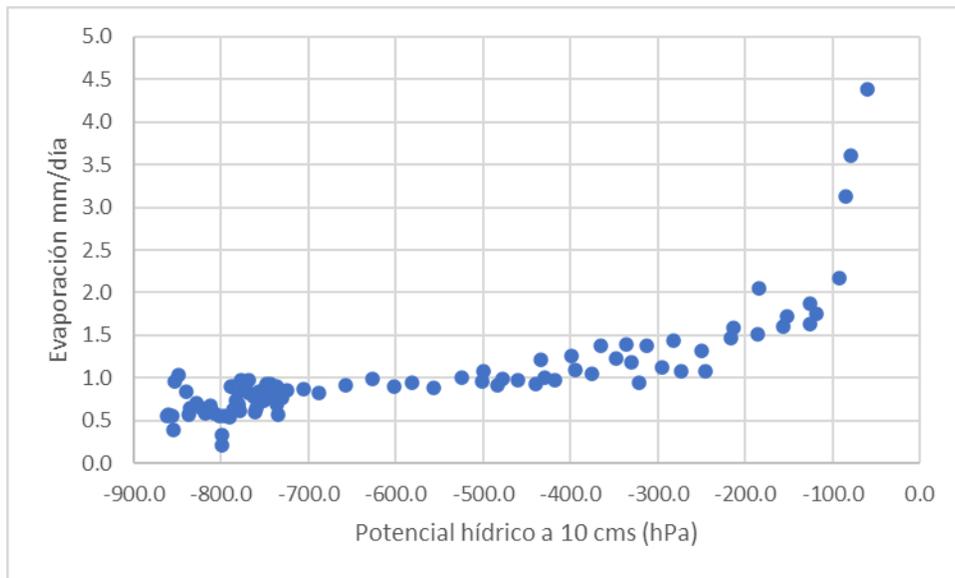


Figura 6: Potencial hídrico registrado entre el 26 de enero del 2020 al 30 de abril del 2020, Grafico A, para el lisímetro 1 y B para el lisímetro 2.

En la medida que ocurre un evento de riego o precipitación, el perfil de suelo tiende a alcanzar niveles más altos de humedad llegando a su capacidad máxima de almacenamiento o capacidad de campo. Al pasar los días y gracias a la demanda

atmosférica, se evapora agua de la superficie que en este caso corresponde a una superficie de suelo desnudo. A medida que se evapora agua desde el suelo, este disminuye su contenido de humedad acercándose a una capacidad mínima de agua disponible o PMP. Cuando el suelo se mueve de una condición de capacidad de campo a una condición de punto de marchitez permanente, el agua contenida en el perfil de suelo se encuentra mucho más retenida por las fuerzas capilares y por lo tanto extraerla se hace mucho más difícil, viéndose reflejado en un valor más negativo de potencial hídrico (ver Figura 6).

Dentro del periodo de tiempo y los rangos de potencial hídrico obtenidos durante este estudio, es posible observar que la evaporación de suelo desnudo tiene un comportamiento que responde al potencial hídrico, observándose un incremento en la evaporación de suelo en la medida que el potencial hídrico se acerca a cero o en su defecto el agua contenida en el suelo se encuentra menos retenida. Como es posible observar en la figura 7 en el comportamiento que presenta la evaporación en función del potencial hídrico a 10 cm para el lisímetro 1, se aprecia una evaporación prácticamente constante entre los -900 hPa y los -400 hPa, y a partir de este la evaporación empieza aumentar exponencialmente en la medida que se acerca a 0 hPa.



*Figura 7: Comportamiento de la evaporación en función del potencial hídrico a 10 cm para el lisímetro 1.*

### Modelo de evaporación de suelo desnudo

Para realizar el entrenamiento y optimización del modelo se utilizarán 92 datos de evaporación y potencial hídrico del suelo. A priori, se podría pensar en utilizar una unidad de lisímetro para realizar dicho entrenamiento y validarlo con la segunda unidad. Pero, a pesar de que se utiliza un supuesto de que ambos lisímetros cuentan con el mismo suelo, es muy probable que estos presenten alguna pequeña diferencia dentro de su perfil, además considerando que se aplicaron dos láminas de riego distintas a ambos lisímetros es más pertinente utilizar un set de datos que contengan 50% de datos aleatorios de cada lisímetro. Es por ello que se utilizaran 46 datos del lisímetro 1 y 46 datos del lisímetro 2 provenientes de las tablas 4 y 5 respectivamente, como set de datos de entrenamiento para el modelo de estimación de la evaporación de suelo desnudo y el restante de datos será utilizado para validación del modelo.

Tabla 4: Set de datos seleccionados para ambos lisímetros, evaporación, potencial hídrico en las 5 profundidades desde el 26 de enero al 14 de marzo de 2020.

Día	Lisímetro 1						Lisímetro 2					
	E (mm/día)	Potencial hídrico (hPa) a:					E (mm/día)	Potencial hídrico (hPa) a:				
		10 cm	30 cm	50 cm	75 cm	140 cm		10 cm	30 cm	50 cm	75 cm	140 cm
26-ene	3.6	-79.9	-78.3	-80.9	-103.8	-208.1	0.6	-702.5	-674.5	-346.0	-242.5	-160.4
27-ene	1.9	-126.4	-100.0	-95.2	-100.2	-221.3	0.6	-695.3	-680.3	-351.1	-247.6	-163.4
30-ene	3.1	-84.6	-63.0	-50.9	-39.4	-82.2	1.6	-149.5	-182.9	-243.5	-242.2	-172.7
31-ene	1.8	-118.9	-73.8	-59.6	-47.3	-92.2	0.9	-211.1	-209.9	-237.4	-235.3	-175.3
01-feb	1.7	-151.7	-83.6	-67.3	-53.7	-105.8	1.0	-272.9	-233.9	-239.9	-232.5	-178.4
02-feb	1.5	-186.4	-93.3	-74.6	-59.1	-118.2	0.9	-335.0	-256.6	-245.6	-232.7	-182.2
03-feb	1.5	-215.8	-103.0	-81.6	-64.8	-129.9	0.9	-395.2	-279.3	-252.4	-234.4	-186.4
04-feb	1.3	-250.5	-113.0	-88.6	-70.4	-143.4	0.8	-454.8	-301.6	-261.9	-237.5	-189.6
05-feb	1.4	-281.8	-123.0	-95.6	-76.2	-155.0	0.8	-511.8	-324.7	-271.9	-242.4	-192.5
06-feb	1.4	-312.8	-132.8	-102.6	-82.0	-165.9	0.8	-566.8	-348.2	-282.4	-247.2	-195.2
07-feb	1.4	-335.8	-143.0	-109.8	-88.0	-175.8	0.9	-613.3	-371.5	-294.3	-252.6	-197.9
08-feb	1.4	-365.7	-153.7	-117.1	-93.0	-184.7	0.9	-653.7	-395.0	-305.5	-258.2	-201.1
09-feb	1.3	-399.4	-165.1	-124.8	-97.6	-194.2	0.8	-679.6	-419.9	-316.3	-262.6	-203.4
10-feb	1.2	-433.9	-176.3	-132.6	-99.3	-204.1	0.8	-675.3	-445.9	-327.0	-268.3	-203.4
11-feb	1.0	-429.7	-187.7	-139.1	-103.8	-212.2	0.6	-687.5	-467.4	-331.1	-267.9	-205.7
12-feb	0.9	-483.3	-197.7	-146.2	-108.6	-222.2	0.5	-788.4	-480.0	-335.0	-270.5	-208.3
13-feb	1.1	-499.6	-208.5	-153.1	-113.4	-229.8	0.6	-814.0	-492.9	-340.8	-273.7	-212.7
15-feb	4.4	-59.8	-52.3	-40.7	-22.7	-62.3	2.0	-86.2	-104.0	-142.8	-224.1	-216.8
16-feb	2.2	-92.2	-64.6	-51.4	-32.5	-50.8	1.2	-129.9	-126.6	-141.4	-200.5	-219.2
17-feb	1.6	-125.5	-74.7	-59.7	-39.6	-46.4	0.9	-175.0	-145.4	-148.5	-190.0	-221.1
18-feb	1.6	-156.6	-83.8	-66.8	-45.4	-44.6	1.0	-222.7	-162.8	-157.1	-186.2	-224.7
19-feb	2.1	-184.6	-92.5	-73.4	-50.4	-57.6	1.0	-279.7	-179.2	-165.7	-185.5	-224.3
20-feb	1.6	-213.1	-101.2	-79.8	-55.3	-86.5	0.8	-299.4	-194.1	-174.2	-186.3	-226.0
21-feb	1.1	-245.1	-110.0	-86.0	-60.3	-105.0	0.6	-327.5	-207.3	-182.2	-188.1	-227.0
22-feb	1.1	-273.5	-118.8	-92.1	-65.6	-121.1	0.6	-354.1	-219.8	-189.7	-190.2	-227.6
23-feb	1.1	-294.9	-127.6	-98.3	-70.8	-83.9	0.7	-380.8	-233.1	-197.8	-194.6	-229.0
24-feb	0.9	-321.1	-136.6	-104.4	-75.6	-126.1	0.5	-414.4	-246.1	-206.1	-199.3	-228.6
25-feb	1.2	-329.9	-145.3	-110.4	-80.5	-143.1	0.7	-433.8	-258.9	-214.6	-204.6	-225.9
26-feb	1.2	-348.4	-152.2	-116.2	-85.4	-156.7	0.7	-456.6	-271.1	-222.2	-210.0	-229.8
27-feb	1.0	-375.2	-160.8	-122.1	-90.0	-170.0	0.6	-489.0	-283.1	-229.4	-214.2	-232.0
28-feb	1.1	-394.2	-169.8	-128.2	-95.0	-183.1	0.7	-515.2	-295.7	-237.1	-219.1	-225.1
29-feb	1.0	-418.4	-178.4	-134.3	-99.8	-194.9	0.6	-536.7	-307.4	-244.3	-223.8	-229.9
01-mar	0.9	-440.5	-187.9	-140.7	-104.6	-194.7	0.6	-567.2	-319.2	-250.7	-228.2	-232.7
02-mar	1.0	-460.1	-198.0	-147.2	-108.6	-138.7	0.6	-593.5	-331.6	-258.2	-233.0	-232.6
03-mar	1.0	-477.7	-206.9	-153.5	-113.3	-135.1	0.6	-617.4	-344.2	-265.1	-238.3	-233.7
04-mar	1.0	-501.5	-217.2	-159.6	-118.0	-134.5	0.6	-637.7	-356.1	-272.2	-243.1	-235.7
05-mar	1.0	-525.1	-227.0	-166.4	-122.7	-135.1	0.6	-656.7	-367.7	-279.5	-247.7	-236.0
06-mar	0.9	-557.1	-237.2	-173.1	-126.6	-165.2	0.5	-678.0	-379.7	-286.0	-253.0	-241.1
07-mar	0.9	-581.9	-247.9	-179.8	-131.2	-140.6	0.6	-698.7	-392.5	-293.6	-257.5	-251.9
08-mar	0.9	-602.6	-258.2	-185.7	-136.3	-141.6	0.5	-716.6	-405.3	-300.2	-262.7	-258.8
09-mar	1.0	-627.3	-268.2	-192.6	-142.0	-142.5	0.6	-732.3	-417.7	-307.8	-267.7	-263.8
10-mar	0.9	-657.8	-280.0	-199.5	-146.4	-143.8	0.5	-747.7	-430.9	-314.2	-270.7	-268.2
11-mar	0.8	-687.4	-291.5	-205.3	-150.7	-148.5	0.5	-761.0	-444.0	-321.0	-274.4	-272.0
12-mar	0.9	-705.2	-302.3	-212.4	-155.1	-151.1	0.5	-774.4	-458.6	-327.0	-277.6	-276.2
13-mar	0.9	-724.5	-313.8	-219.0	-159.6	-153.5	0.5	-782.0	-471.3	-333.5	-280.8	-280.2
14-mar	0.9	-736.7	-324.3	-225.1	-164.4	-156.0	0.5	-776.1	-484.0	-338.9	-284.4	-284.0

Tabla 5 Set de datos para ambos lisímetros, evaporación, potencial hídrico en las 5 profundidades desde el 15 de marzo al 30 de abril de 2020.

Día	E (mm/día)	Lisímetro 1 Potencial hídrico (hPa) a:					E (mm/día)	Lisímetro 2 Potencial hídrico (hPa) a:				
		10 cms	30 cms	50 cms	75 cms	140 cms		10 cms	30 cms	50 cms	75 cms	140 cms
15-mar	0.9	-748.2	-334.1	-231.8	-168.9	-158.7	0.5	-770.5	-496.0	-344.8	-287.0	-287.6
16-mar	0.8	-768.1	-346.0	-237.6	-173.7	-161.3	0.5	-767.5	-509.4	-350.1	-290.9	-290.8
17-mar	0.9	-783.7	-358.4	-244.8	-178.1	-163.4	0.5	-766.2	-523.4	-355.7	-293.8	-294.5
18-mar	0.9	-789.3	-369.5	-251.3	-182.5	-166.2	0.5	-763.1	-536.2	-361.4	-298.0	-298.0
19-mar	0.9	-786.3	-380.4	-257.6	-186.7	-169.3	0.5	-759.3	-547.5	-366.7	-301.3	-301.6
20-mar	0.9	-780.7	-391.2	-264.2	-191.2	-181.6	0.5	-752.5	-558.8	-371.9	-304.8	-304.9
21-mar	0.7	-783.5	-404.4	-270.1	-195.6	-194.0	0.4	-755.5	-572.1	-377.5	-308.7	-308.5
22-mar	0.8	-779.6	-415.6	-277.2	-199.7	-207.3	0.4	-753.4	-585.1	-383.1	-312.0	-312.7
23-mar	1.0	-776.8	-424.4	-282.7	-204.1	-203.5	0.6	-750.2	-596.0	-388.3	-316.3	-316.1
24-mar	0.9	-773.0	-435.4	-289.3	-208.8	-203.3	0.5	-745.0	-606.4	-393.4	-319.5	-319.2
25-mar	1.0	-767.7	-446.1	-294.9	-212.8	-209.5	0.5	-739.0	-616.6	-399.8	-323.5	-322.0
26-mar	0.8	-763.1	-457.3	-301.4	-216.9	-297.8	0.4	-733.7	-627.3	-404.9	-326.7	-317.5
27-mar	0.6	-760.9	-470.4	-307.3	-222.0	-165.7	0.4	-731.6	-639.7	-410.2	-330.8	-310.1
28-mar	0.7	-759.6	-482.9	-314.1	-226.6	-153.4	0.4	-730.5	-654.5	-416.4	-334.6	-306.9
29-mar	0.8	-756.2	-491.5	-319.9	-230.4	-158.5	0.5	-726.9	-664.5	-421.6	-338.7	-301.7
30-mar	0.8	-754.6	-499.0	-325.4	-234.5	-293.7	0.5	-720.4	-672.6	-426.4	-341.9	-295.0
31-mar	0.7	-750.9	-510.2	-331.5	-238.6	-326.2	0.5	-716.9	-682.0	-431.3	-345.3	-289.6
01-abr	0.9	-749.4	-522.4	-336.8	-242.7	-341.3	0.6	-715.4	-693.5	-436.2	-348.5	-300.9
02-abr	0.9	-742.8	-536.1	-343.6	-247.0	-352.9	0.6	-708.9	-702.2	-441.8	-352.3	-302.8
03-abr	0.8	-738.7	-548.7	-349.4	-251.3	-363.2	0.6	-704.8	-712.2	-447.2	-356.1	-305.3
04-abr	0.6	-734.9	-565.9	-355.8	-255.7	-375.8	0.4	-701.1	-722.9	-453.4	-360.4	-306.7
05-abr	0.7	-736.3	-579.5	-363.0	-260.4	-384.2	0.5	-703.0	-738.4	-460.1	-364.9	-307.7
06-abr	0.8	-730.4	-588.3	-369.1	-264.9	-391.2	0.6	-697.1	-744.1	-464.7	-368.3	-309.5
07-abr	0.8	-732.8	-592.2	-374.6	-269.3	-389.8	0.5	-712.6	-744.9	-469.6	-372.4	-311.0
08-abr	0.6	-860.8	-606.8	-380.6	-273.8	-399.6	0.3	-841.7	-793.4	-476.1	-377.5	-317.3
09-abr	0.6	-861.2	-623.3	-386.7	-278.3	-405.2	0.3	-848.9	-807.3	-481.2	-381.3	-314.2
10-abr	0.6	-856.3	-638.0	-393.5	-283.0	-410.6	0.3	-843.7	-815.5	-486.3	-384.5	-308.8
11-abr	0.4	-854.5	-652.5	-399.7	-287.3	-413.5	0.2	-841.4	-824.5	-492.3	-388.5	-321.6
12-abr	1.0	-853.3	-667.6	-406.1	-292.0	-421.2	0.9	-839.6	-832.3	-498.2	-391.8	-323.5
13-abr	1.0	-848.1	-676.4	-413.6	-296.7	-424.4	0.7	-834.5	-837.4	-504.5	-396.6	-324.2
14-abr	0.8	-839.9	-672.5	-419.0	-301.3	-429.7	0.5	-826.7	-838.2	-509.3	-399.9	-326.3
15-abr	0.6	-837.4	-667.8	-422.9	-305.4	-431.5	0.4	-823.7	-841.9	-513.6	-403.6	-331.2
16-abr	0.6	-835.5	-683.6	-427.6	-309.3	-437.0	0.4	-821.7	-845.4	-518.2	-406.1	-334.4
17-abr	0.7	-827.9	-690.1	-432.3	-313.1	-444.7	0.4	-814.0	-843.9	-521.8	-409.5	-339.6
18-abr	0.7	-823.1	-698.9	-437.3	-317.0	-444.5	0.4	-809.4	-844.2	-525.5	-412.1	-337.7
19-abr	0.6	-818.2	-707.7	-442.3	-320.6	-449.3	0.3	-803.5	-841.1	-529.1	-415.2	-340.1
20-abr	0.7	-812.5	-716.0	-447.0	-324.0	-452.1	0.4	-797.8	-833.8	-532.2	-417.3	-342.2
21-abr	0.6	-808.0	-727.8	-452.2	-327.6	-452.7	0.4	-793.2	-827.4	-536.1	-419.9	-343.5
22-abr	0.6	-802.1	-737.2	-457.5	-330.9	-458.2	0.3	-787.3	-820.1	-539.6	-422.5	-344.4
23-abr	0.2	-799.7	-749.8	-462.8	-334.7	-461.0	0.1	-784.4	-814.6	-543.5	-424.4	-348.6
24-abr	0.3	-799.3	-771.3	-470.5	-338.7	-462.3	0.2	-783.7	-812.2	-550.4	-428.6	-349.5
25-abr	0.6	-796.3	-783.1	-477.9	-343.0	-465.6	0.3	-781.0	-808.7	-556.5	-432.1	-352.2
27-abr	0.5	-790.6	-791.8	-489.2	-351.4	-330.4	0.3	-775.1	-800.5	-566.8	-438.9	-370.7
28-abr	0.6	-785.8	-795.2	-494.1	-354.9	-308.2	0.4	-770.2	-794.9	-569.6	-441.2	-378.7
29-abr	0.7	-779.9	-799.9	-500.3	-358.9	-302.5	0.5	-764.2	-787.1	-574.8	-444.4	-384.7
30-abr	0.6	-778.2	-807.6	-506.2	-363.0	-298.3	0.4	-761.8	-784.0	-579.1	-447.9	-389.7

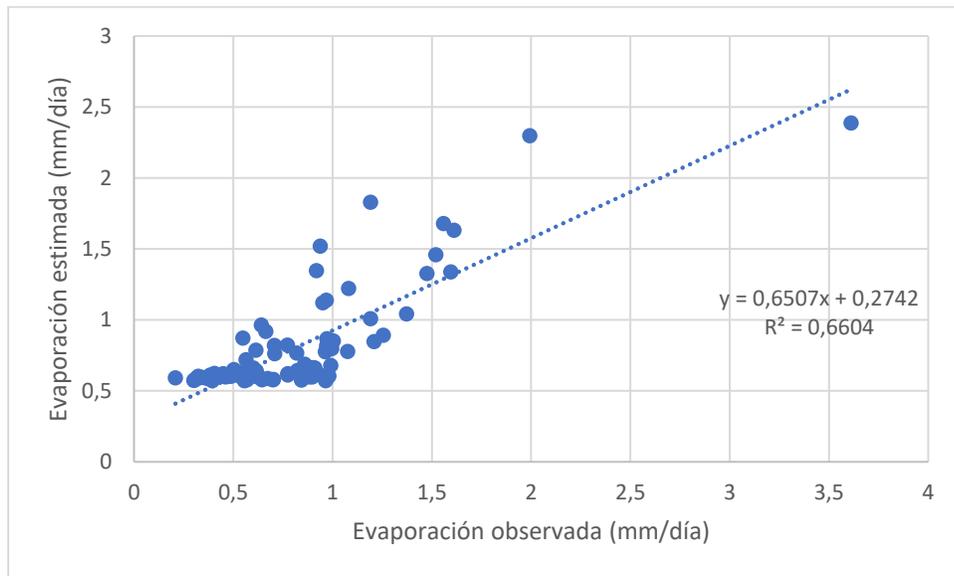
El set de datos de entrenamiento presentó una evaporación de suelo desnuda máxima de 3.61 mm/día y una mínima de 0.2 mm/día, estos valores fueron utilizados como  $E_{max}$  y  $E_{min}$  respectivamente. Para el caso de los parámetros  $\alpha$  y  $n$ , que fueron obtenidos por el método de los mínimos cuadrados utilizado por Yang y You (2013), se obtuvieron para cada una de las distintas profundidades. Se observa un cuadro resumen de los parámetros en la tabla a continuación. Cabe destacar que se realizó un análisis de sensibilidad simple, y el resultado no se ve fuertemente alterado en la medida que cambian los valores de los parámetros.

*Tabla 6: Resumen de parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  obtenidos mediante el método de los mínimos cuadrado, para cada una de las profundidades.*

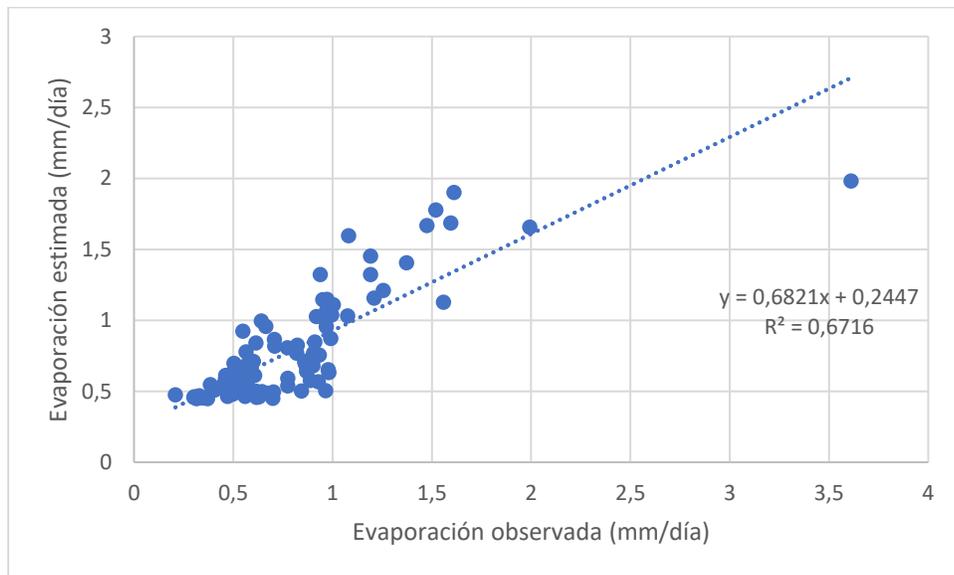
Parámetro	Profundidad de medición de Potencial Hídrico				
	10 cm	30 cm	50 cm	75 cm	140 cm
$\alpha$	0.016	0.022	0.025	0.050	0.039
$n$	1.845	1.898	1.958	1.755	1.791
$m$	0.458	0.473	0.489	0.430	0.441

El modelo de evaporación de suelo desnudo ya optimizado con los parámetros anteriormente presentados en cada una de las profundidades generó un valor de  $R^2$  que alcanzó valores de 0.66 para el caso del modelo que estima en función del potencial hídrico a 10 cm para el mismo set de entrenamiento. Fue posible observar un valor de  $R^2 = 0,67$  para los 30 cm. En cuanto al resto de las profundidades estos valores fueron decayendo, obteniendo así un  $R^2$  de 0.58, 0.41 y 0.26 para profundidades de 50, 75 y 140 cm respectivamente.

Salvo el caso de los 30 cm que presentó una leve mejora, los valores de ajuste del modelo disminuyen en la medida que la medición del potencial hídrico es más profunda. A continuación, se presentan las gráficas de las profundidades que presentaron una mayor correlación.

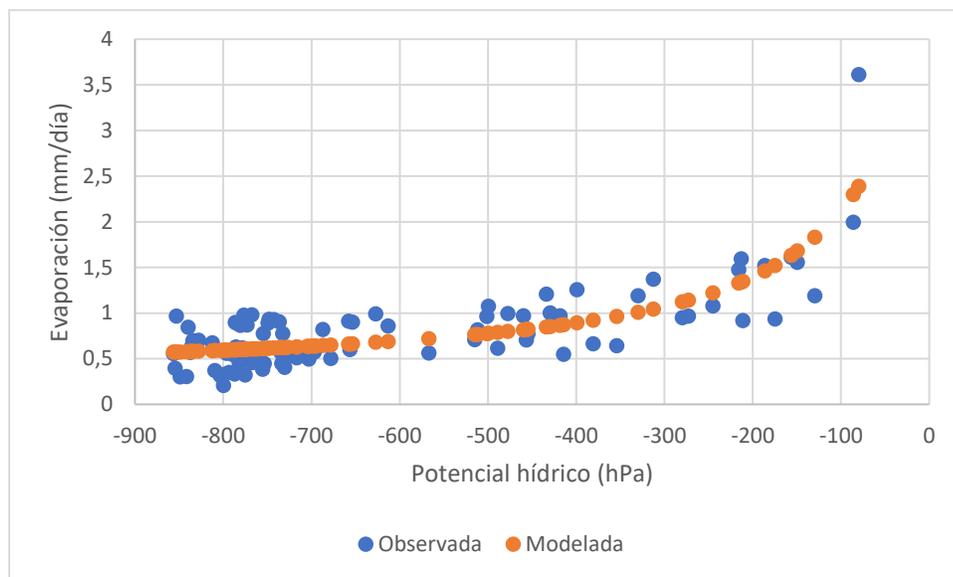


*Figura 8: Evaporación observada versus la evaporación estimada a partir de la ecuación de van Genuchten modificada y optimizada para sus propios valores de potencial hídrico a 10 cm de profundidad*

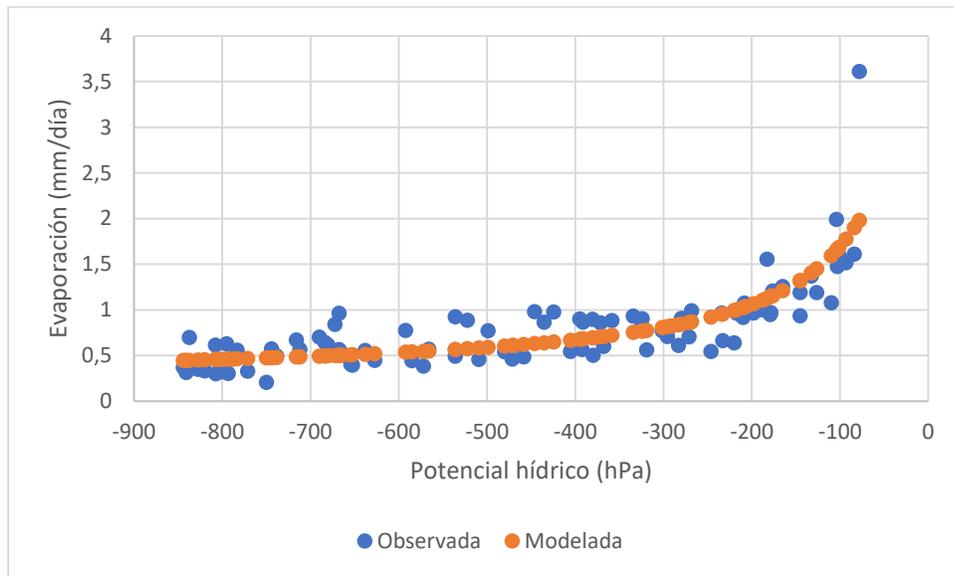


*Figura 9: Evaporación observada versus la evaporación estimada a partir de la ecuación de van Genuchten modificada y optimizada para sus propios valores de potencial hídrico a 30 cm de profundidad*

Con este conjunto de entrenamiento se graficó la curva de evaporación en función del potencial hídrico para 10 y 30 cm dado que fueron aquellas que presentaron un mejor coeficiente de determinación. Es posible observar en las figuras 10 y 11, que el modelo a priori representa la curva de evaporación de suelo desnudo para el mismo set de datos de entrenamiento tanto a los 10 cm como a los 30 cm de profundidad de medición del potencial hídrico.



*Figura 10: Curva de evaporación en función del potencial hídrico a 10 cm, para el set de datos de entrenamiento con sus propios parámetros optimizados. En azul la evaporación observada y en naranja la evaporación estimada a partir del modelo de van Genuchten (1980).*

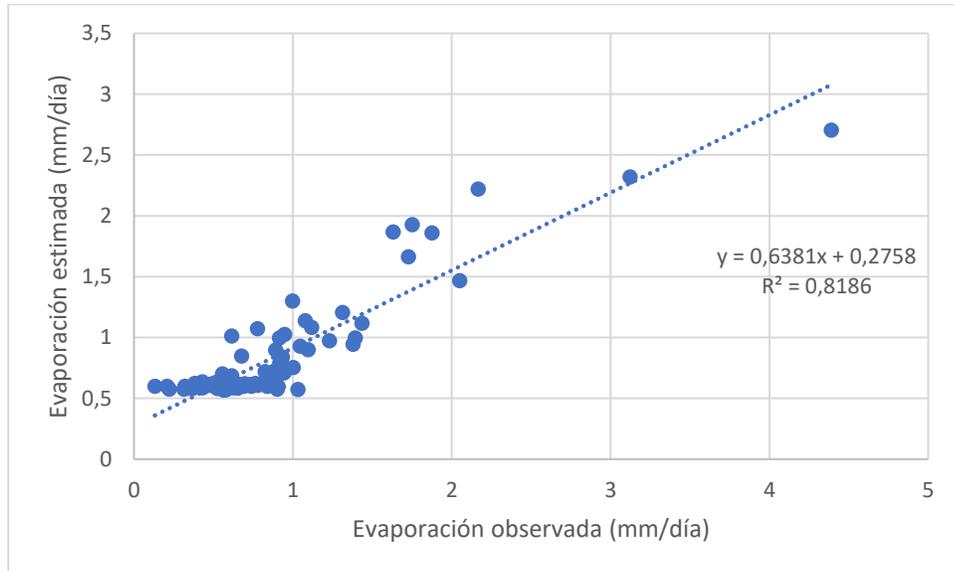


*Figura 11: Curva de evaporación en función del potencial hídrico a 30 cm, para el set de datos de entrenamiento con sus propios parámetros optimizados. En azul la evaporación observada y en naranja la evaporación estimada a partir del modelo de van Genuchten (1980).*

## Validación del modelo

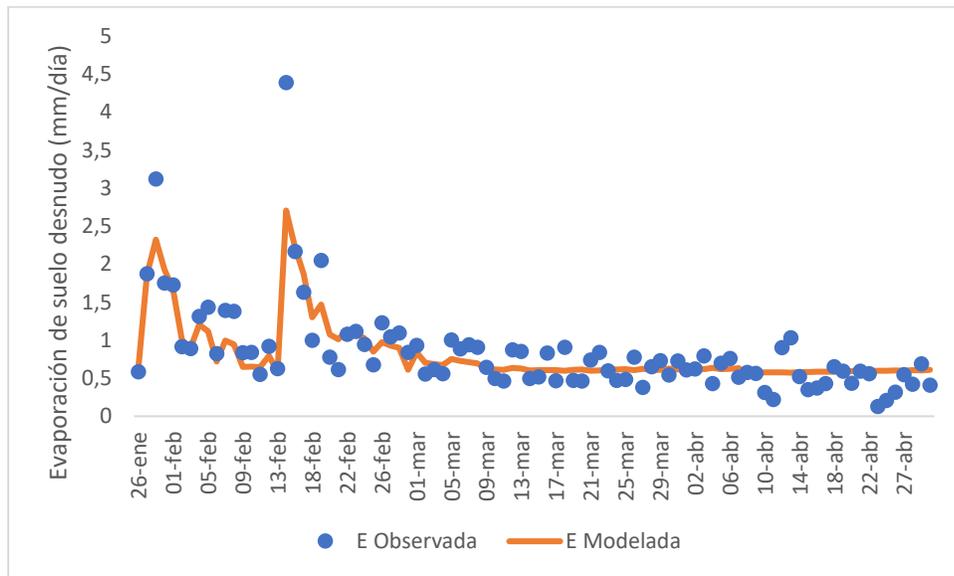
Con los valores optimizados de evaporación máxima y mínima, los parámetros  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  obtenidos a partir del set de datos de entrenamiento para cada una de las profundidades de medición del potencial hídrico, se realiza la estimación de la evaporación con los datos de entrenamiento. Para lo anterior, se tiene como entrada las mediciones de potencial hídrico en sus distintas profundidades. Anteriormente el modelo con datos de 10 y 30 cm fueron los que proporcionaron un mejor valor de  $R^2$ , es por lo que se realiza una comparación de los valores modelados de evaporación de suelos desnudo a dichas profundidades y los valores de evaporación de suelo desnudo observados del set de datos de validación.

Para el caso de los potenciales hídricos a los 10 cm, se aprecia un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.81, como es posible observarlo en la figura 12. Estos valores mejoraron respecto al set de datos de entrenamiento que si recordamos fue de 0.66 para la misma profundidad.



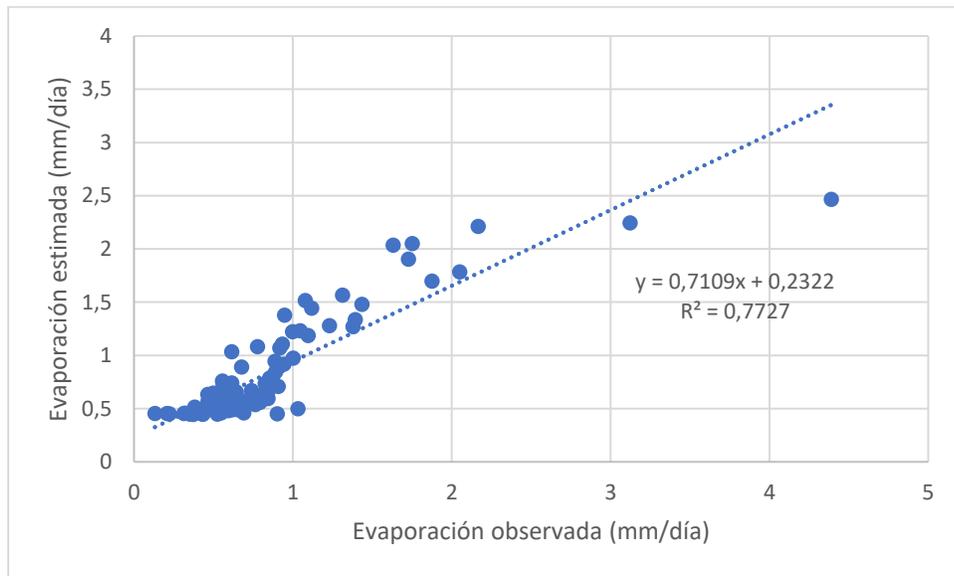
*Figura 12: Evaporación observada versus la evaporación estimada con potencial hídrico a 10 cm con el set de datos de validación. Se utilizaron los parámetros optimizados (a y n) con el set de entrenamiento.*

El comportamiento en el tiempo de modelación de evaporación fue bastante similar a lo observado en el periodo de tiempo comprendido entre el 26 de enero y el 30 de abril. Como se puede observar en la gráfica a continuación, se observan diferencias en los máximos de evaporación que corresponden a los días posteriores al riego. Y las oscilaciones no son tan marcadas como lo fueron las evaporaciones observadas (línea azul), pero si siguen el comportamiento observado de evaporación. A pesar de lo anterior, el error cuadrático medio (RMSE) fue bastante bajo alcanzando un valor de 0.28 mm/día.



*Figura 13: Comparación de evaporaciones observadas y estimadas en el tiempo para el set de validación, con los parámetros optimizados de la tabla 5, utilizando potenciales hídricos a 10 cm.*

Para el caso de los potenciales hídricos a 30 cms, es posible observar que el  $R^2$  mejora respecto al set de datos de entrenamiento, el valor que presentó este set de datos fue de 0.67 mientras que como se observa en la gráfica el modelo con valores optimizado alcanzó un valor de  $R^2$  de 0.77 (ver figura 14).



*Figura 14: Evaporación observada versus la evaporación estimada con potencial hídrico a 30 cm con el set de datos de validación. Se utilizaron los parámetros optimizados (a y n) con el set de entrenamiento.*

El comportamiento en el tiempo de modelación de evaporación al igual que en caso anterior para los 10 cm, fue similar a lo observado en el periodo de tiempo comprendido entre el 26 de enero y el 30 de abril. El modelo igualmente presenta diferencias principalmente en los valores máximos de evaporación para los días contiguos a un evento de riego (ver figura 15). En cuanto a las oscilaciones, en los días cercanos al riego estos fueron caracterizados de manera muy similar, sobre todo en la primera ocasión de riego. A nivel general la ecuación optimizada logra un buen acercamiento a la curva de evaporación del set de datos de validación. El modelo de evaporación de suelo desnudo con los parámetros optimizados y los valores de potencial hídrico a 30 cm obtiene un RMSE de 0.29 mm/día.

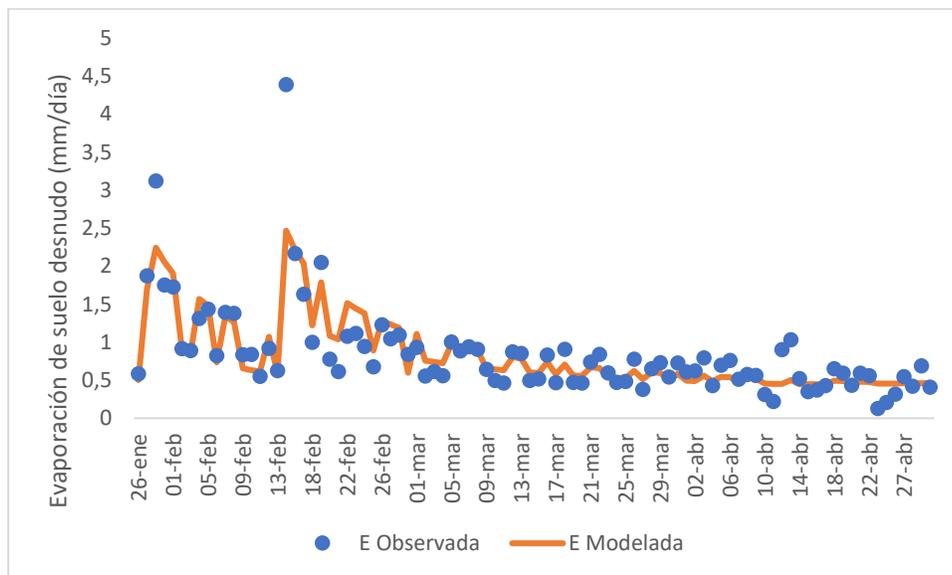


Figura 15 Comparación de evaporaciones observadas y estimadas en el tiempo para el set de validación, con los parámetros optimizados de la tabla 5, utilizando potenciales hídricos a 30 cm.

Para aquellas mediciones de potencial hídrico que son más profundas, el  $R^2$  para el modelo con los parámetros optimizados en sus respectivas mediciones, decae a medida que más profunda es la medición. En cuanto al error cuadrático medio, este se mantiene relativamente parecido hasta los 75 cm de profundidad, ya en la última profundidad de medición (140 cm) este error aumenta demasiado. El detalle de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 7.

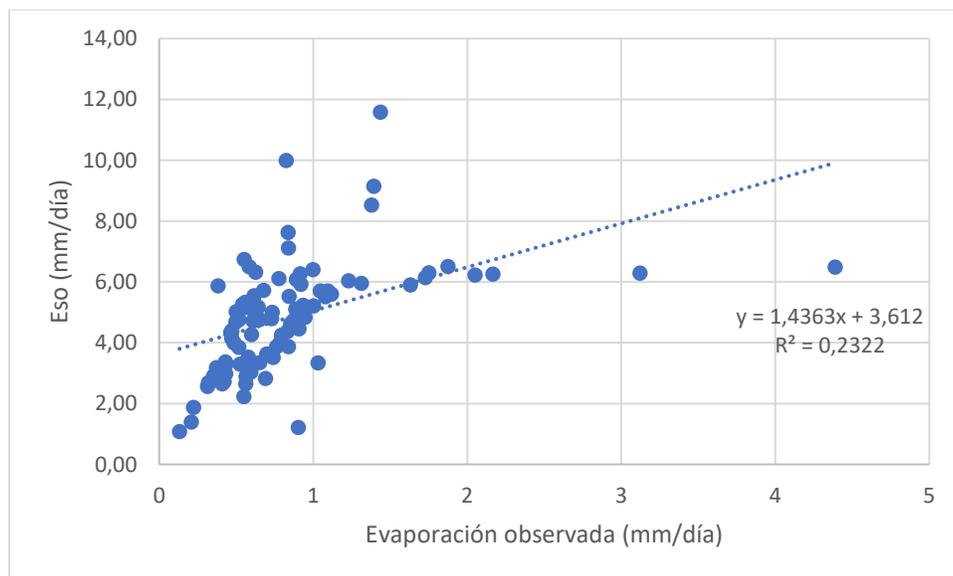
Tabla 7: Resultados de coeficiente de determinación  $R^2$  y error cuadrático medio RMSE, para los modelos de evaporación realizados para el set de validación.

Modelo con Potencial Hídrico a:	$R^2$	RMSE
10 cm	0.82	0.28
30 cm	0.77	0.29
50 cm	0.79	0.28
75 cm	0.80	0.29
140 cm	0.59	0.41

## Evaporación de suelo desnudo con Modelo FAO

Según la ecuación número 6 se obtuvo la evaporación potencial o de límite superior para un suelo desnudo ( $E_{so}$ ) y la ecuación 10 se obtuvo la tasa real de evaporación de suelo desnudo ( $E_s$ ). Estos resultados se comparan con la evaporación de suelo desnudo registrada con los lisímetros, con el mismo set de datos de validación utilizado con el modelo de van Genuchten modificado.

En las gráficas a continuación se presenta el coeficiente de determinación  $R^2$  que se obtuvieron tanto para la  $E_{so}$  y  $E_s$  a partir del método FAO, respecto a la evaporación de suelo desnudo observada por los lisímetros.



*Figura 16: Evaporación de suelo desnudo observada versus la evaporación potencial de suelo desnudo a partir de la metodología FAO de la ecuación 6.*

El coeficiente de determinación para la evaporación de suelo desnudo, respecto a la evaporación observada fue de 0.23 y su RMSE corresponde a 4.27 mm/día. Estos valores son bastante bajos para el caso de  $R^2$  y bastante alto en error, pero es importante

tener en consideración que el  $E_{so}$  es la evaporación potencial de suelo desnudo, es decir cuando este se encuentra en óptimas condiciones de humedad de suelo.

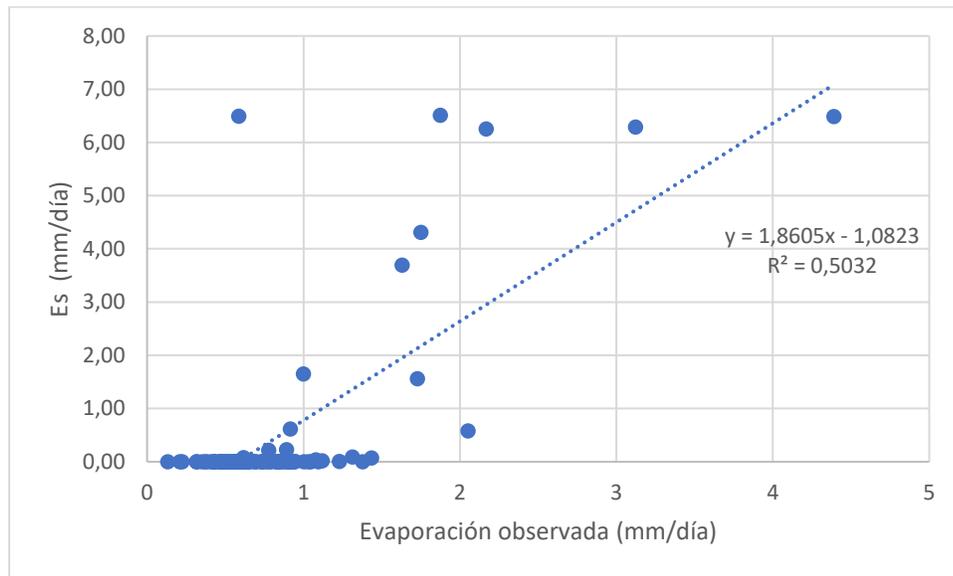


Figura 17: Evaporación de suelo desnudo observada versus la tasa real de evaporación de suelo desnudo a partir de la metodología FAO de la ecuación 10.

Para el caso de la tasa real de evaporación de suelo desnudo, los valores de  $R^2$  presentan una mejora respecto al caso anterior, alcanzando un valor de 0.50 y un RMSE de 1.25. A pesar de lo anterior se observa una clara tendencia a que la estimación de parte del modelo, tienda a cero y además una gran dispersión de datos. Es importante considerar que la metodología FAO, contempla la estimación a partir de valores estándares según el tipo de suelo, y evalúa en función de la profundidad de la capa de suelo que está sujeta al secado a través de la evaporación la cual corresponde a los primeros 10 a 15 cm de suelo (FAO, 2006).

## Discusión

Los resultados expuestos muestran que la propuesta de modelo que consiste en una modificación del modelo de van Genuchten (1980), proporciona resultados bastante asertivos a lo que fue la medición de evaporación de suelo desnudo por parte de los lisímetros de pesada de gran escala.

El modelo que predice en función del potencial hídrico a los 10 cm de profundidad fue el que presentó el mejor desempeño alcanzando con  $R^2$  de 0.82 y un error cuadrático medio de  $0.28 \text{ mm día}^{-1}$ . El modelo consigue modelar el comportamiento presentado por el set de datos (ver figura 13), si bien presenta algunas diferencias sobre todo en los valores más altos de evaporación, a nivel general logra dilucidar su comportamiento en el tiempo.

Es importante destacar, que las diferencias en los valores más altos de evaporación de suelo desnudo podrían estar viéndose afectados por el valor de entrada al modelo correspondiente a la  $E_{\max}$ , recordando que este valor fue de  $3.6 \text{ mm/día}$  (valor que fue obtenido como la máxima evaporación registrada con el set de datos de entrenamiento). Dicho valor podría ser ajustado y eventualmente corregir los valores de las evaporaciones máximas que son modeladas.

Respecto a mediciones de potencial hídrico a mayor profundidad, el modelo se mantiene relativamente estable hasta los 75 cm de profundidad, ya para la medición a los 140 cm de profundidad, el error comienza a ser mayor.

Se debe considerar que el modelo ha sido entrenado y validado con un suelo con características determinadas, correspondiente a un suelo del tipo franco. Dicha situación sería una limitación del modelo dado que se debería entrenar nuevamente el modelo con los parámetros de evaporación máximas y mínima, y los parámetros de suelo  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$ , para otro tipo de textura de suelo tales como suelo arenoso, arcillosos, y todas sus variantes.

Como anteriormente fue mencionado, una evaluación del modelo FAO para la estimación de la evaporación de suelo desnudo con mediciones reales de evaporación de suelo desnudo, indica que el método FAO logra valores con  $\pm 15\%$  de diferencia respecto a mediciones reales de evaporación de suelo desnudo (Mutziger et al., 2005). Dado lo anterior, se utilizó dicha metodología para tener un punto de comparación para el modelo propuesto. Al utilizar la metodología FAO, tanto como la evaporación potencial de suelo desnudo, como para la tasa real de evaporación de suelo desnudo, se evidenció que el modelo propuesto presenta un mejor desempeño al menos en las condiciones de suelo y de clima presentes en el área de estudio. Adicionalmente, el modelo FAO requiere una gran cantidad de datos meteorológicos y un amplio conocimiento de las características de suelo presente, y considera una superficie evaporante de los primeros 10 a 15 cms de suelo, omitiendo aportes de agua de capas más profundidad por capilaridad.

En otros estudios donde se propuso un modelo de evaporación de suelo desnudo a partir de las mediciones continuas de humedad de suelo mediante la utilización de hidrosondas, presentaron errores de  $1.3 \text{ mm día}^{-1}$ , respecto a mediciones de balance de energía (Ventura, Snyder, y Bali, 2006). Los autores destacan que esta metodología presentó mayores RMSE que modelos que utilizan balance de energía o mediciones de suelo para obtener el factor P ( $\text{RMSE } 0.6 \text{ mm día}^{-1}$ ), el cual corresponde a un factor que se utiliza para evaluar el final de la etapa de evaporación limitada por la energía, pero la técnica fue más simple y menos costosa (Ventura, Snyder, y Bali, 2006).

El error de la estimación de la evaporación de suelo desnudo mediante una modificación del modelo de van Genuchten es menor a lo observado en otros trabajos reportados, pero este método es comparado con mediciones reales de evaporación de suelo desnudo, por lo que sería preciso comparar ambas metodologías con la evaporación real de suelo desnudo registrada por lisímetros de pesada de gran escala. Al igual que la metodología que utiliza mediciones continuas de humedad de suelo (Ventura et al., 2006), el modelo propuesto en este estudio proporciona una técnica más sencilla y de menor costo para la estimación de la evaporación de suelo desnudo, ya que sólo se

necesitaría un sensor de medición de potencial hídrico o más conocido como tensiómetro, como fuente de datos de entrada al modelo.

El modelo modificado de van Genuchten (1980), al no considerar datos atmosféricos para proporcionar una predicción de la evaporación de suelo desnudo, podría presentar sobre estimaciones de las evaporaciones principalmente en aquellas estaciones del año donde la radiación solar percibida es menor. Durante los meses de invierno las precipitaciones proporcionan un aporte de agua al perfil de suelo, pero dado que para evaporar agua es necesaria energía disponible como la radiación (FAO, 2006), el agua que se encuentra disponible no podría ser evaporada en tasas elevadas o al menos tasas similares a las observadas en el presente estudio que abarco un periodo principalmente de verano.

Dado lo anterior, sería interesante gestar la calibración de este modelo para distintas condiciones de clima, por ejemplo, realizar optimización de los parámetros para verano, otoño, invierno y primavera. Es esperable que al menos los valores de  $E_{\text{máx}}$  y  $E_{\text{min}}$  cambien para cada una de las estaciones, siendo más altas en las estaciones de mayor radiación solar percibida y por el contrario menor evaporaciones en aquellas de menores radiaciones solares.

Adicionalmente, tener una optimización de los parámetros de suelo tales como  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$ , para otras clases texturales de suelo facilitaría la estimación para variadas condiciones de suelo y clima. Pero es importante considerar la dificultad que implica realizar un cambio de clase textural en el lisímetro de pesada de gran escala. Esto implicaría tener un lisímetro por cada clase textural para caracterizar un año completo de evaporaciones de suelo desnudo, y con ello considerar el alto costo de las unidades de lisímetro de gran escala.

## Conclusión

En este estudio se presentó una aplicación de la ecuación de van Genuchten que es utilizada para estimar la humedad de suelo y modelar la curva de retención de agua, con el objetivo de modelar la evaporación de suelo desnudo a partir de mediciones de potencial hídrico del suelo. En esta aplicación, se reemplazaron los valores de contenido de agua del suelo a saturación y residual por valores de evaporación máxima y mínima respectivamente. Adicionalmente se optimizaron los parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  de manera que se minimizara el error.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio (RMSE) fueron utilizados para cuantificar las diferencias entre los valores predichos y los valores medidos u observados de evaporación de suelo desnudo. Los valores de  $R^2$  para el modelo en la estimación de evaporación de suelo desnudo son superiores a 0.77 para las primeras cuatro profundidades de medición, siendo el valor más alto obtenido para la medición a los 10 cms de profundidad. Los valores de  $R^2$  y RMSE para la medición a 10 centímetros fueron los más altos y baja respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos con la metodología FAO (Allen et al., 1998; FAO, 2006), se evidenció que el modelo presentó un mejor desempeño en la estimación. A pesar de lo anterior, cabe destacar que la metodología FAO Penman Monteith (2006), realiza esta estimación con el objetivo de determinar un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para la etapa inicial de los cultivos anuales, etapa en la cual se asume que corresponde a suelo desnudo (entre 0 y 10% de cobertura vegetal) y con ello considera agua evaporable en los primeros 10 cm de suelo. Dicho esto, podría no estar siendo considerado el aporte de agua desde capas más profundas de suelo producido por capilaridad.

Esta aplicación del modelo de van Genuchten, permite la estimación de la evaporación de agua de suelo desnudo a partir de mediciones puntuales de potencial hídrico. Permite conocer la evaporación sin la necesidad de proporcionar una gran cantidad de

información al modelo, evitando así la recopilación de información meteorológica que en ocasiones es difícil de obtener y no siempre es confiable.

A pesar de lo anterior, se evidenciaron subestimaciones puntuales en aquellas instancias donde la evaporación real fue alta. Además, cuando al modelo le ingresan datos de potencial hídrico en profundidad, este ve reducida la capacidad de predicción de la evaporación de suelo desnudo. Lo anterior indica que la evaporación de suelo desnudo está dominada principalmente por las condiciones de humedad de los primeros centímetros de suelo y su interacción con la atmósfera circundante. Al estar más alejado de la superficie, las interacciones suelo atmósfera se vuelven prácticamente nulas.

Como continuación y validación de esta metodología, sería interesante conocer el comportamiento de la evaporación llevando al suelo a condiciones de saturación prolongada, con la finalidad de conocer el comportamiento de la curva con valores cercanos a cero y positivos de potencial hídrico (hPa) y así evidenciar si esta curva presenta un punto en el cual la evaporación se vuelve constante.

## Resumen

La evaporación de suelo desnudo es una variable importante para comprender las relaciones entre suelo y atmósfera, especialmente es una variable de gran importancia en aquellos estados iniciales del crecimiento de cultivo donde no hay vegetación presente. A pesar de lo anterior, la evaporación de suelo desnudo ha recibido comparativamente menor atención por parte de los investigadores en comparación con la evapotranspiración, puesto que las metodologías utilizadas para la estimación de la evaporación de suelo desnudo requieren de instrumental especializado y una caracterización detallada del suelo. En este trabajo se presenta un método que consiste en la aplicación de un modelo inspirado en la ecuación de van Genuchten (1980), para la estimación de la evaporación de suelo desnudo de textura franca. El modelo de van Genuchten (1980) representa la curva de retención hídrica de un suelo, es decir la relación entre el contenido de humedad y el potencial hídrico que permite mantener dicha humedad. Se espera que el comportamiento de la curva de retención de humedad sea similar a la curva de evaporación de un suelo desnudo (entendido como una superficie que tiene menos de un 10% de cobertura vegetal), por esta razón se aplica el modelo de van Genuchten (1980) tal una forma que permita estimar la evaporación del suelo desnudo a partir de mediciones del potencial hídrico del suelo o de succión. Para lograr lo anterior, se reemplazaron los valores de contenido de humedad de saturación del suelo ( $\theta_s$ ) y contenido de humedad residual del suelo ( $\theta_r$ ), por valores de evaporación máxima ( $E_{max}$ ) y mínima ( $E_{min}$ ) de un suelo desnudo, respectivamente. Mediante un procedimiento de optimización se determinaron los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  de la curva de retención de van Genuchten (1980), siguiendo el procedimiento de mínimos cuadrados. La ecuación ajustada entregó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,82 y un error cuadrático medio (RMSE) de 0,28 mm día<sup>-1</sup>. La estimación permite determinar la evaporación de suelo desnudo en meses de verano a partir de mediciones de potencial hídrico de manera sencilla y de bajo costo.

**Palabras Claves:** Evaporación de suelo desnudo, van Genuchten, lisímetros.

## Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). Crops evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*, 56.
- Campeche, L. F. S. M. (2002). *Determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.)*. 67.
- Campeche, L. F. S. M., Netto, A. O. A., Sousa, I. F., Faccioli, G. G., da Silva, V. de P. R., y de Azevedo, P. V. (2011). A large-scale weighting lysimeter. Part I: Development and calibration. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(5), 519–525. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500013>
- DGA. (2020). Dirección General de aguas. Retrieved October 5, 2020, from Información Oficial hidrometeorología y Calidad de Aguas en Línea website: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos. *Fao*, 56, 297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.042>
- Gil, P., Selles, G., Ferreyra, R., y Barrera, C. (2009). *Manual de riego para paltos y cítricos*. 146.
- Kirkham, R. R., Gee, G. W., y Jones, T. L. (1984). Weighing Lysimeters for Long-Term Water Balance Investigations at Remote Sites. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 1203–1205. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050051x>
- Mariano, D. de C., de Faria, R. T., de Freitas, P. S. L., Lena, B. P., y Johann, A. L. (2015). Construção e calibração de lisímetros de barras de pesagem. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 37(3), 271–278. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19368>
- Monteith, J. L. (1965). Monteith.1965a. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, (19), 205–234.
- Mutziger, A. J., Burt, C. M., Howes, D. J., y Allen, R. G. (2005). Comparison of Measured and FAO-56 Modeled Evaporation from Bare Soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 59–72. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2005\)131:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2005)131:1(59))
- Quinn, R., Parker, A., y Rushton, K. (2018). Evaporation from bare soil: Lysimeter experiments in sand dams interpreted using conceptual and numerical models. *Journal of Hydrology*, 564, 909–915. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.011>
- Snyder, R. L., Bali, K., Ventura, F., y Gomez-MacPherson, H. (2000). Estimating

evaporation from bare or nearly bare soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:6\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:6(399))

Staple, W. J. (1974). Modified Penman Equation to Provide the Upper Boundary Condition in Computing Evaporation from Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 38(5), 837–839. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800050038x>

Ventura, F., Snyder, R. L., y Bali, K. M. (2006). Estimating Evaporation from Bare Soil Using Soil Moisture Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2), 153–158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:2\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:2(153))

Yang, X., y You, X. (2013). Estimating parameters of van genuchten model for soil water retention curve by intelligent algorithms. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 7(5), 1977–1983. <https://doi.org/10.12785/amis/070537>

