



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA**

SECCIÓN DE INGENIERÍA AGRARIA

**GRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DEL MEDIO
RURAL**

**Evaluación del modelo HYDRUS-2D para la simulación
del movimiento del agua en el suelo de un cultivo
intensivo de plátanos en el Norte de Tenerife**

ALEJANDRO DORTA ESTÉVEZ

San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2019

**AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO
POR SUS DIRECTORES
CURSO 2018/2019**

DIRECTOR – COORDINADOR: Dr. Axel Ritter Rodríguez

DIRECTOR: Dr. Carlos M. Regalado Regalado

Como director/es del alumno/a: Alejandro Dorta Estévez, en el TFG titulado:

Evaluación del modelo Hydrus-2D para la simulación del movimiento del agua en el suelo de un cultivo intensivo de plátanos en el Norte de Tenerife, nº de Ref.: 4.

doy/damos mi/nuestra autorización para la presentación y defensa de dicho TFG, a la vez que confirmo/confirmamos que el alumno ha cumplido con los objetivos generales y particulares que lleva consigo la elaboración del mismo y las normas del Reglamento de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

La Laguna, a de septiembre de 2019

Fdo. Dr. Axel Ritter Rodríguez

Fdo. Dr. Carlos M. Regalado Regalado

SR. PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE TRABAJO FIN DE GRADO

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y a toda mi familia, gracias por apoyarme durante la etapa académica que hoy culmina. Agradecer en especial a los tutores, Axel y Carlos, por su encomiable apoyo durante la realización de este trabajo. A esos profesores que durante mi etapa académica me han enseñado a cuestionar e ir más allá de lo abordado en sus clases. A mis compañeros y amigos que han hecho de esta etapa universitaria un periodo para el recuerdo.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 EL CULTIVO DEL PLÁTANO EN CANARIAS	6
3.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DE CANARIAS	7
3.3 LA CONTAMINACIÓN POR NITRATOS EN TENERIFE.....	9
3.4 MODELOS DE SIMULACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.....	12
4. MATERIAL Y MÉTODOS	14
4.1 PARCELA DE CULTIVO	15
4.2 DISPOSITIVO PARA LA RECOGIDA DE LOS DATOS DE HUMEDAD DEL SUELO	17
4.3 RECOGIDA DE DATOS METEOROLÓGICOS	19
4.4 MATLAB.....	20
4.5 CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DE HUMEDAD DEL SUELO	21
4.5.1 ELIMINACIÓN DE VALORES ATÍPICOS	23
4.6 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ET_0).....	25
4.6.1 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	25
4.6.2 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EMPLEANDO EL PROGRAMA PMETP-W.....	27
4.7 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_c).....	30
4.8 CÁLCULO DE LA TRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN POTENCIAL	32
4.9 CÁLCULO DE LOS TIEMPOS DE RIEGO	34
4.10 PARÁMETROS DEL SUELO	36
4.10 MODELADO DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO.....	37
4.10.1 HYDRUS-2D	37

4.10.2 ECUACIÓN DE FLUJO	37
4.10.3 EXTRACCIÓN DE AGUA POR LA PLANTA	38
4.10.4 MODELO HIDRÁULICO DEL SUELO.....	38
4.10.5 SIMULACIÓN INVERSA.....	39
4.10.6 USO DEL MODELO DE SIMULACIÓN	40
4.11 PLAN DE TRABAJO.....	51
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
5.1 LECTURAS CORREGIDAS DE LOS TDR DEL SECTOR Nº 2.....	54
5.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	55
5.3 VALORES DE ET_o , ET_c , EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN POTENCIAL	59
5.4 SIMULACIONES Y PROCESOS DE CALIBRADO	61
5.4.1 SIMULACIONES CON PARÁMETROS INICIALES.....	61
5.4.2 SIMULACIÓN CON COEFICIENTES DE CULTIVO FAO	68
5.5 REFORMULACIÓN DEL PROBLEMA	75
6. CONCLUSIONES	76
7. BIBLIOGRAFÍA	79
8. APÉNDICES	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Secuencias altitudinales de suelos de la vertiente norte.	8
Figura 2: Mapa de suelos de Tenerife (1982).....	8
Figura 3: Zona afectada por la contaminación por nitratos.....	10
Figura 4: Ubicación de la parcela “Pajalillos”.....	15
Figura 5: Distribución del cultivo en la parcela. Fuente: Informe anual del proyecto IDEASS (SC99-024-C2)	16
Figura 6: Foso para la toma de datos.....	17
Figura 7: Relación de ε_c versus contenido de humedad según la ecuación “universal” de Topp y la propuesta por Regalado et al., (2001) específica para el suelo de Pajalillos.....	23
Figura 8: Representación de los valores obtenidos en campo frente a las lecturas corregidas para la eliminación de outliers.	24
Figura 9: Interfaz de la aplicación PMETp-w (ver.1.40).....	27
Figura 10: Ventana de entrada de datos meteorológicos.....	28
Figura 11: Ventana de entrada de parámetros.....	28
Figura 12: Ventana de resultados.	29
Figura 13: Evolución mensual del coeficiente de cultivo, K_c , a lo largo del año.	31
Figura 14: Evolución de los valores de LAI a lo largo del año.....	33
Figura 15: Tiempos de riego obtenidos para el periodo de estudio.....	35
Figura 16: Ventana inicial de HYDRUS-2D v2.05.	40
Figura 17: Ventana de selección de procesos.....	41
Figura 18: Ventana de introducción de la información geométrica.....	41
Figura 19: Ventana de introducción de información de tiempo.....	42
Figura 20: Ventana de criterios de iteración.....	42
Figura 21: Parámetros de la ecuación de van Genuchten-Mualem.....	43
Figura 22: Ventana de introducción de información geométrica.....	43
Figura 23: Ventana de discretización espacial.	44
Figura 24: Parámetros del modelo de Feddes.	45
Figura 25: Ventana de introducción de los registros variables.	46
Figura 26: Ventana para la introducción de los nodos de observación.	47
Figura 27: Ventana para la introducción de los horizontes del suelo.	48

Figura 28: Condiciones de contorno.....	49
Figura 29: Menú para la optimización inversa.	50
Figura 30: Introducción de las lecturas de humedad para el proceso de optimización inversa.....	51
Figura 31: Lecturas de humedad volumétrica de suelo (corregidas) para el sector nº 2.....	54
Figura 32: Promedio mensual de temperaturas diarias..	56
Figura 33: Promedio mensual de humedades relativas diarias.	57
Figura 34: Promedio mensual de radiación global media diaria.	58
Figura 35: Precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica "Pajalillos" del ICIA. Periodo 28/02/2000 - 16/02/2001.....	59
Figura 36: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración para el periodo 28/2/2000 – 16/2/2001.	60
Figura 37: Valores de ET_c mensuales (28/02/2000 – 16/02/2001).....	60
Figura 38: Resultados con parámetros iniciales.....	62
Figura 39: Simulación con parámetros obtenidos por calibración.	64
Figura 40: Resultados con parámetros iniciales, aumentando valores de K_c ..	67
Figura 41: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración con coeficientes FAO.....	70
Figura 42: Valores de ET_c mensuales, coeficientes FAO (28/02/2000 – 16/02/2001).	70
Figura 43: Resultados con modelo calibrado a partir de coeficientes FAO.	72
Figura 44: Condiciones de contorno con flujo variable en un área de 5 cm de radio.	74
Figura 45: Resultados de simulación con entrada de agua de 10 cm.	74
Figura 46: Nuevo dominio a simular.....	75
Figura 47: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº1.....	90
Figura 48: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº3.....	91
Figura 49: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº4.....	92
Figura 50: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº5.....	93
Figura 51: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº6.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de superficie cultivada en Tenerife.	6
Tabla 2: Valores de K_c para el cultivo de platanera. Fuente:	31
Tabla 3: Función LAI para el cultivo de platanera (cv. Pequeña Enana).	33
Tabla 4: Parámetros del suelo de la parcela.....	36
Tabla 5: Contenidos de humedad registrados el 28/02/2000.	47
Tabla 6: Temperaturas mensuales medias, máximas y mínimas.	55
Tabla 7: Humedades relativas mensuales medias, máximas y mínimas.	56
Tabla 8: Valores promedios mensuales de radiación global media diaria.	57
Tabla 9: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración para el periodo 28/2/2000 – 16/2/2001.	59
Tabla 10: Parámetros obtenidos por simulación inversa.	63
Tabla 11: Estadísticos de ajuste del modelo, calibración nº1.	65
Tabla 12: Valores tabulados de K_c (FAO).	69
Tabla 13: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración con coeficientes FAO.	69
Tabla 14: Simulación inversa con parámetros de cultivo FAO.....	70
Tabla 15: Estadísticos de ajuste del modelo, calibración nº 2.	73
Tabla 16: Parámetros del proceso de calibrado.	95

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Foso de muestreo. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2) .	18
Fotografía 2: Pluviómetro empleado para la recogida del volumen de riego. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2).....	20
Fotografía 3: Detalle del bulbo húmedo. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2)	49

EVALUACIÓN DEL MODELO HYDRUS-2D PARA LA SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO DE UN CULTIVO INTENSIVO DE PLÁTANOS EN EL NORTE DE TENERIFE

Autores: Dorta Estévez, A., Ritter Rodríguez, A., Regalado Regalado, C.M.

Palabras clave: HYDRUS-2D, optimización inversa, Andisol, platanera, riego localizado, zona no saturada.

Resumen

En la actualidad, la preservación de los recursos hídricos en condiciones aptas para su consumo, además de su correcta gestión, son aspectos de vital importancia en territorios insulares, donde estos recursos no son abundantes. El consumo del sector agrícola representa del orden de un cuarenta por ciento del uso del agua en la isla de Tenerife, destinándose un sesenta por ciento al cultivo del plátano. El correcto manejo del riego en este cultivo es por tanto una pieza clave para garantizar el ahorro de agua, además de minimizar la potencial contaminación de los acuíferos por nitratos procedentes de la actividad agraria. Para esta tarea se puede hacer uso de modelos matemáticos de simulación de la dinámica del agua en el suelo, aunque su empleo requiere de ensayos previos de campo con el objetivo de evaluar su aplicabilidad en unas condiciones concretas. En este trabajo se ha empleado el modelo HYDRUS-2D, con el objetivo de simular el movimiento de agua en un cultivo intensivo de plátanos (Gran Enana, Gruesa Palmera y Zelig) bajo invernadero en el norte de Tenerife. El invernadero contaba con una instalación de riego por goteo y un suelo con propiedades ándicas procedente de sorriba. La humedad de suelo se midió en continuo durante un año en un foso instrumentado con 4x6 sondas TDR (Reflectometría en el Dominio Tiempo) insertadas a diferentes profundidades (15, 35, 55, 70 cm). Los parámetros del modelo de Mualem-van Genuchten se determinaron mediante simulación inversa, empleando las lecturas de humedad edáfica recogidas durante un periodo de cien días. Los resultados experimentales se compararon con los obtenidos por el modelo, mostrando una baja correlación debido a una mala definición de los parámetros de cultivo, además de la simplificación resultante del empleo de un modelo bidimensional.

EVALUATION OF THE HYDRUS-2D MODEL FOR THE SIMULATION OF WATER MOVEMENT IN THE SOIL OF AN INTENSIVE BANANA CROP IN THE NORTH OF TENERIFE

Authors: Dorta Estévez, A., Ritter Rodríguez, A., Regalado Regalado, C.M.

Keywords: HYDRUS-2D, inverse modeling, drip irrigation, vadose zone, banana, Andisol.

Abstract

Nowadays, the preservation of water resources in conditions suitable for consumption, in addition to their proper management, are aspects of vital importance in island territories, where these resources are not abundant. The consumption of the agricultural sector represents about forty percent of the use of water on the island of Tenerife, with sixty percent being used for banana cultivation. The correct management of irrigation in this crop is therefore a key piece to guarantee water savings, in addition to minimizing the potential contamination of aquifers by nitrates from agricultural activity. For this task, mathematical simulation models of soil water dynamics can be used, although their use requires prior field tests in order to assess their applicability in specific conditions. In this work, the HYDRUS-2D model has been used, with the aim of simulating the movement of water in an intensive cultivation of bananas (Grand Nain, Gruesa Palmera and Zelig) under greenhouse in the north of Tenerife. The greenhouse had a drip irrigation facility and a soil with Andic properties from "sorriba". Soil moisture was measured continuously for one year in a pit instrumented with 4x6 TDR (Time Domain Reflectometry) probes inserted at different depths (15, 35, 55, 70 cm). The parameters of the Mualem-van Genuchten model were determined by inverse simulation, using the soil moisture readings collected over a period of one hundred days. The experimental results were compared with those obtained by the model, showing a low correlation due to a poor definition of the culture parameters, in addition to the simplification resulting from the use of a two-dimensional model.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la concienciación de los agricultores canarios en materia de gestión de los recursos hídricos ha ido en aumento debido, en parte, al trabajo ejercido desde las diferentes instituciones del gobierno. Este ha consistido, entre otros aspectos, en la difusión de nuevas técnicas de manejo, aplicación de nuevas tecnologías y el fomento de instalaciones de riego localizado. Del mismo modo, la legislación para la conservación de los recursos hídricos se ha vuelto más restrictiva y ha condicionado la concesión de ayudas provenientes de la UE. Como consecuencia, se han definido varias zonas vulnerables a lo largo de la geografía española, cuyo interés es la preservación de sus recursos hídricos subterráneos en condiciones aptas para el consumo humano frente a la contaminación procedente de las malas prácticas agrícolas. Gran parte del problema está relacionado con las elevadas concentraciones de nitratos presentes en estas aguas, que acarrearán problemas para los seres humanos y el medio ambiente. Para la disminución y cuantificación de estos problemas, en uno de los cultivos con mayor consumo de agua de las islas y con altos requerimientos de abonos nitrogenados, como es el plátano, el empleo de modelos de simulación de la dinámica de agua del suelo puede resultar de gran ayuda.

Estos modelos cuentan con un amplio abanico de posibilidades, permitiendo la realización de simulaciones del movimiento del agua y la respuesta de la planta, transporte de solutos, movimiento de pesticidas en el suelo, salinización, diseño de sistemas de riego, etc. Cuentan con entornos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. Su calibración no es una cuestión baladí, requiriendo esta una gran cantidad de parámetros, de cuya correcta determinación dependerá la bondad de los resultados obtenidos. Cabe destacar el continuo desarrollo al que se encuentran sometidos estos modelos, con la adición, con relativa frecuencia, de nuevas funcionalidades, que facilitan utilización en ámbitos industriales y científicos.

Su empleo en el cultivo de plátanos cuenta con poco recorrido. Es por ello, por lo que en este trabajo se evalúa la aplicación del modelo **HYDRUS-2D** para la simulación de la dinámica del agua en un cultivo de plátanos en el norte de Tenerife.

2. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden alcanzar en este Trabajo de Fin de Grado son los siguientes:

- 1) Revisión y tratamiento de los datos obtenidos en el marco del proyecto de investigación IDEASS (SC99-024-C2) para su utilización en el modelo de simulación HYDRUS-2D.

- 2) Evaluar la posibilidad de usar el modelo HYDRUS-2D para la simulación de la dinámica de agua en el continuo atmósfera-planta-suelo en un cultivo intensivo de plátanos en el Norte de Tenerife como herramienta para el correcto manejo del riego localizado.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 EL CULTIVO DEL PLÁTANO EN CANARIAS

La explotación del plátano en Canarias comenzó a finales del siglo XIX. Su cultivo ocupa uno de los primeros puestos por superficie cultivada, situado por detrás de la viña. La producción se concentra en un 44% en la isla de Tenerife, 33% en La Palma y 20% en Gran Canaria, según datos del Instituto Canario de Estadística (ISTAC). El cultivo se caracteriza por llevarse a cabo en bancales o sorribas de suelo transportado, que facilitan las labores de riego, dada la accidentada topografía del paisaje canario. La altitud máxima de cultivo es de 300 m.s.n.m., siendo característico de las zonas bajas de la isla, destacando entre ellas el Valle de La Orotava o el municipio de Icod de Los Vinos. La mayor parte de la producción, un 79% de la misma, se realiza al aire libre. El montante de producción asciende a las 437.782 toneladas, según datos del 2017.

Tabla 1: Datos de superficie cultivada en Tenerife. Fuente: Mapa de Cultivos de Tenerife - Año 2016

Mapa de cultivos de Tenerife			
Cultivo	Año 2008 (ha)	Año 2016 (ha)	Diferencia (ha)
Huerta	6.488,45	7.558,56	1.070,11
Viña	4.230,86	3.193,33	-1.037,53
Ornamentales	479,84	365,05	-114,79
Tomate	681,63	216,65	-464,98
Frutales	1.401,09	1.835,64	434,55
Platanera	3.901,37	3.934,19	32,82
Pastizal	180,01	196,21	16,20
Sin cultivo	20.614,07	20.977,77	363,70
Resto de superficies	163.794,88	163.717,23	-77,65
Otros	1.039,53	817,11	-222,42
TOTAL	202.811,73	202.811,74	

La superficie de cultivo se ha mantenido estable en los últimos diez años debido, en parte, a las ayudas provenientes de la Unión Europea.

En la actualidad, destaca el uso de variedades comerciales como Brier, Gran Enana, Pequeña Enana, Zelig o Gruesa Palmera. Los mayores enemigos de su cultivo en las islas son el picudo de la platanera (*Cosmopolites sordidus*) y el mal de Panamá, causado por el hongo *Fusarium oxysporum*.

Una de las críticas hacia este cultivo es su elevado consumo de agua, con requerimientos que superan los 1200 milímetros al año, siendo este de alrededor del 60% del agua de uso agrícola de la isla. También se le atribuye la elevada contaminación por nitratos de origen agrario que sufren algunos acuíferos, debido a la alta demanda de este elemento que presenta el cultivo, con necesidades que superan los 225 gramos de nitrógeno por planta y año. El aporte de nitrógeno debe realizarse de manera reiterada a lo largo de todo el año, debido a que la planta no presenta un parón vegetativo en época invernal. Es por esto, por lo que se debe realizar un correcto manejo del riego durante todo el año para evitar la lixiviación del nitrógeno hacia el acuífero.

3.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DE CANARIAS

La agricultura intensiva en Canarias, donde se engloba el cultivo del plátano, se caracteriza por llevarse a cabo en sorribas. En concepto de sorriba hace referencia a una superficie de cultivo formada a partir de suelos procedentes de otras partes de la isla. En Tenerife, se suelen emplear suelos de zonas de medianías y partes altas, ubicadas en el norte. Estos suelos son de origen volcánico, ricos en materia orgánica y de características ándicas. Se designan con el nombre de Andisoles, antiguamente incluidos en el grupo de los Inceptisoles (Soil Survey Staff, 1975).

En lo que respecta a su distribución, los Andisoles más evolucionados o alofánicos se asocian con las zonas húmedas de la vertiente norte de la isla (900 – 1600 m.s.n.m), influenciadas por los alisios. Los Andisoles más jóvenes o vítricos, se asocian a cotas superiores de los 1600 m.s.n.m. (Santamarta et al., 2013).

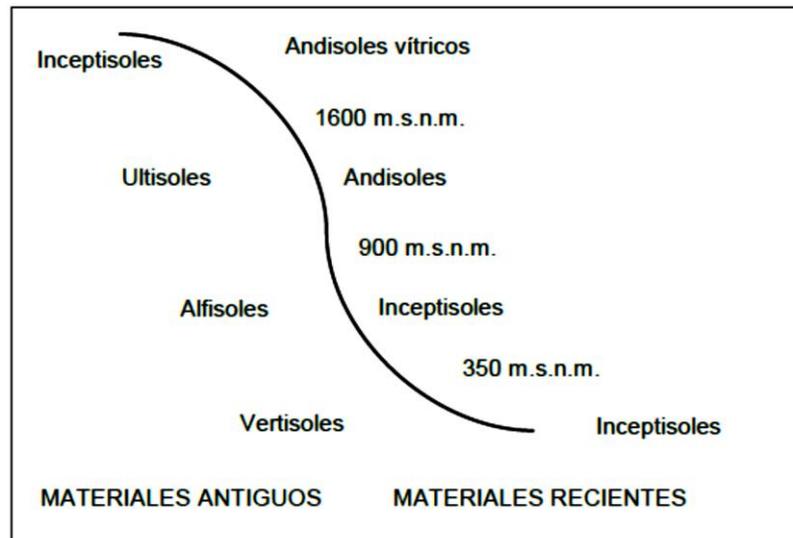


Figura 1: Secuencias altitudinales de suelos de la vertiente norte. Fuente: Santamarta et al., (2013)

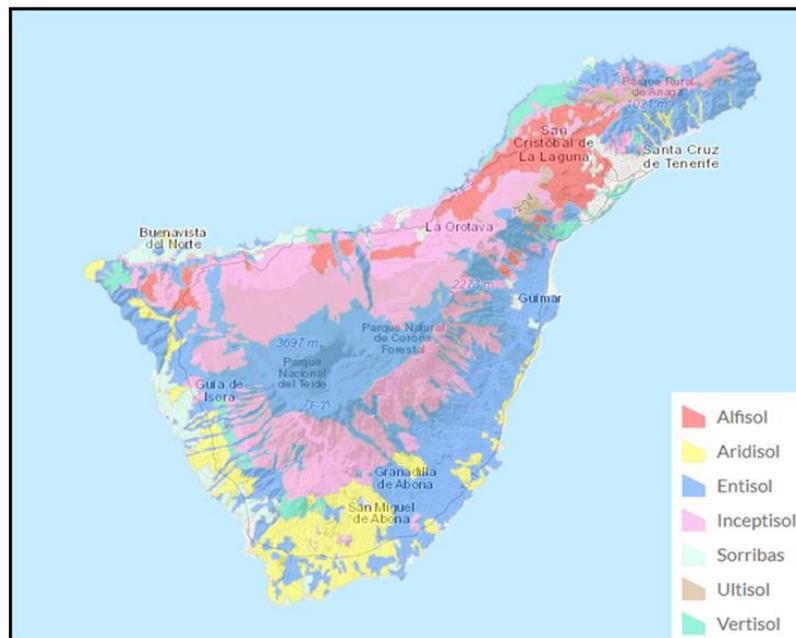


Figura 2: Mapa de suelos de Tenerife (1982). Fuente: Tenerife Soil Taxonomy

Su densidad aparente es baja, con valores entre 0,85-1 g/cm³. También destaca la elevada porosidad (60 - 80%) y superficie específica (valores que pueden llegar a los 1000 m²/g), (Regalado et al., 2001). Las principales características desde el punto de vista agronómico que presentan estos suelos son (Armas et al., 2001):

- Alta capacidad de retención de fósforo.
- Elevada fertilidad, a excepción de su bajo contenido en fósforo.
- Tolerancia a la salinidad.
- Elevada estabilidad estructural, debida a la estabilidad de los agregados, que le confiere una alta resistencia a la erosión hídrica.
- Valores de pH inferiores a la neutralidad.
- Liberación rápida de agua a bajos potenciales frente a una elevada retención a altos potenciales.

Estas propiedades pueden variar según el grado de desarrollo que presente el suelo, viéndose acentuadas en suelos con mayor desarrollo.

La obtención de los parámetros físicos de estos suelos a través de funciones de pedotransferencia (PTFs) y valores texturales arroja diferencias significativas a la hora de estimar parámetros de densidad aparente, retención de humedad a diferentes potenciales y la conductividad hidráulica (Armas et al., 2001).

3.3 LA CONTAMINACIÓN POR NITRATOS EN TENERIFE

Actualmente, las masas de agua que se encuentran afectadas por este tipo de contaminación en la isla de Tenerife según el Decreto 49/2000, publicado en el BOC nº048, son las referentes al acuífero costero del Valle de La Orotava. En él se especifican también zonas cuya escorrentía o filtración puede afectar al acuífero, estas son: La Orotava, Puerto de la Cruz y Los Realejos, por debajo de la cota de los 300 metros de altitud.



Figura 3: Zona afectada por la contaminación por nitratos. Fuente: MITECO

La definición de estas áreas vulnerables, la creación de un código de buenas prácticas agrarias y del Programa de Actuación son el resultado de la incorporación al ordenamiento jurídico español de la Directiva 91/676/CEE, concretamente en el Real Decreto 261/1996, referente a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias.

El concepto de contaminación se encuentra definido en la Directiva del Consejo 91/676/CEE como:

“La introducción de compuestos nitrogenados de origen agrario en el medio acuático, directa o indirectamente, que tenga consecuencias que puedan poner en peligro la salud humana, perjudicar los recursos vivos y el ecosistema acuático, causar daños a los lugares de recreo u ocasionar molestias para otras utilidades legítimas de las aguas.” [1]

En el ser humano, cantidades elevadas de nitratos en agua pueden producir problemas en la circulación sanguínea, casos de metahemoglobinemia y diversas patologías en lactantes.

Elevados niveles de nitrógeno en las aguas pueden causar serios problemas de eutrofización en el medio natural, llevando consigo la aparición de

gran cantidad de organismos simples y plantas, debido a la elevada cantidad de nutrientes, que al morir son descompuestos por los microorganismos. Este proceso consume una gran cantidad del oxígeno disuelto en el agua, lo cual dificulta la vida de otros seres vivos, además de generar malos olores. El resultado final es la disminución de la calidad y potabilidad del agua, junto con un cambio en las condiciones ambientales del entorno, al verse modificado el ecosistema acuático. El resultado final es un medio anóxico donde crecen bacterias que producen toxinas peligrosas para los seres humanos y diversos animales.

Para evitar estos problemas se establece un límite máximo en la cantidad de nitratos en agua, la cual no puede superar los 50 mg/l de ion nitrato. Aunque se emplea una concentración de 25 mg/l como nivel recomendado.

El último Plan de Actuación aprobado por parte de la Comunidad Autónoma, Orden de 19 de mayo de 2009, es de obligado cumplimiento para los agricultores y ganaderos que desarrollen sus actividades en las zonas vulnerables y perciban subvenciones europeas. Dicho plan hace hincapié en la obligación del empleo de sistemas de riego localizado (goteo, microaspersión o aspersión) en parcelas cuya superficie sea mayor a 1 ha, que permitan la aplicación controlada de diferentes volúmenes de agua. También se enfatiza la realización de los riegos acorde a las necesidades del cultivo, a través del apoyo en diferentes herramientas para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (aplicaciones para el cálculo de la ET_c , registros de estaciones meteorológicas, sensores, etc.). La cantidad de agua que se aplique en cada riego debe acomodarse a la capacidad de retención del suelo de la parcela, para evitar pérdidas de agua lejos del alcance de las raíces, evitando así la lixiviación de los elementos nutritivos móviles.

Es en esta materia donde el empleo de un modelo de simulación calibrado para las condiciones de cultivo puede servir de gran ayuda a la hora de evitar el arrastre de iones nitrato y el aumento de la contaminación, ayudando también en el ahorro de agua.

3.4 MODELOS DE SIMULACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

El avance en materia de modelos de simulación para la dinámica del agua en el suelo ha sido notable en los últimos años, siendo contrastada su eficacia en diferentes escenarios, los cuales abarcan desde la simulación de bulbos húmedos para el diseño agronómico (Skaggs et al., 2004), transporte de solutos (Wang et al., 2016) y manejo del riego (Morillo et al., 2015).

Algunos de los modelos más empleados para simular los procesos que tienen lugar en la zona no saturada del suelo, también conocida como “*Vadose zone*”, en inglés, los podemos encontrar en el siguiente portal web: <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal>

Entre ellos, a excepción del empleado para la realización de este trabajo, cabe destacar los siguientes:

- WAVE (Water and Agrochemicals in the soil, crop and Vadose Environment): es un modelo unidimensional capaz de simular el movimiento en dirección vertical de agua, calor y agroquímicos en el suelo, desarrollado en la Universidad Católica de Lovaina por Vanclooster M., P. Viaene, K. Christiaens y S. Ducheyne. Ha sido empleado con éxito por Ritter et al., (2001) y Muñoz-Carpena et al., (1999), entre otros.
- SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plant): desarrollado por investigadores de la Universidad de Wageningen, es capaz de simular el transporte de agua, solutos y calor de manera unidimensional en la zona no saturada, teniendo en cuenta la interacción de la vegetación. Emplea la ecuación de Richards incluyendo en ella un término para la extracción de agua por las raíces. Incluye un módulo detallado de flujo a través de macroporos en suelos arcillosos y turberas. El modelo se encuentra diseñado para simular dichos procesos a pequeña escala o durante largas series temporales. Ha sido empleado en cultivos mediterráneos por Blanda et al., (2008).
- DIDAS (Drip Irrigation Design and Scheduling): es un paquete informático desarrollado por el Departamento de Física Ambiental y Riegos de la Organización para la Investigación Agrícola de Israel. Fue concebido

como herramienta de ayuda para el diseño de instalaciones de riego localizado, además de la programación de riegos.

Su aplicación no se limita solo al ámbito agrícola, contando con diversas funcionalidades para su empleo en diversas labores, como lo son:

- Simulación de percolación profunda en lugares de gestión de residuos radiactivos.
- Rellenos sanitarios.
- Flujo alrededor de objetos enterrados (diseño de túneles, etc.)
- Análisis de la filtración para el diseño y construcción de carreteras.
- Análisis de recarga de cuencas.
- Interacción entre acuíferos subterráneos y arroyos.
- Impacto ambiental de la extracción de capas de aguas poco profundas.

El empleo de estos modelos requiere un amplio conocimiento previo de su funcionamiento, además de un alto nivel de abstracción, para la posterior definición de los parámetros de entrada, condiciones de contorno, simulación de diferentes escenarios, etc.

Algunas experiencias con modelos de simulación en un cultivo de plátanos son las descritas por Ritter et al., (2001), Muñoz-Carpena et al., (1999) y Sansoulet et al., (2008).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 PARCELA DE CULTIVO

La recogida de datos se llevó a cabo en una parcela ubicada en Valle Guerra, perteneciente al Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), denominada como “Pajalillos”.



Figura 4: Ubicación de la parcela “Pajalillos”. Fuente: IDE Canarias

En esta parcela se encuentra un invernadero con cubierta plástica destinado al cultivo de plátanos con una superficie que ronda los 850 m² (33,3 x 25,5 m). Los datos se generaron en el marco del proyecto de investigación IDEASS (SC99-024-C2), financiado por el INIA, durante el periodo 1999 - 2001.

El cultivo de platanera en la parcela empezó alrededor de los años 80 y a partir de los 90 bajo invernadero. A lo largo de este periodo se fueron renovando los cultivares cada 4-6 años (Gran Enana, Gruesa y Zelig), empleando ejemplares obtenidos de cultivo “*in vitro*”.

Las plantas se encontraban distribuidas en siete líneas pareadas con una separación de 1,5 m entre las plantas de la misma fila y 0,5 m entre las plantas de las líneas pareadas. El total de plantas por cada fila rondaba las 12-14 plantas/fila. El total de ejemplares era de 170. El invernadero consta de un pasillo de 4-4,5 m de ancho.

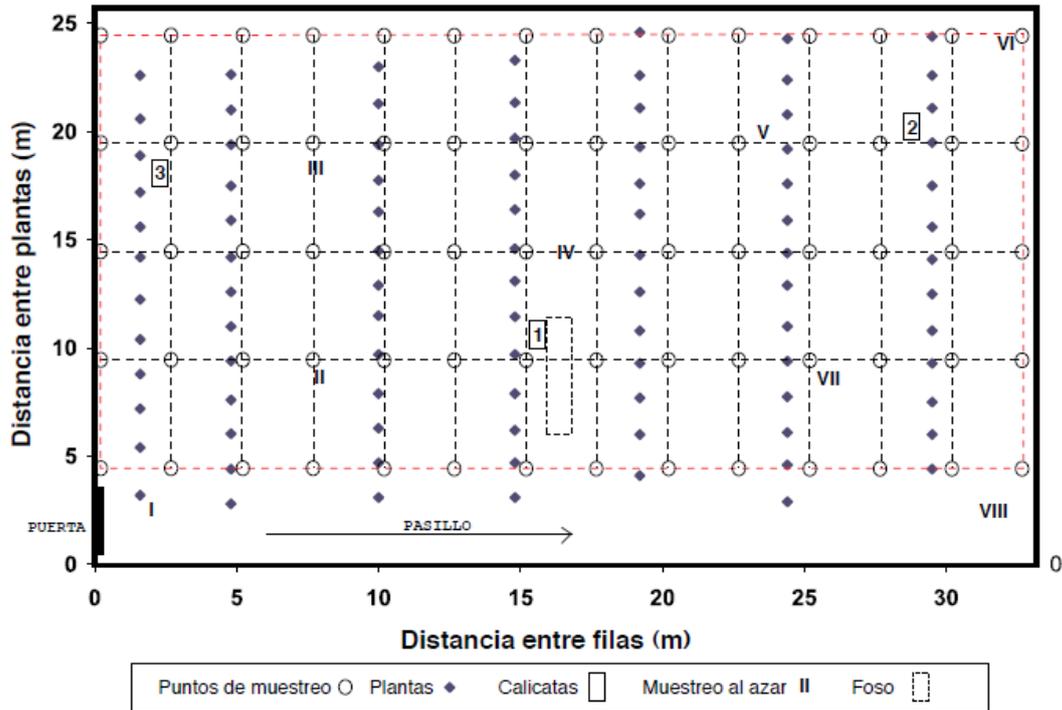


Figura 5: Distribución del cultivo en la parcela. Fuente: Informe anual del proyecto IDEASS (SC99-024-C2)

El suelo del invernadero es un suelo transportado desde las medianías de la zona norte de la isla de Tenerife, a unos 500 – 900 m de altitud. Se caracteriza por tener propiedades ándicas, abundante fertilidad y carácter arcilloso. La capa superficial de suelo se estableció sobre uno proveniente de sorriba en el año 1981.

La instalación de riego de riego localizado de la parcela estaba compuesta por líneas pareadas de goteros interlínea de 4 l/h en las filas de los extremos y de 2 l/h en las líneas del interior de la parcela. La separación entre los goteros era de 0,5 m. La instalación de riego constaba de:

$$46 \text{ goteros/lateral} \times 10 \text{ laterales (2 l/h)} = 460 \text{ goteros (2 l/h)}$$

$$46 \text{ goteros/lateral} \times 4 \text{ laterales (4 l/h)} = 184 \text{ goteros (4 l/h)}$$

Dicha instalación de riego fue sometida a una evaluación para la determinación del coeficiente de uniformidad, siendo este de un 93,8%, con caudales promedio de 2,07 l/h para los goteros de 2 l/h y 4,02 l/h para los goteros de 4 l/h.

Se realizaba un riego diario de lunes a viernes en época de verano, siendo la frecuencia menor en invierno, dependiendo de las condiciones climáticas. Los tiempos de riego oscilaban entre 1-2 horas/día, recibiendo las plantas una cantidad de agua de 6-12 l/planta, en la zona interior, y 12-24 l/planta las ubicadas en las filas de los extremos. Cada planta recibía agua proveniente de 3 emisores.

4.2 DISPOSITIVO PARA LA RECOGIDA DE LOS DATOS DE HUMEDAD DEL SUELO

Para la toma de datos del movimiento de agua y solutos en la zona no saturada del suelo se empleó un foso de acero galvanizado de 4 m de longitud, 1 m de anchura y 0,9 m de profundidad.

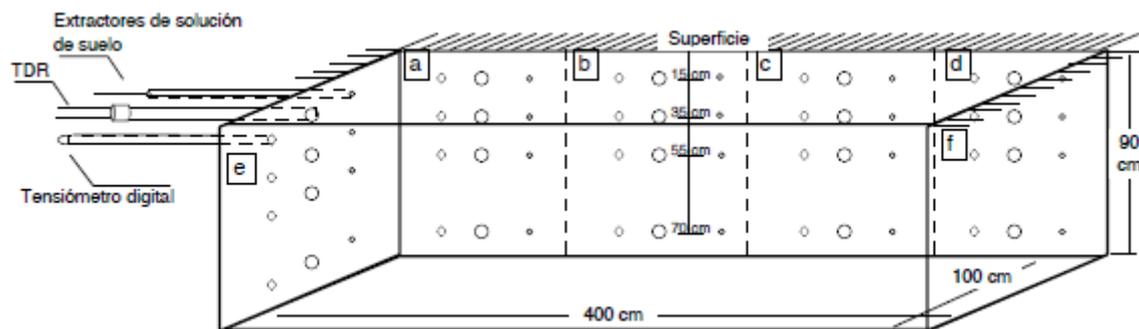


Figura 6: Foso para la toma de datos. Fuente: Informe anual del proyecto IDEASS (SC99-024-C2)

Dicho foso se dividió en seis sectores de idéntica longitud (1 x 0,9 m), con instrumentación a 15, 35, 55 y 70 cm de profundidad. Se hizo uso de una sonda TDR, tensiómetro digital y muestreador de la solución del suelo por cada nivel de profundidad y sector. Los sectores e, a, b, c, d, y f se denominarán 1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente.

El modelo de TDR empleado consta de una sonda P2 conectada a un equipo portátil TRIME-FM de la serie TRIME TDR System (*Imko GmbH, Ettlingen, Germany*).



Fotografía 1: Foso de muestreo. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2)

Se registraron valores de contenido de humedad desde el 21/02/2000 hasta el 28/02/2001. Sin embargo, hay sectores en los que el comienzo del registro se inició días más tarde. Los valores de potencial matricial se registraron del 27/10/2000 al 31/10/2001. Esto conlleva emplear solo las medidas tomadas por los TDR para su uso en el modelo de simulación, debido a la ausencia de medidas obtenidas con los tensiómetros para los periodos de mayor variación del contenido de humedad, como el verano. También se registraron las lecturas del volumen de agua empleado para cada riego, mediante un contador volumétrico ubicado en la entrada de la parcela.

Tras la revisión de los datos de lluvia se decidió no tenerlos en cuenta porque no se sabía con certeza las entradas de lluvia en la zona donde se encontraba situado el foso de muestreo. Se utilizaron en el modelo las medidas registradas en el sector nº2 el en periodo 28/2/2000-16/2/2001, siendo este un periodo de unos 355 días de duración.

4.3 RECOGIDA DE DATOS METEOROLÓGICOS

Para esta labor se utilizó una estación micrometeorológica ubicada en una zona dentro del invernadero próxima a la zanja, similar a la descrita por Muñoz-Carpena et al., (1996), compuesta por:

- Microcontrolador Micro440e de Blue Earth Research (USA).
- Sensor de temperatura y humedad de la serie EE20 de E+E ELEKTRONIK. Precisión: $\pm 2\%$ HR (0-90%), $\pm 3\%$ HR (90-100%), $\pm 0,03$ °C a 20 °C.
- Sensor Met One Instruments 014 para la medida de la velocidad del viento. Exactitud del 1,5%. Altura de medición: 3,5 m.
- Piranómetro LI_COR 200SA para medidas de radiación.
- Pluviómetro TE525MM-L de Campbell Scientific. Resolución: 1 pulso. Volumen: 4,73 ml/pulso. Precisión: 1% \pm a partir de 50 mm/h.

Las medidas meteorológicas se realizaron cada quince minutos y comenzaron el 28/01/2000, finalizando el 28/02/2001. Fueron registradas las variables de: temperatura (°C), humedad relativa (%), radiación (W/m^2), velocidad del viento (m/s) a 3,5 m. Cabe destacar en este apartado que el pluviómetro anteriormente mencionado fue empleado para la recogida del caudal de riego proveniente de dos emisores de 2 l/h, con el objetivo de obtener los tiempos de riego y el volumen de agua aplicado.



Fotografía 2: *Pluviómetro empleado para la recogida del volumen de riego. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2)*

4.4 MATLAB

El tratamiento y visualización de los datos obtenidos en campo se llevó a cabo mediante el empleo del entorno de desarrollo integrado MATLAB. Este programa permite la realización de análisis numéricos, cálculos matriciales y la creación de una gran variedad de gráficos. Además de estas funciones principales, MATLAB cuenta con una gran variedad de paquetes y complementos que permiten la adición de nuevas funciones. Ampliamente usado para aplicaciones científicas y en el ámbito de la ingeniería, el programa emplea un lenguaje de programación propio, el lenguaje M, compatible también con Octave. Uno de sus puntos fuertes es la gran cantidad de documentación disponible, la cual hace más fácil el aprendizaje y la resolución de errores.

4.5 CORRECCIÓN DE LAS LECTURAS DE HUMEDAD DEL SUELO

El método del TDR (*Time Domain Reflectometry*) nos ofrece una medida indirecta del contenido volumétrico de agua del suelo. Su funcionamiento se basa en la medida del tiempo de propagación de un pulso electromagnético de alta frecuencia a través del suelo. Este tiempo de propagación es usado posteriormente para calcular la constante dieléctrica (ϵ_c) del suelo mediante la siguiente fórmula:

$$\epsilon_c = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío (m s^{-1}), L la longitud de las varillas de la sonda (m) y t el tiempo de propagación del pulso (seg.).

La constante dieléctrica del agua se encuentra cercana a 80, mientras que el resto de los componentes minerales del suelo presentan un valor entre 2 – 7, siendo la del aire igual a 1. Es por esto, por lo que pequeñas variaciones en el contenido de agua del suelo, con una constante dieléctrica muy alta, tienen un gran impacto en el valor de la constante dieléctrica total, ϵ_c , del medio poroso suelo-agua-aire.

Varios estudios han demostrado que la relación entre el contenido volumétrico de agua y la constante dieléctrica del suelo (ϵ_c) es relativamente independiente de la textura, porosidad y tipo de suelo. La ecuación “universal” que se emplea para relacionar la constante dieléctrica del suelo con el contenido volumétrico de humedad fue propuesta por Topp et al., (1980):

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \epsilon_c - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon_c^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon_c^3 \quad (2)$$

siendo θ el contenido volumétrico de humedad ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Esta ecuación es válida para una amplia gama de suelos y se emplea como ecuación general para evitar la realización de labores de calibrado específicas.

Sin embargo, los suelos de origen volcánico se comportan de manera diferente debido a que presentan una alta porosidad y superficie específica (Tomer et al., 1999; Weitz et al., 1997) que derivan en una mayor retención del agua en los poros del suelo y una unida a las partículas minerales. Por esto, Regalado et al., (2001) propone una ecuación de calibración específica para el suelo de “Pajalillos”:

$$\theta = 0,2318 \ln(\varepsilon_c) - 0,2748 \quad (3)$$

Para la corrección de los datos de contenido de humedad recogidos por los TDR se obtuvo la ε_c empleando la inversa de la ecuación de Topp:

$$\varepsilon_c = 222,45 \theta^3 - 64,085 \theta^2 + 48,863 \theta + 1,5724 \quad (4)$$

Una vez obtenidos los valores de ε_c , se empleó la ecuación específica de calibrado para la obtención de los valores corregidos de humedad.

El hecho de no realizar una labor de calibrado específica para este tipo de suelos supone una diferencia notable entre el contenido de humedad proporcionado por las lecturas de los dispositivos TDR, en comparación con el que realmente presenta el suelo.

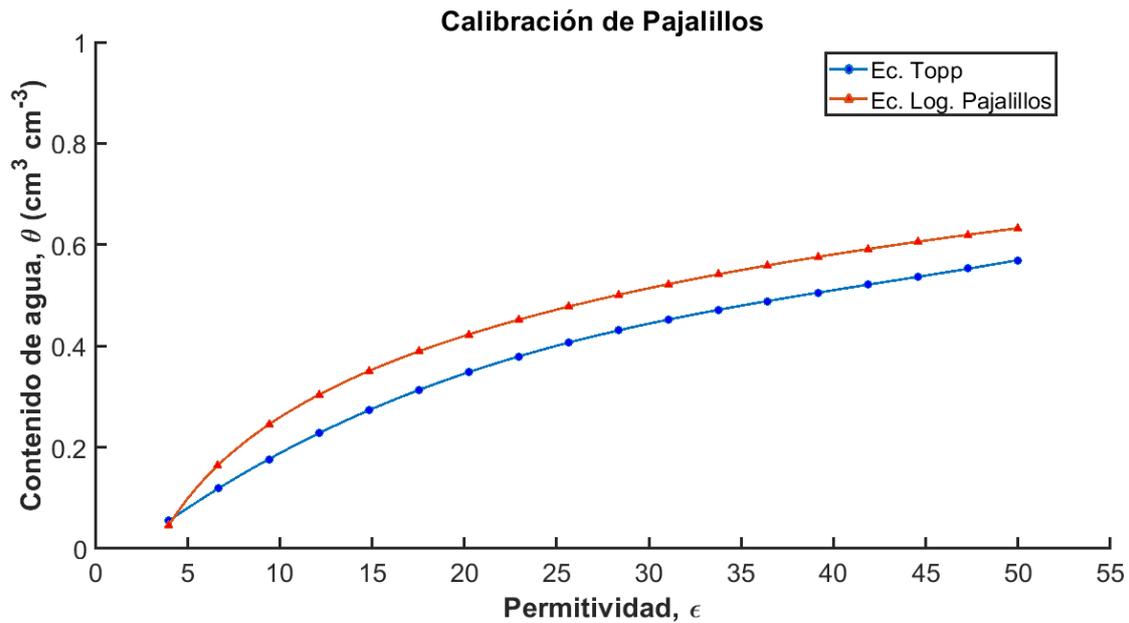


Figura 7: Relación de ϵ_c versus contenido de humedad según la ecuación “universal” de Topp y la propuesta por Regalado et al., (2001) específica para el suelo de Pajalillos. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

El error que se estaría cometiendo a la hora de trabajar directamente con los datos obtenidos mediante la ecuación de Topp, sin haber realizado una labor de corrección de los datos, varía entre el 17-28%.

4.5.1 ELIMINACIÓN DE VALORES ATÍPICOS

Una vez corregidas las lecturas de humedad de los TDR, se representaron los valores de la serie temporal. Se pudo observar la presencia de valores atípicos, también conocidos como “outliers”, en diferentes puntos de la serie temporal.

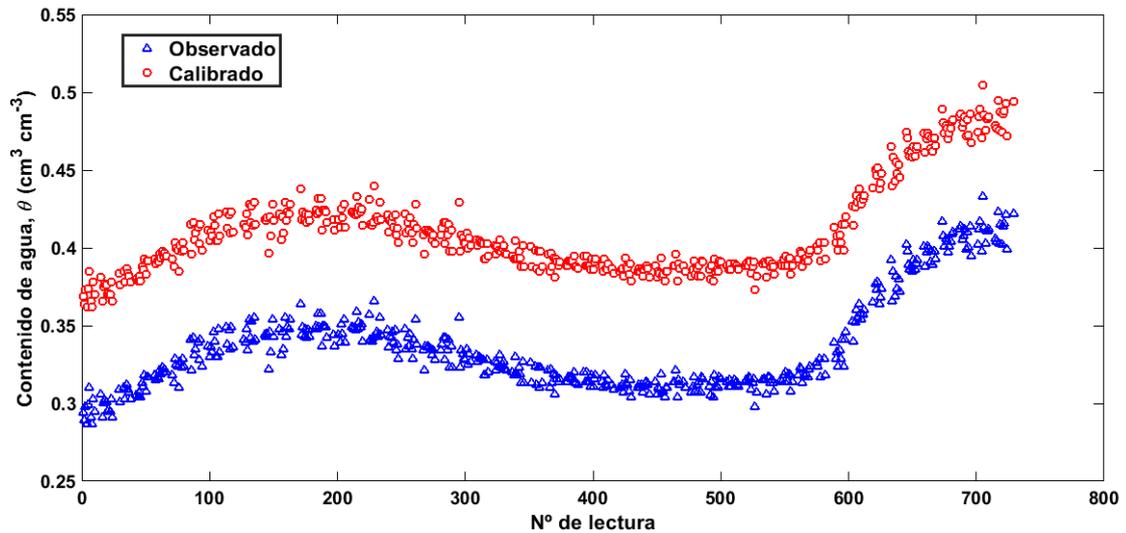


Figura 8: Representación de los valores obtenidos en campo frente a las lecturas corregidas para la eliminación de outliers. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Se procedió a la eliminación de los valores atípicos, para evitar una posterior influencia de estos en el modelo de simulación. Para ello se utilizó el siguiente código de MATLAB:

```
clear all; % Se eliminan todas las variables del espacio de trabajo

load('VWC.mat'); % se carga la matriz de datos con las lecturas de los TDR
Ka = 222.45 * VWC.^3 - 64.085 * VWC.^2 + 48.863 * VWC + 1.5724; % Ecuación inv. De Topp
Theta_cal=0.232.*log(Ka)-0.275; % Ecuación de calibración para Pajalillos, se obtienen los
valores corregidos de humedad

x=[1:length(Theta_cal)];

% Se representan los valores de humedad corregidos vs recogidos para ubicar la posición de los
valores atípicos

Figure

for
    i=1:size(Theta_cal,2)
        plot(x,VWC(:,i),'b^');
        hold on
        plot(x,Theta_cal(:,i),'ro');
        pause
    end
end
```

El susodicho código nos representa los valores del contenido de humedad corregido y medido por sector y nivel de profundidad. Con la ayuda de este, se fueron eliminando los valores atípicos de manera manual, reemplazándolos por NaN (*Not a Number*) en la hoja de Excel donde se recogieron las lecturas.

4.6 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ET_0)

4.6.1 MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Este método tiene su origen en 1948, tras la combinación del balance energético y el modelo de transferencia de masa realizada por Penman, obteniendo así una ecuación para calcular la evaporación en una superficie abierta de agua a partir de datos de horas de sol, humedad atmosférica, velocidad del viento y temperatura. Este método fue modificado a posteriori por varios investigadores, entre ellos Monteith, para añadir factores de resistencia que permiten su uso en superficies cultivadas. La ecuación de Penman-Monteith resultante es la siguiente:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + p_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (5)$$

donde R_n es la radiación neta ($W m^{-2}$), λ es el calor latente de vaporización ($J kg^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($W m^{-2}$), $(e_s - e_a)$ el déficit de presión de vapor del aire (Pa), p_a la densidad media del aire a presión constante ($kg m^{-3}$), c_p es el calor específico del aire, Δ la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($Pa K^{-1}$), γ la constante psicrométrica ($Pa K^{-1}$), r_s la resistencia superficial ($s m^{-1}$) y r_a la resistencia aerodinámica ($s m^{-1}$).

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (6)$$

donde r_a es la resistencia aerodinámica ($s\ m^{-1}$), z_m y z_h la altura de medición de temperatura y humedad (m), d el plano de altura de desplazamiento cero (m), z_{om} la longitud de la rugosidad del momento (m), z_{oh} la longitud de la rugosidad de transferencia de calor y vapor de agua (m), k la constante de Von Karman (0,41) y u_z velocidad del viento a la altura de medición ($m\ s^{-1}$).

Estos parámetros se pueden estimar de manera rápida, empleando las siguientes expresiones: $d = 2/3 \cdot h$, $z_{om} = 0,123 \cdot h$, $z_{oh} = 0,1 \cdot z_{om}$.

El concepto de evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o) es el correspondiente a la evapotranspiración del cultivo de referencia, siendo este un cultivo de pasto verde, sin limitaciones de agua, con una altura de 0,12 m, una resistencia superficial de $70\ s\ m^{-1}$ y un albedo de 0,23.

La fijación de un cultivo de referencia hace más fácil el cálculo de la evapotranspiración para los diferentes cultivos ya que no es necesaria la determinación de los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento.

La evapotranspiración de referencia se relaciona con los valores de evapotranspiración de los cultivos a través del empleo del denominado “coeficiente de cultivo” (K_c).

4.6.2 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EMPLEANDO EL PROGRAMA PMETP-W

Para la obtención de los valores de evapotranspiración correspondientes al período 28/02/2000 - 16/02/2001 se empleó el programa PMETp-w (ver.1.40). Dicho programa se encuentra disponible en <https://aritter.webs.ull.es/software.html>.

El programa consta de una interfaz “*user-friendly*” con dos ventanas para la introducción de datos: una para los datos meteorológicos y otra para los parámetros correspondientes a la estación y al cultivo de referencia.

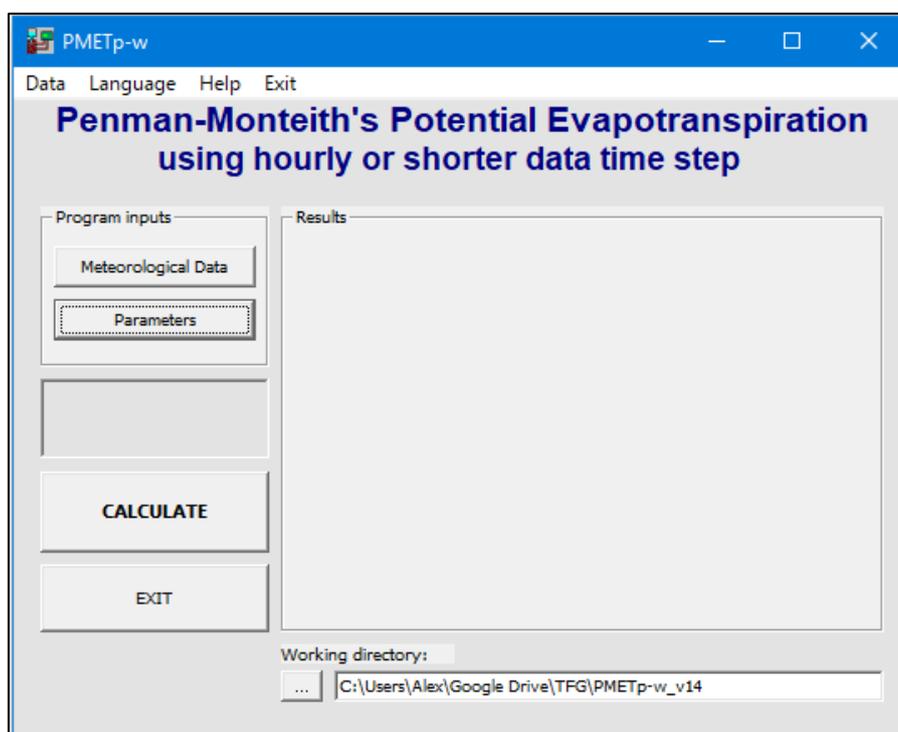


Figura 9: Interfaz de la aplicación PMETp-w (ver.1.40).

Seleccionando en la ventana de datos meteorológicos la opción “*New*” se introducen los siguientes datos: Mes, Día, Hora, Temperatura (°C), Humedad relativa (%), Radiación global (W/m^2) y velocidad del viento (m/s). Esta última se consideró como un valor mínimo de 0,5 m/s, dado que en el interior del invernadero la velocidad del viento era despreciable.

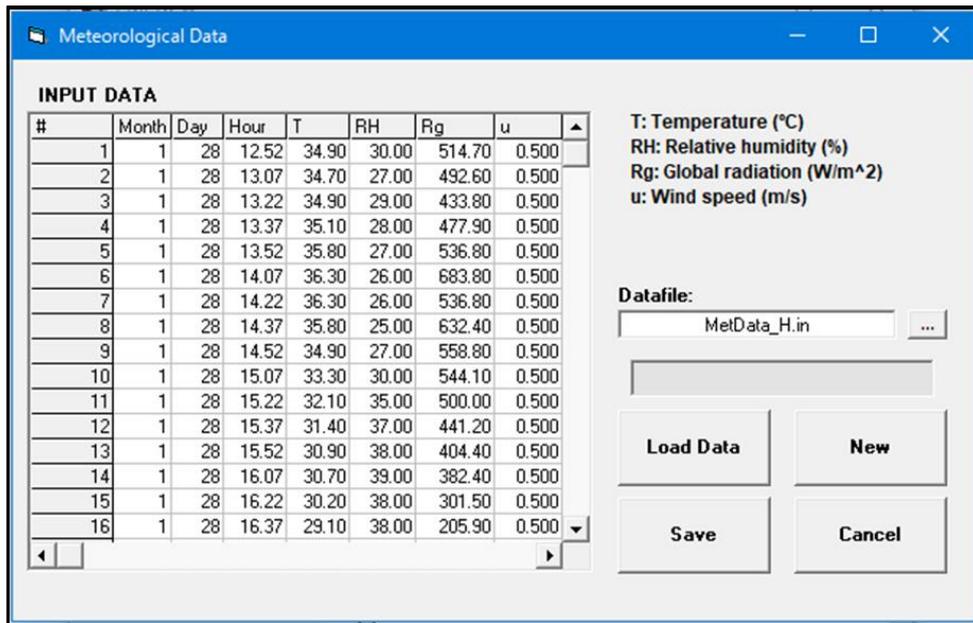


Figura 10: Ventana de entrada de datos meteorológicos. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Una vez introducidos los datos anteriormente mencionados, hay que elegir el archivo "NewData.in", posteriormente se selecciona la opción de "Load Data" y por último "Save". El siguiente paso sería introducir los datos relativos a la estación meteorológica por medio de la cual se recogieron las variables meteorológicas. Para ello, hay que hacer click en la opción "Parameters" y una vez abierta la correspondiente se modifican las casillas correspondientes a la elevación (m.s.n.m.), latitud (rad) y longitud (rad) junto con las casillas referentes al intervalo de tiempo de registro y la altura de medición del viento (m) y altura de medida de la humedad (m), respectivamente.

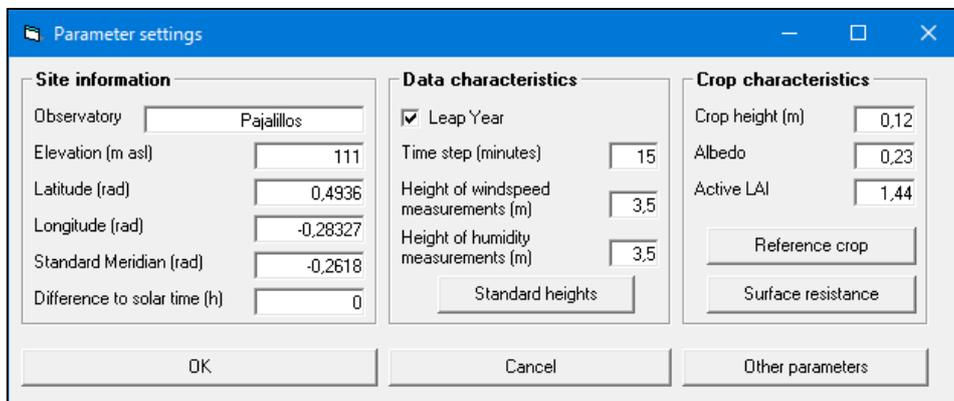


Figura 11: Ventana de entrada de parámetros.

En lo que a las variables del cultivo respecta, no es necesario realizar ninguna modificación debido a que el programa considera por defecto los valores correspondientes al cultivo de referencia.

Por último, es necesario seleccionar la opción “*Calculate*” para que el programa nos muestre una ventana con el sumatorio de la evapotranspiración potencial para el período de datos introducidos, además de dar la opción de exportar los datos a Excel.

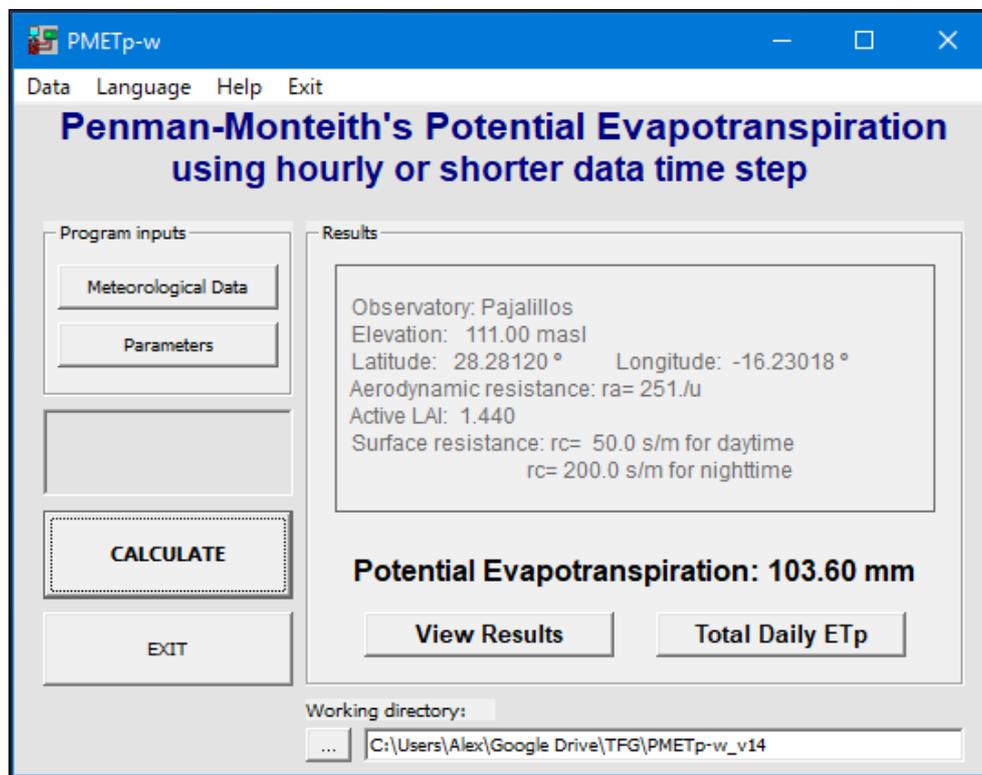


Figura 12: Ventana de resultados. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Los resultados fueron exportados a Excel para ser posteriormente procesados mediante MATLAB, obteniendo los valores de evapotranspiración potencial a intervalos horarios mediante el siguiente código:

```
clear all; %% se limpian todos los datos del espacio de trabajo

load ET2000.mat; %% se carga el archivo con los datos de ET correspondientes al año 2000

ETp=ETp2000.ETPM; %% se define la variable ETp
Day = ETp2000.Day; %% se define la variable día
Month= ETp2000.Month; %% se define la variable mes
Time=ETp2000.Hora; %% se define la variable hora

d=days(Time);
d.Format = 'hh:mm:ss'; %% se aplica un formato de horas, minutos y segundos a los datos de tiempo
[h,m,s]=hms(d); %% se separan los valores de horas, minutos y segundos en tres variables independientes
Year = zeros(32422, 1); %% se crea un vector de ceros de la misma longitud de los datos a tratar
Year(:) = 2000; %% se reemplazan los valores del vector por el número 2000 en cada posición del mismo
Date=datetime(Year,Month,Day,h,m,s); %% se crea un vector con la fecha correspondiente
Datos15min=timetable(Date,ETp); %% se crea una tabla con los valores de fecha y ETp
DatosH_sum=retime(Datos15min, 'hourly','sum'); %% se obtiene la suma de los valores a intervalos horarios
```

4.7 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_c)

Para la obtención del valor de evapotranspiración del cultivo (ET_c) se empleó la siguiente fórmula:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (7)$$

siendo ET_o la evapotranspiración potencial del cultivo y K_c el coeficiente de cultivo de la platanera.

Los valores de K_c empleados para el cálculo fueron los siguientes:

Tabla 2: Valores de K_c para el cultivo de platanera. Fuente: Santana et al., (1993)

Mes	K_c
Enero	1,5
Febrero	1,1
Marzo	0,8
Abril	0,6
Mayo	0,6
Junio	0,7
Julio	0,9
Agosto	1,1
Septiembre	1,2
Octubre	1,4
Noviembre	1,4
Diciembre	1,5

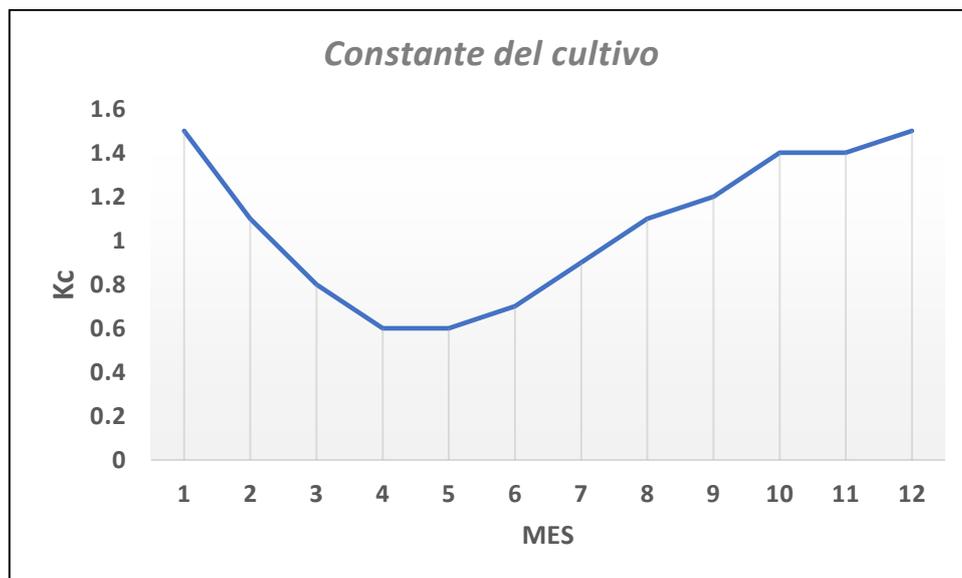


Figura 13: Evolución mensual del coeficiente de cultivo, K_c , a lo largo del año.

Para ajustar mejor los cálculos, se aproximaron los valores de la constante de cultivo (K_c) para cada día del año, haciendo uso del método de interpolación lineal con este código de MATLAB:

```
clear all; %% se limpian todos los datos del espacio de trabajo

load ('kc.mat'); %% se cargan los datos correspondientes a los valores de Kc
KC=Kc.Kc; %% se define un vector con los valores de Kc
MES=(1:1:13); %% se crea un vector con el número de meses + 1 para que se lleve a cabo la
interpolación entre diciembre y enero

for t=1:12
    for i=1:30
        DX=(t+i/30); %% se crea una variable para pasar los días a meses
        X=interp1(MES,KC,DX); %% se interpolan los valores de Kc
        DATA(i,t)=X; %% se guardan los datos de la interpolación por mes y día en una matriz
    end
end

end
```

Tras obtener los valores diarios del coeficiente de cultivo se calcularon los valores de la ET_c haciendo uso de Excel y de la fórmula (7).

4.8 CÁLCULO DE LA TRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN POTENCIAL

El modelo de simulación HYDRUS-2D requiere la introducción de los datos de evapotranspiración (ET_c) mediante las variables de transpiración y evaporación potencial. Para obtener el valor de evaporación potencial (E_p) para un cultivo, según Wang et al., (2016), se puede hacer uso de la siguiente fórmula:

$$E_p = ET_c \cdot e^{(-\eta LAI)} \quad (8)$$

donde ET_c es el valor de la evapotranspiración del cultivo, η el coeficiente de extinción del cultivo y LAI el índice de área foliar.

El valor del coeficiente de extinción (η) para un cultivo de plátanos es igual a 0,7, según Nyombi et al., (2009).

Los valores de LAI empleados en el cálculo fueron los siguientes:

Tabla 3: Función LAI para el cultivo de platanera (cv. Pequeña Enana). Fuente: Muñoz-Carpena et al., (1999)

Día del año	LAI (m ² /m ²)
1	3,49
80	2
140	0,52
207	2,24
315	4
365	3,44

Para la interpolación de los valores correspondientes al índice de área foliar, para cada día del año, se siguió un procedimiento similar al del cálculo del coeficiente de cultivo. Para ello se empleó el siguiente código de MATLAB:

```
clear all; %%se limpian los datos del espacio de trabajo

LAI=[1 3.49; 80 2; 140 0.52; 207 2.24; 315 4; 365 3.44]; %% se definen los valores del índice de
área foliar expuestos en la tabla anterior
DIA=LAI(:,1); %% se define un vector los días de la tabla
VLAI=LAI(:,2); %% se define un vector con los valores de LAI de la tabla
for
    DX=1:365
    X=interp1(DIA,VLAI,DX); %% se interpolan los valores de LAI para cada día del año
    DATA(DX,1)=X; %% se guardan los valores de LAI diarios en una matriz
end
```

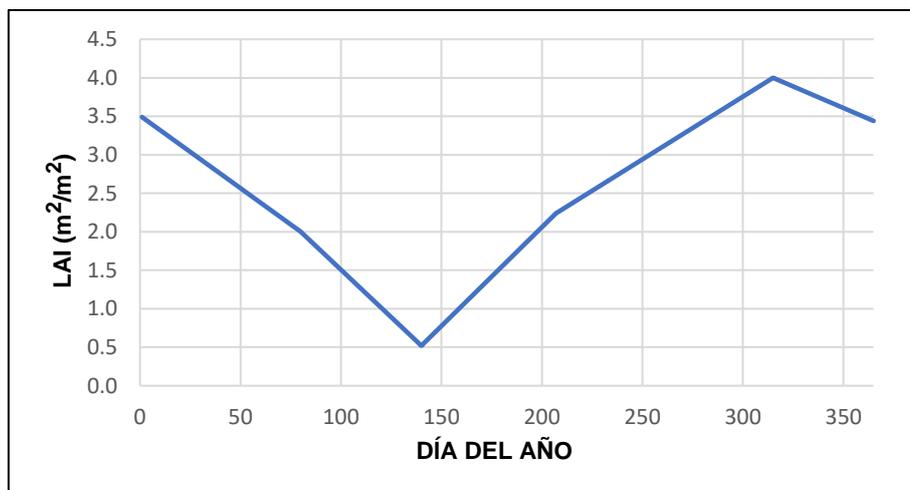


Figura 14: Evolución de los valores de LAI a lo largo del año.

La transpiración potencial se calculó a partir de los valores de evaporación potencial y evapotranspiración del cultivo calculados anteriormente, según:

$$T_p = ET_c - E_p \quad (9)$$

siendo T_p la transpiración potencial, ET_c la evapotranspiración potencial del cultivo y E_p la evaporación potencial.

4.9 CÁLCULO DE LOS TIEMPOS DE RIEGO

La obtención de los tiempos de riego se realizó empleando para ello las lecturas del contador de agua presente en la parcela. Al tener constancia del número de goteros presente, además de su caudal, se calculó el caudal de salida de la instalación por hora de riego:

$$460 \cdot 2,07 \frac{l}{h} + 184 \cdot 4,02 \frac{l}{h} = 1691,88 \frac{l}{h} \quad (10)$$

Hay que tener en cuenta que los caudales de los emisores aquí empleados fueron obtenidos a la hora de realizar el cálculo del coeficiente de uniformidad de riego.

Una vez obtenido el volumen de riego aportado por hora, se dividieron los valores de volumen de riego (litros) registrados por el contador, obteniendo así, los tiempos de riego para el periodo de estudio.

$$\text{Tiempo de riego (h)} = \frac{\text{Lectura del contador (litros)}}{1691,88 \text{ l/h}} \quad (11)$$

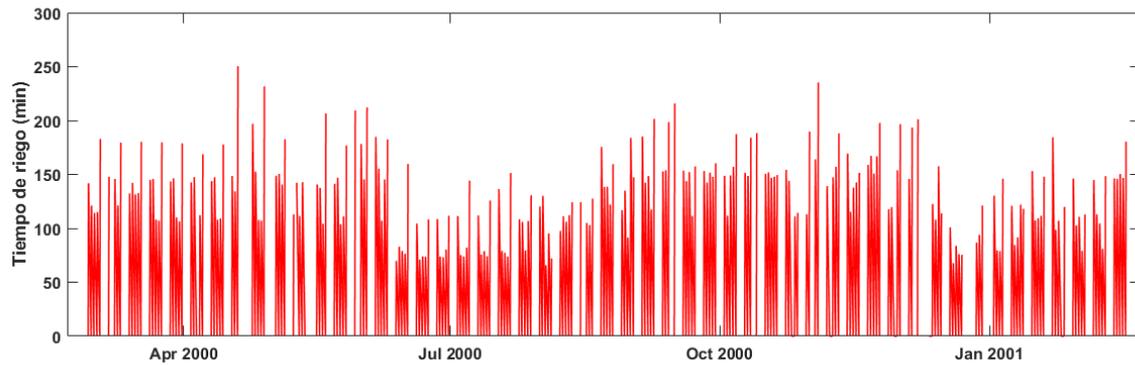


Figura 15: Tiempos de riego obtenidos para el periodo de estudio.

Los intervalos de riego registrados por el pluviómetro presentaban diferentes lecturas sin valor (NaN), valores debidos a condensaciones y errores de pulsos, según las notas de campo. Para la introducción de los valores de riego correspondiente a cada intervalo de tiempo, se optó por el empleo de un código en MATLAB que repartiera de forma homogénea los volúmenes de riego registrados para cada intervalo de lectura registrado por el pluviómetro.

```
load Datos.mat; %%se carga el archivo con los datos a intervalos horarios

x = ETpHora.x; %%se define una variable con valores iguales a 1 en los intervalos para los que
hay valor registrado por el pluviómetro

v = ETpHora.Irrigmin;
t = v(v~=0); %% se asignan los tiempos de riego a la variable t
t2 = transpose (t);
SALIDA = zeros(1,8520);
%% se determina el intervalo de comienzo de las lecturas del pluviómetro y su duración en
intervalos
x1 = (x==1);
d = diff (x1(:).');
start = find ([x1(1) d]==1);
len = find ([d-x1(end)]== -1)-start+1;
%% se reparten de manera homogénea los tiempos de riego divididos entre el número de
intervalos con lecturas del pluviómetro
for i=1:233
    tiempo= t2(1,i);
    pos1=start(1,i);
    pos2=len(1,i);
    long= (pos1+pos2)-1;
    val=tiempo/len(1,i);
    SALIDA (pos1:long)=val;
    FINAL=transpose(SALIDA);
end
```

4.10 PARÁMETROS DEL SUELO

Los parámetros de suelo empleados fueron los obtenidos por Ritter et al., (2004), constando este de cuatro horizontes cuyas propiedades se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4: Parámetros del suelo de la parcela. Fuente: Ritter et. al, (2004)

Horizonte	Espesor (cm)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm h ⁻¹)
H1	0 - 25,5	0,268	0,4764	0,0172	1,473	2,5
H2	25,5 - 45	0,268	0,4995	0,0223	1,385	15
H3	45 - 54	0,268	0,5405	0,0489	1,228	20
H4	54 - 72	0,268	0,59	0,0454	1,244	30

donde θ_r es el contenido de humedad residual, θ_s contenido de humedad a saturación, K_s la conductividad hidráulica saturada, n parámetro dependiente de la distribución del tamaño de poros y α la inversa de la succión de entrada de aire.

Estos parámetros se emplearon a modo de valores iniciales para su introducción en el modelo, además de la definición de los diferentes horizontes. Debido a la gran variabilidad de los parámetros obtenidos en campo, contando con más de 100 curvas de succión diferentes, se optó por el empleo del método de simulación inversa con las lecturas recogidas por los TDR.

4.10 MODELADO DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO

4.10.1 HYDRUS-2D

HYDRUS-2D es un modelo de elementos finitos que permite simular el movimiento en dos dimensiones, de agua, calor y diversos solutos en medios porosos insaturados o saturados. Fue desarrollado por la empresa PC-Process, en colaboración con Jirka Simunek (University of California, Riverside) y Martinus Th. Van Genuchten (Federal University of Rio de Janeiro). Dicho programa resuelve con métodos numéricos la ecuación de Richards que describe el flujo de agua en medio no saturado, incorporando la absorción de agua por las raíces de la planta. Las propiedades hidráulicas de la zona no saturada del suelo son descritas mediante el empleo de la ecuación de Van Genuchten (1980), en conjunto con la ecuación de Brooks y Corey (1964). Actualmente la versión de HYDRUS-2D se encuentra englobada en el paquete HYDRUS 2D/3D, aunque también cuenta con una versión gratuita denominada HYDRUS-1D que permite realizar simulaciones en un entorno unidimensional.

Se utilizó la versión HYDRUS-2D v.2.05, publicada en 1999. Para el uso del programa, además de la introducción de datos en el mismo, fue de gran ayuda el manual que se encuentra disponible en: https://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/HYDRUS-2D_Book.pdf.

Uno de sus inconvenientes es la elevada tecnicidad presente en los manuales, por lo que se requiere un amplio conocimiento de los parámetros empleados por el programa.

4.10.2 ECUACIÓN DE FLUJO

El modelo aplica una forma modificada de la ecuación de Richards, para un flujo darciano bidimensional e isoterma en un medio poroso rígido y parcialmente saturado, asumiendo que la fase de aire tiene un papel insignificante en el flujo. La ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (12)$$

donde θ es el contenido volumétrico de agua ($L^3 L^{-3}$), h es el potencial de succión (L), S es el término sumidero que contempla la evapotranspiración (T^{-1}), x_i ($i=1,2$) y x_j son las coordenadas espaciales (L), t es el tiempo (T), K_{ij}^A son componentes de un tensor adimensional de anisotropía K^A y K es la función de la conductividad hidráulica insaturada (LT^{-1}) dada por la expresión:

$$K(h, x, z) = K_s(x, z) K_r(h, x, z) \quad (13)$$

donde K_r es la conductividad hidráulica relativa, K_s la conductividad hidráulica saturada ($L T^{-1}$), x es la coordenada horizontal y z la vertical.

4.10.3 EXTRACCIÓN DE AGUA POR LA PLANTA

Para la consideración de la extracción de agua por la planta el programa emplea el modelo propuesto por Feddes et al., (1978):

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (14)$$

donde S es el término de extracción en función del potencial de succión (h) y de la extracción potencial de agua por parte de la planta (S_p), $\alpha(h)$ es una función adimensional, cuyo valor se encuentra entre 0 y 1 y que depende a su vez de la respuesta al estrés hídrico.

4.10.4 MODELO HIDRÁULICO DEL SUELO

La curva característica del suelo se basa en el modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha|h|^n]^m} \quad (15)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido de agua en el suelo ($L^3 L^{-3}$) a una determinada succión (h), α es el valor inverso de la succión de burbujeo (L^{-1}), m y n son parámetros de ajuste, θ_r es la humedad residual ($L^3 L^{-3}$) y θ_s la humedad a saturación ($L^3 L^{-3}$).

La conductividad hidráulica insaturada se describe por el modelo de Mualem (1976):

$$K(S_e) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{-m})^m]^2 \quad (16)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

donde S_e es la saturación efectiva (-), λ la conectividad de poros, $K(h)$ la conductividad hidráulica insaturada ($L T^{-1}$) y K_s la conductividad hidráulica saturada ($L T^{-1}$).

4.10.5 SIMULACIÓN INVERSA

El proceso de simulación inversa consiste en la estimación de los parámetros de la ecuación de van Genuchten-Mualem empleando las lecturas de contenido de humedad o potencial recogidas en campo. La función objetivo a minimizar es la descrita por Šimůnek et al., (1998):

$$\begin{aligned} \Phi(b, q, p) = & \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} w_{i,j} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{m_p} \bar{v}_j \sum_{i=1}^{n_{pj}} \bar{w}_{i,j} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 \\ & + \sum_{j=1}^{n_b} \hat{v}_j [b_j^* - b_j]^2 \end{aligned} \quad (17)$$

Para la minimización de la función objetivo, el programa emplea el algoritmo de optimización de Marquardt-Levenberg.

La obtención de buenos resultados empleando el método de la simulación inversa requiere de:

- La correcta definición de los parámetros de entrada del modelo.

- Definir correctamente el escenario y las condiciones de contorno a simular.
- El empleo de diferentes tipos de datos para realizar la calibración, por ejemplo, medidas de potenciales y contenidos de humedad.
- Distribución espacial y temporal de los datos, es decir, se obtienen mejores resultados empleando intervalos de datos donde se hayan registrado contenidos de humedad cercanos a la saturación hasta valores cercanos a los residuales.

4.10.6 USO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Tras abrir un nuevo archivo en el programa de simulación HYDRUS-2D v2.05 se muestra la siguiente ventana, la cual presenta una serie de apartados correspondientes a la información necesaria para realizar los cálculos en el modelo.

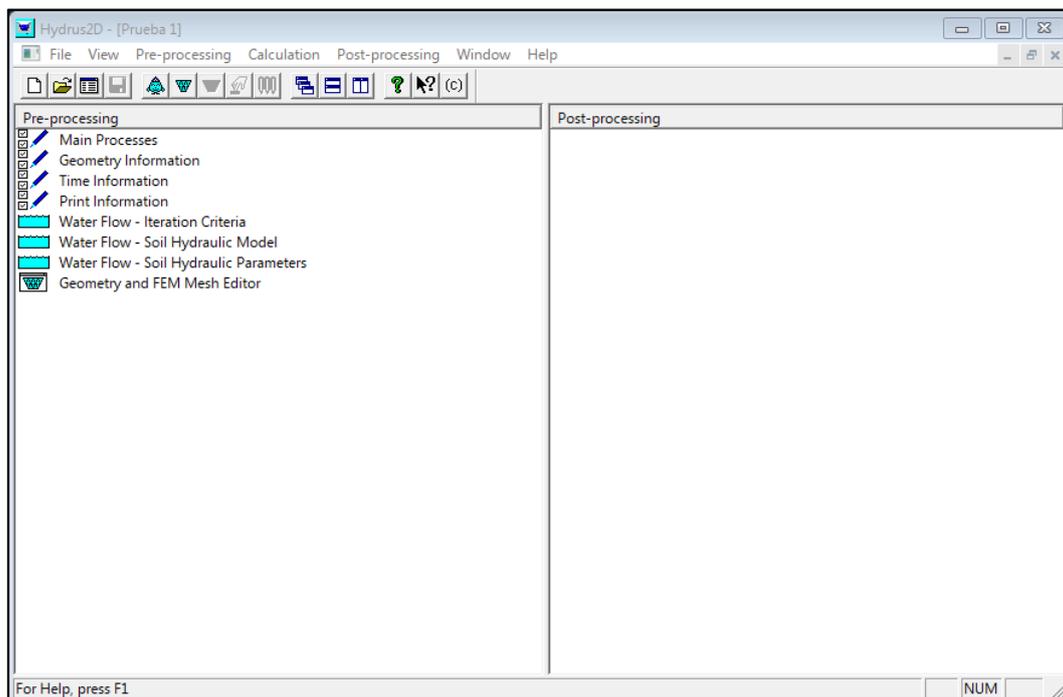


Figura 16: Ventana inicial de HYDRUS-2D v2.05.

Al hacer clic en el apartado de “Main Processes” el programa da la opción de simulación a elegir, entre ellas, la simulación del flujo de agua, transporte de

calor, transporte de solutos, extracción de agua por la planta y una última opción para llevar a cabo una simulación inversa.

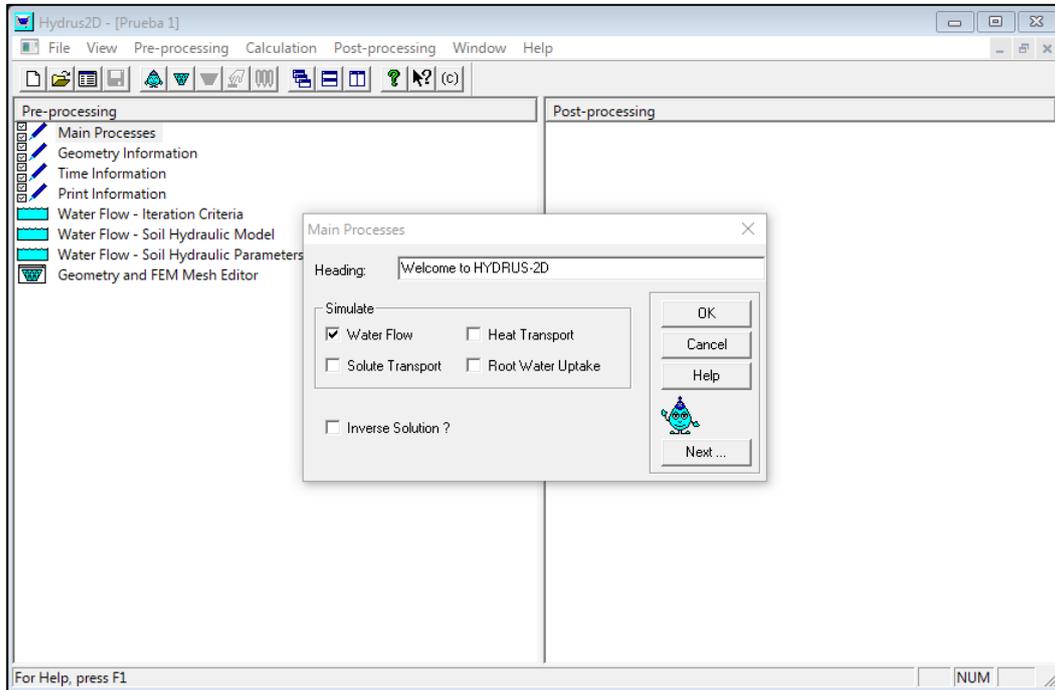


Figura 17: Ventana de selección de procesos.

Se empleó una geometría rectangular, con cuatro horizontes en el perfil, un flujo en el plano vertical y las unidades fueron introducidas en centímetros.

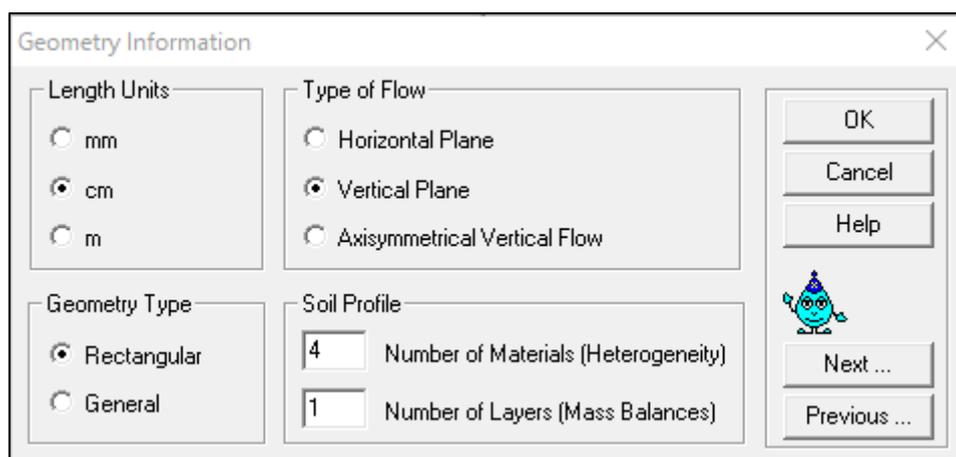


Figura 18: Ventana de introducción de la información geométrica.

A continuación, se procedió a seleccionar la unidad de medida de tiempo, así como, el número de días a simular y el número registros variables en el

tiempo, entre otros. Se simuló un periodo de 355 días (28/2/2000 - 16/2/2001), esto conllevó a introducción en el modelo de 8520 registros variables, dado que fue el número de registros horarios contabilizados. El resto de los parámetros se definieron al igual que en la imagen.

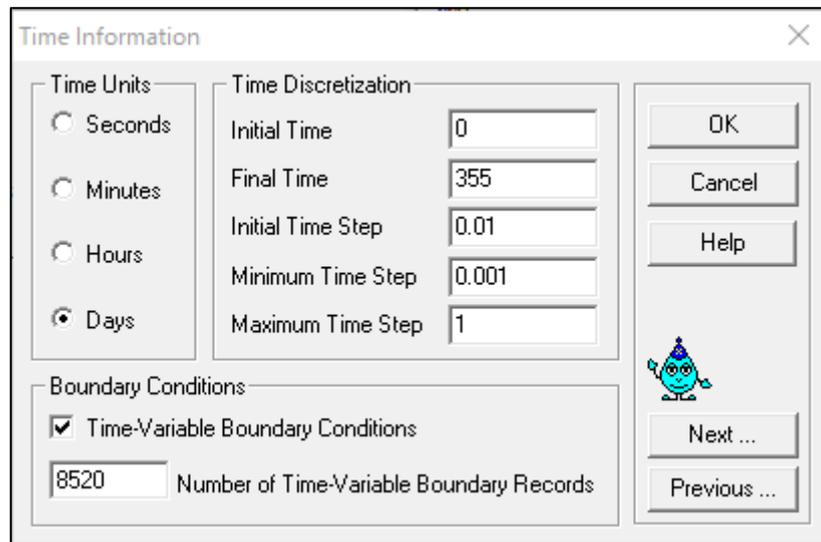


Figura 19: Ventana de introducción de información de tiempo. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Se limitó el número máximo de iteraciones a 50, con una tolerancia en el contenido de humedad de 0,001 y las condicionales iniciales fueron las lecturas registradas por los TDR al comienzo del periodo (28/2/2000).

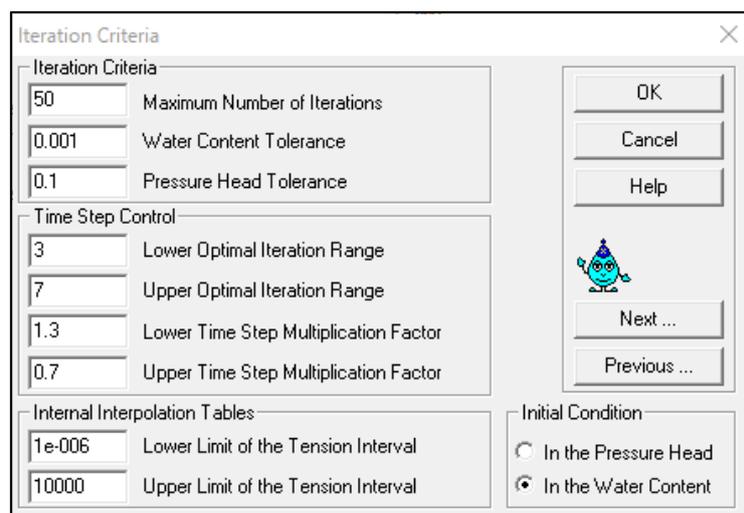


Figura 20: Ventana de criterios de iteración. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Posteriormente se seleccionó el modelo de van Genuchten – Mualem, para el cual se emplearon los parámetros obtenidos por Ritter et al., (2004). Las unidades de los parámetros son: θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), n (-), α (cm^{-1}), K_s (cm día^{-1}) y l (-). El valor de la conectividad de poros (l) se tomó como 0,5 , de acuerdo a lo propuesto por Mualem (1976).

	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
1	0,268	0,476	0,0172	1,47	60	0,5
2	0,268	0,5	0,0223	1,39	360	0,5
3	0,268	0,541	0,0489	1,23	480	0,5
4	0,268	0,59	0,0454	1,24	720	0,5

Figura 21: Parámetros de la ecuación de van Genuchten-Mualem.

Se definió un dominio de una extensión horizontal de 100 cm y 90 cm de profundidad, de acuerdo del sector a simular. A continuación, fueron introducidos los parámetros correspondientes a la discretización espacial, es decir, el número de divisiones verticales y horizontales del dominio.

Figura 22: Ventana de introducción de información geométrica.

Este paso del proceso fue clave para garantizar la rapidez de las simulaciones además de que se realizaran con éxito, dado que es en la parte superior donde se definen las entradas de flujo del dominio, además de algunas salidas (precipitación, evaporación, riego, etc.). Una mayor densidad de nodos en la parte superior del dominio a simular facilita el proceso iterativo del contenido de humedad entre los diferentes nodos que componen la malla. La siguiente ventana permite asignar una mayor densidad de nodos en función de la profundidad.

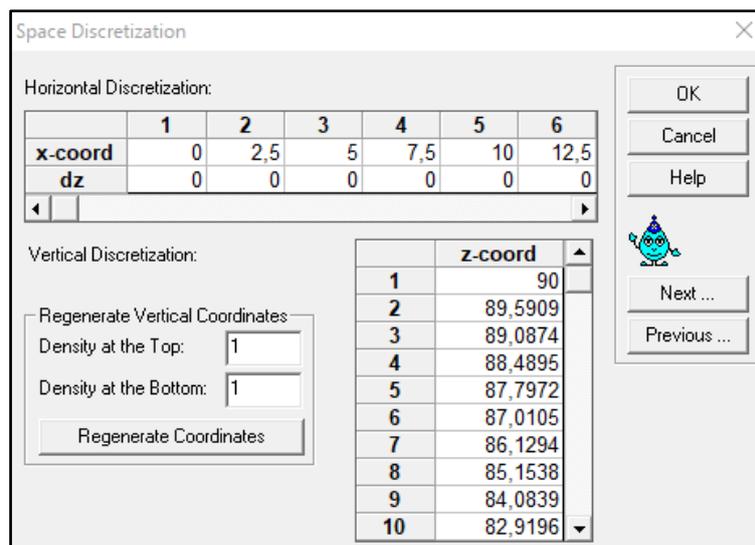


Figura 23: Ventana de discretización espacial.

A continuación, se seleccionaron los parámetros del modelo de Feddes correspondientes al cultivo de plátanos, desde el catálogo de cultivos del programa.

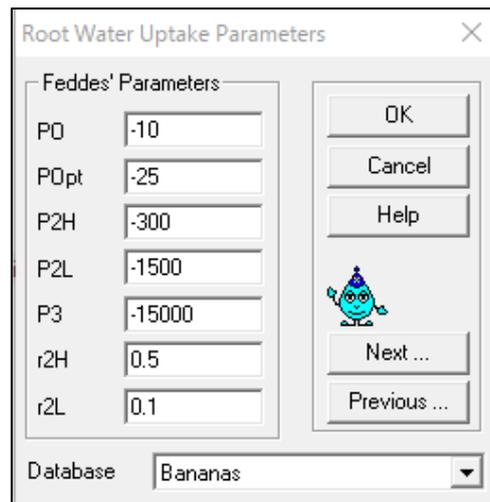


Figura 24: Parámetros del modelo de Feddes. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

El último paso antes de la definición de las propiedades del dominio de manera gráfica es la introducción de los registros variables. Estos se introducen mediante intervalos de tiempo. El programa requiere la introducción del intervalo de tiempo (T), precipitación (L/T), evaporación (L/T), transpiración (L/T), rGWL, (flujo entrante (L/T)) nivel freático (GWL) y hCritA (L), un parámetro empleado para la simulación de la evaporación en la superficie del suelo.

Time Variable Boundary Conditions

	Time	Precip.	Evap.	Transp.	hCritA	rGWL	GWL	
1	0,02	0	0,006	0,031	100000	0	0	
2	0,042	0	0,005	0,028	100000	0	0	
3	0,083	0	0,004	0,019	100000	0	0	
4	0,125	0	0,003	0,015	100000	0	0	
5	0,167	0	0,003	0,014	100000	0	0	
6	0,208	0	0,002	0,013	100000	0	0	
7	0,25	0	0,002	0,013	100000	0	0	
8	0,292	0	0,003	0,015	100000	0	0	
9	0,333	0	0,01	0,053	100000	-0,885	0	
10	0,375	0	0,04	0,218	100000	-0,885	0	
11	0,417	0	0,125	0,679	100000	-0,885	0	
12	0,458	0	0,144	0,781	100000	-0,885	0	

OK Cancel Help Add Line Delete Line  Next ... Previous ...

Figura 25: Ventana de introducción de los registros variables.

Las unidades de estos parámetros dependen de las unidades seleccionadas en las ventanas de información geométrica y de tiempo. Se encuentran definidas en el manual como (L/T) o (L), longitud/tiempo y longitud, respectivamente. En este caso se introdujeron los parámetros con unidades de cm y días. Los flujos entrantes (rGWL) se introducen con signo negativo. El parámetro hCritA depende del tipo de suelo y la humedad relativa del aire e interviene solamente en el proceso de simulación de la evaporación cuando la humedad del suelo se encuentra próxima a su valor residual. Se recomiendan valores de -150 m a -1000 m.

Se procedió a la definición de los nodos de observación en la mitad del dominio de acuerdo con las profundidades donde estaban insertados los TDR (15,35,55,70 cm). Los nodos de observación son los puntos donde el programa registra las lecturas de humedad, estos deben coincidir con la posición del instrumental de medida.

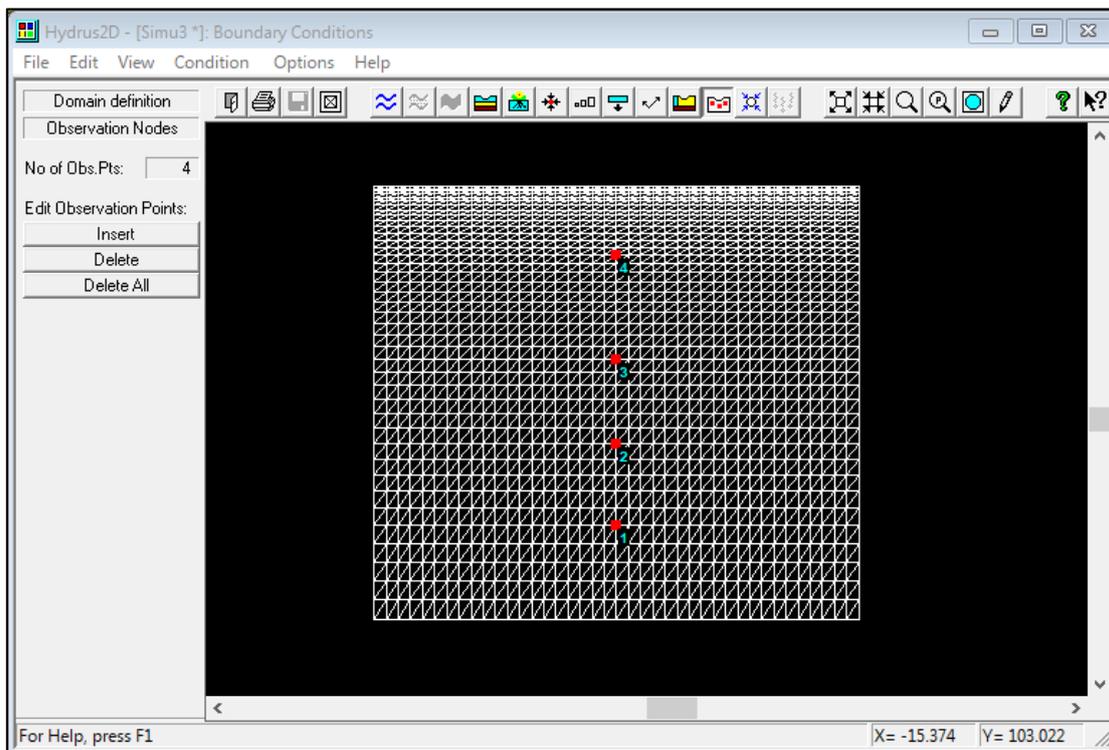


Figura 26: Ventana para la introducción de los nodos de observación.

Se definieron los cuatro horizontes de suelo presentes, según datos de Ritter et al., (2004). De la misma manera se definió una profundidad radicular de 50 cm (Carr, 2009; Muñoz-Carpena et al., 1999; Sansoulet et al., 2008) y las condiciones iniciales de contenido de humedad. Las condiciones de humedad iniciales para las diferentes profundidades se tomaron según las medidas registradas por el TDR en el comienzo del periodo:

Tabla 5: Contenidos de humedad registrados el 28/02/2000.

Contenido de humedad (cm ³ cm ⁻³) - 28/02/2000				
Profundidad	15 cm	35 cm	55 cm	70 cm
Sector 2	0,415	0,418	0,322	0,374

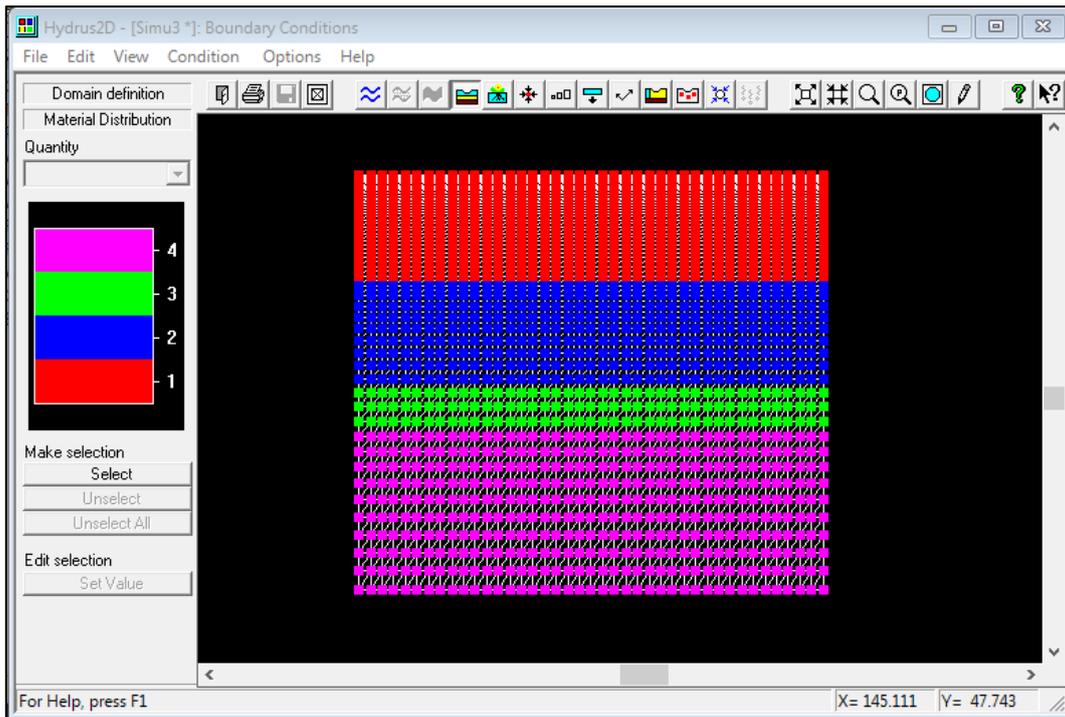


Figura 27: Ventana para la introducción de los horizontes del suelo.

Se impuso una condición de drenaje libre en la parte inferior del dominio. La entrada de agua procedente de los emisores se consideró a partir de una condición de flujo variable de 65 cm de anchura en la superficie, siendo esta la anchura del bulbo húmedo (Ruiz-Salleres et al., 2011; Selim et al., 2018; Wang et al., 2016). El flujo de entrada se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$q = \frac{q_e \cdot n_e \cdot t_r}{\pi \cdot r^2} \tag{18}$$

siendo q_e el caudal del emisor ($\text{cm}^3/\text{día}$), n_e el número de emisores de los que recibe agua la planta (-), t_r el tiempo de riego (días) y r el radio del bulbo húmedo (cm).

En el resto de la superficie se impuso una condición de contorno atmosférica. En los laterales del dominio la condición fue de ausencia de flujo.

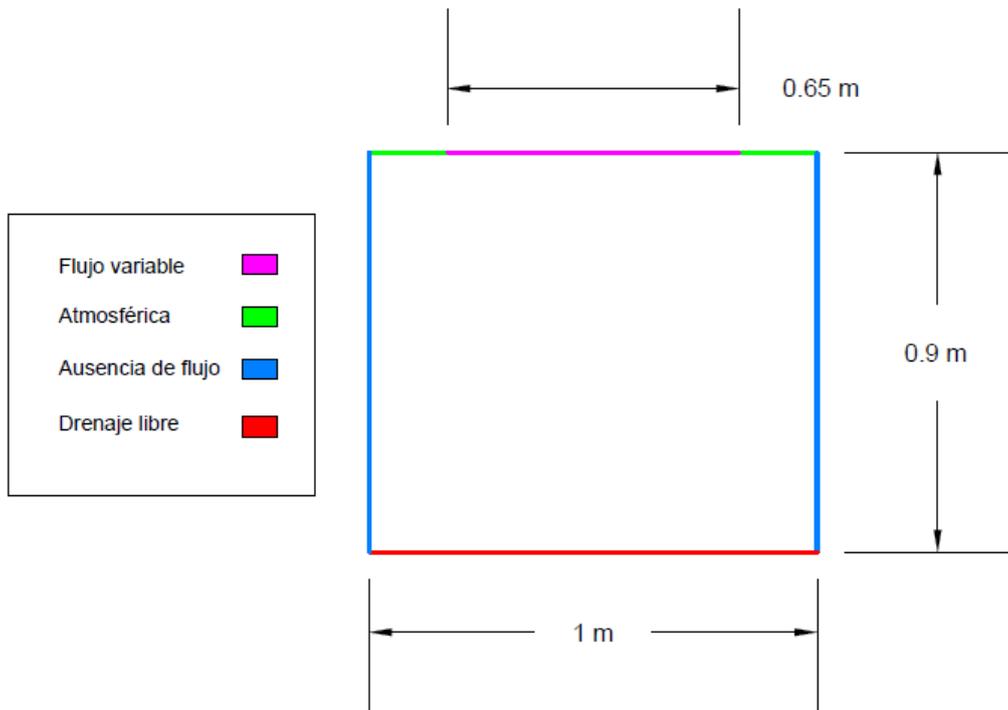


Figura 28: Condiciones de contorno. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.



Fotografía 3: Detalle del bulbo húmedo. Fuente: Proyecto IDEASS (SC99-024-C2)

Para la calibración del modelo se utilizaron los datos correspondientes al periodo 7/06/2000–15/09/2000, al haberse registrado una mayor variación en el contenido de humedad del suelo, llegando a valores residuales de humedad. Para ello se eligió la opción de “*Inverse solution*” en el menú contextual del programa.

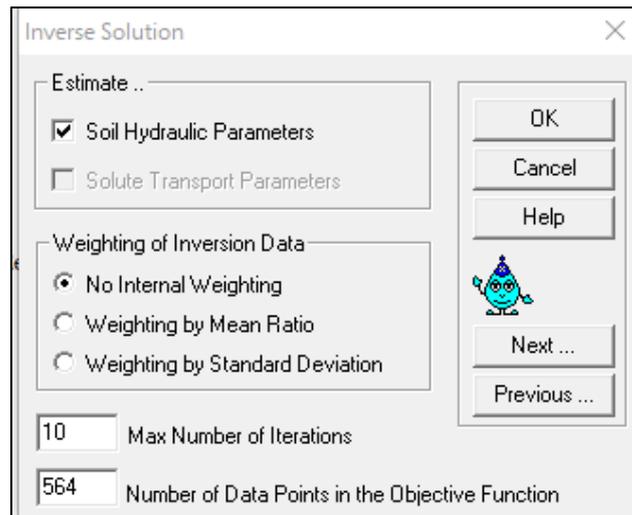


Figura 29: Menú para la optimización inversa.

El proceso se realizó sin emplear una ponderación de las lecturas. Estas se introdujeron asociadas al momento de medida (X), su valor (Y), el tipo (2), el nodo de observación y un valor de ponderación.

	X	Y	Type	Position	Weight
1	100,396	0,452	2	4	1
2	100,583	0,478	2	4	1
3	101,413	0,454	2	4	1
4	101,563	0,491	2	4	1
5	102,417	0,452	2	4	1
6	105,417	0,436	2	4	1
7	105,559	0,461	2	4	1
8	106,424	0,442	2	4	1
9	106,57	0,446	2	4	1
10	107,414	0,444	2	4	1
11	107,566	0,462	2	4	1
12	108,434	0,443	2	4	1
13	108,555	0,439	2	4	1
14	109,417	0,432	2	4	1
15	109,549	0,453	2	4	1

Figura 30: Introducción de las lecturas de humedad para el proceso de optimización inversa.

Los resultados fueron analizados mediante los archivos de salida y la interfaz gráfica del programa, en conjunto con una serie de códigos en MATLAB.

4.11 PLAN DE TRABAJO

Como se ha indicado anteriormente, para la realización de este trabajo se ha hecho uso de una herramienta de cómputo numérico denominada MATLAB. El manejo de esta herramienta ha requerido del estudio previo de su lenguaje de programación, el lenguaje M. Para su aprendizaje se emplearon los manuales de libre acceso citados en la bibliografía, además de consultas en el foro MATLAB-Answers, el cual está destinado a la resolución de cuestiones formuladas por los propios usuarios del programa. Otra herramienta de consulta ha sido la comunidad de Stack Overflow, una plataforma de desarrolladores donde se pueden encontrar soluciones a problemas de programación en un gran número de lenguajes. El uso de herramientas de programación para el manejo de un gran número de datos, como los generados en este proyecto, simplifica la tarea de limpieza y transformación de estos.

El manejo de la versión 2.05 del modelo HYDRUS-2D ha sido uno de los puntos que más esfuerzo ha requerido a la hora de la realización de este trabajo. Esto se debe, en parte, a la antigüedad de la versión empleada. Al ser una

versión antigua carece de muchas funcionalidades que han sido implementadas a lo largo de los últimos años, gracias a las sugerencias de usuarios y/o investigadores que han hecho uso del modelo. Parte de estas funciones son empleadas en los artículos científicos que han sido objeto de consulta, lo que ha llevado a consultar fuentes de mayor antigüedad, como el foro dedicado a las versiones del modelo desde 1996 al 2005 o el libro titulado “*Modelling Variably Saturated Flow with HYDRUS-2D*”, publicado en 2003. El programa presenta una serie de errores asociados a incompatibilidades con nuevas versiones del sistema operativo Windows, que dificultan la definición gráfica del dominio y la visualización de resultados de las simulaciones, provocando el cierre del programa y/o ventanas gráficas. También hay diferentes errores a la hora de realizar las simulaciones cuya solución no se encuentra acotada, es decir, pueden ser debidos a una serie de factores. Estos inconvenientes se han solucionado empleando el método de “prueba y error”.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 LECTURAS CORREGIDAS DE LOS TDR DEL SECTOR N° 2

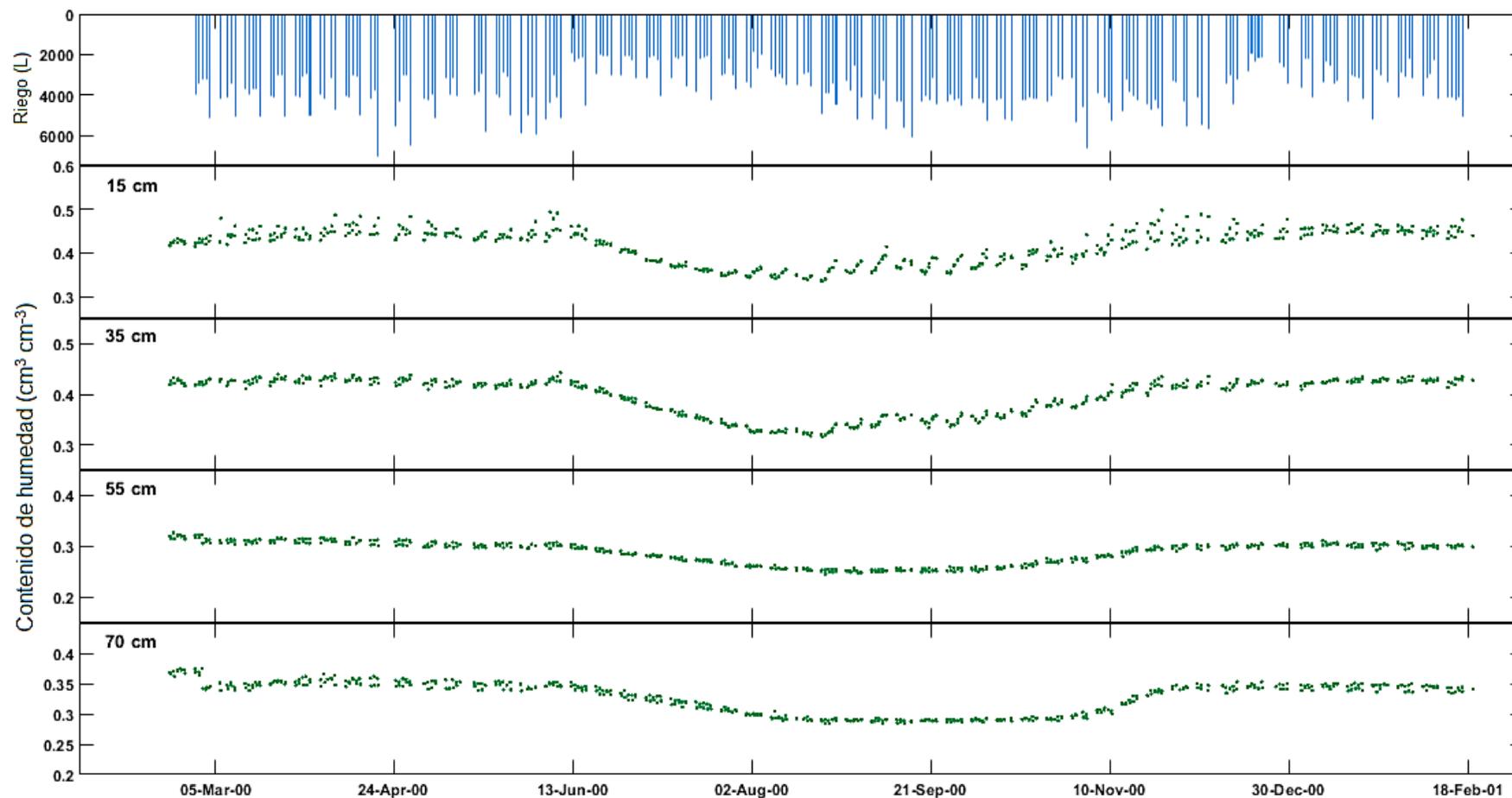


Figura 31: Lecturas de humedad volumétrica de suelo (corregidas) para el sector n° 2. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Tras la corrección de los valores obtenidos por los TDR se podía observar una escasa respuesta de estos frente a los riegos, registrándose una reducida variación en el contenido de humedad, a excepción del periodo de principios de junio del año 2000 hasta finales de noviembre del mismo año. Dado que el proceso de calibrado requiere de un conjunto de datos que abarque un periodo con contenido de humedad cercano a la saturación hasta niveles cercanos a los residuales, se escogió el periodo del 7/06/2000 – 15/09/2000 para esta labor.

5.2 VARIABLES METEOROLÓGICAS

A continuación, se muestran los valores de las variables meteorológicas (HR, T^a, Rg) registradas por la estación micrometeorológica situada en el interior del invernadero para el periodo simulado desde el 28/02/2000 al 16/02/2001.

Tabla 6: Temperaturas mensuales medias, máximas y mínimas. Se representan los valores de desviación estándar.

Temperaturas mensuales (°C)			
Mes	Media	Máx.	Mín.
feb-00	19,32 ± 0,23	30,70 ± 0,28	12,65 ± 0,49
mar-00	20,32 ± 1,39	32,86 ± 2,81	12,85 ± 1,36
abr-00	21,05 ± 1,60	34,13 ± 2,81	13,16 ± 1,52
may-00	22,53 ± 0,97	34,84 ± 2,63	14,94 ± 1,73
jun-00	22,95 ± 3,13	33,47 ± 3,43	16,98 ± 3,46
jul-00	24,49 ± 3,15	37,39 ± 2,68	17,66 ± 3,45
ago-00	25,57 ± 1,00	37,39 ± 2,95	19,42 ± 1,05
sep-00	24,13 ± 3,81	38,07 ± 3,27	17,25 ± 4,84
oct-00	22,90 ± 1,23	35,99 ± 2,68	17,20 ± 1,23
nov-00	20,37 ± 1,07	32,32 ± 4,01	15,01 ± 1,16
dic-00	18,42 ± 1,73	31,19 ± 4,73	12,02 ± 2,39
ene-01	15,05 ± 5,66	29,07 ± 5,92	7,37 ± 8,04
feb-01	19,91 ± 1,79	35,54 ± 4,15	12,05 ± 1,25

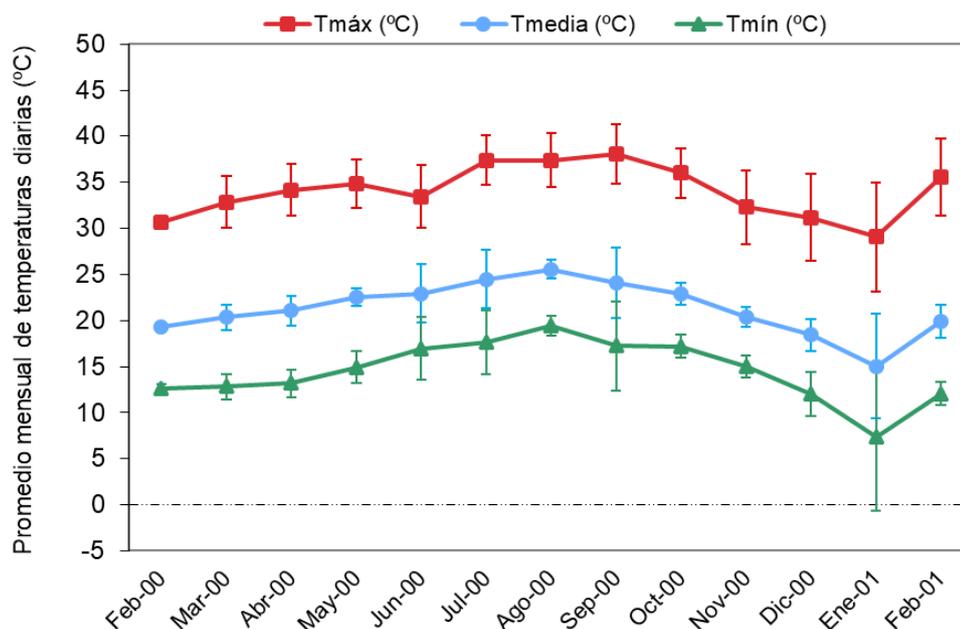


Figura 32: Promedio mensual de temperaturas diarias. Se representan los valores de desviación estándar.

Tabla 7: Humedades relativas mensuales medias, máximas y mínimas. Se representan los valores de desviación estándar.

Humedades Relativas mensuales (%)			
Mes	Media	Máx.	Mín.
feb-00	69,33 ± 2,88	85,00 ± 0	42,50 ± 2,12
mar-00	66,32 ± 9,22	83,87 ± 2,29	37,42 ± 12,24
abr-00	65,73 ± 4,55	83,50 ± 2,81	35,77 ± 7,94
may-00	67,96 ± 3,21	82,97 ± 1,68	41,13 ± 8,46
jun-00	67,79 ± 8,16	80,66 ± 3,91	47,10 ± 10,74
jul-00	68,20 ± 9,61	82,10 ± 3,46	41,54 ± 9,97
ago-00	71,81 ± 3,30	85,65 ± 2,37	44,55 ± 9,63
sep-00	69,31 ± 11,05	85,53 ± 2,50	37,40 ± 12,82
oct-00	73,40 ± 2,42	83,58 ± 2,57	43,32 ± 5,70
nov-00	73,69 ± 3,24	82,90 ± 2,68	47,00 ± 7,75
dic-00	73,91 ± 8,72	83,32 ± 4,18	48,71 ± 14,62
ene-01	75,12 ± 4,00	83,61 ± 2,29	49,97 ± 12,26
feb-01	60,89 ± 14,01	80,19 ± 5,16	29,38 ± 17,73

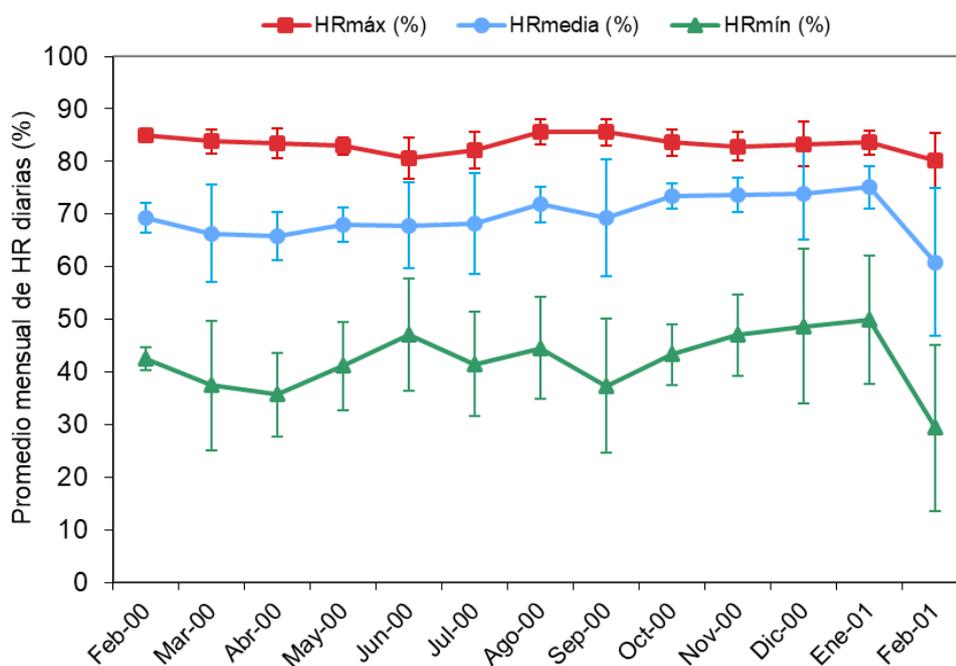


Figura 33: Promedio mensual de humedades relativas diarias. Se representan los valores de desviación estándar.

Tabla 8: Valores promedios mensuales de radiación global media diaria. Se representan los valores de desviación estándar.

Mes	Rg (W/m ²)
Feb-00	180,32 ± 4,57
Mar-00	160,93 ± 36,34
Abr-00	181,39 ± 45,04
May-00	175,10 ± 45,93
Jun-00	150,97 ± 65,40
Jul-00	133,96 ± 44,50
Ago-00	108,41 ± 32,11
Sep-00	164,45 ± 53,77
Oct-00	129,02 ± 55,23
Nov-00	85,96 ± 32,18
Dic-00	90,15 ± 27,70
Ene-01	92,31 ± 31,90
Feb-01	137,43 ± 31,44

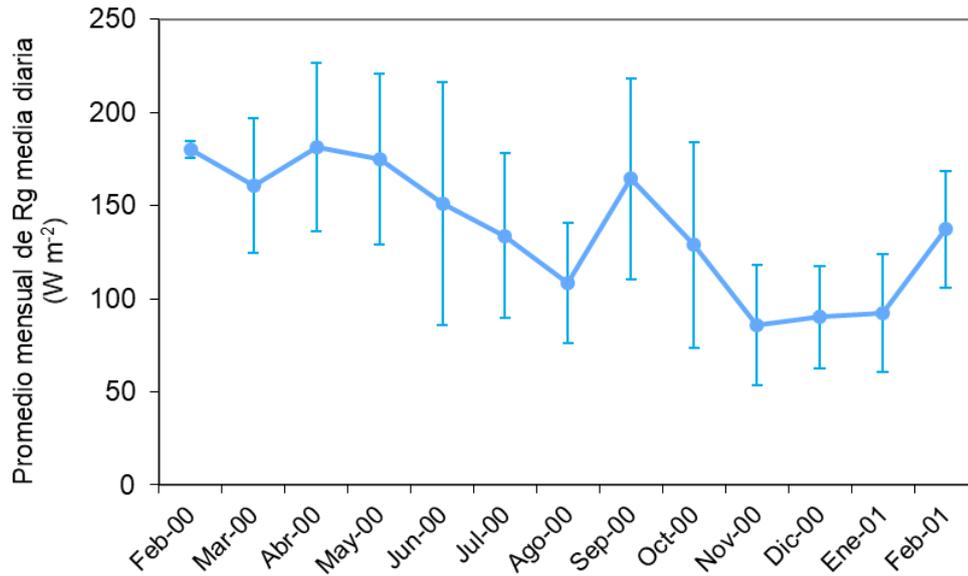


Figura 34: Promedio mensual de radiación global media diaria. Se representan los valores de desviación estándar.

Con el motivo de analizar la influencia que la lluvia pudiera tener en el modelo y debido a la dificultosa interpretación de los datos recogidos en campo, se emplearon los registros pluviométricos diarios de la estación meteorológica “Pajalillos” perteneciente al ICIA. En ellos se podían observar siete eventos con registros superiores o cercanos a los 10 mm, cuya influencia en las lecturas de TDR recogidas fue nula. El siete de diciembre del año 2000 se registró una precipitación de 58,9 mm, sin embargo, en las lecturas de TDR registradas ese día a una profundidad de 15 cm la variación del contenido de humedad es similar a la registrada en días anteriores (0,43 - 0,48%), careciendo de lecturas para los tres días posteriores al evento. La poca variabilidad presente en los datos frente a la magnitud de esta precipitación puede deberse a que se produjera después de que se realizara la lectura posterior al riego, a la una de la tarde. La reducida influencia de las precipitaciones se debe, en parte, a la cubierta de malla del invernadero y la interceptación de la lluvia por las hojas del cultivo. Esto hace que sea más difícil cuantificar el agua que entra al suelo por la reducida homogeneidad presente.

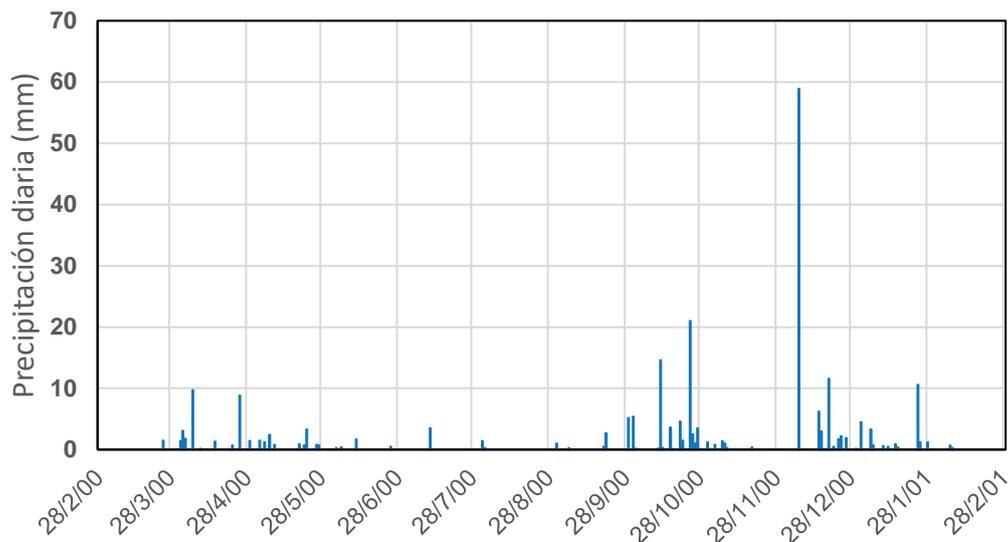


Figura 35: Precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica "Pajalillos" del ICIA. Periodo 28/02/2000 - 16/02/2001.

La cantidad total de lluvia registrada en el periodo fue de 235,3 mm.

5.3 VALORES DE ET_o , ET_c , EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Los valores obtenidos para el período 28/2/2000-16/2/2001 empleando los coeficientes de cultivo determinados por Santana et al., (1993) fueron los siguientes:

Tabla 9: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración para el periodo 28/2/2000 – 16/2/2001.

Mes	ET_o (mm)	ET_c (mm)	Evap. (mm)	Trans. (mm)
feb-00	5,83	4,75	0,89	3,86
mar-00	81,04	55,83	13,27	42,56
abr-00	90,91	54,55	21,84	32,71
may-00	92,38	60,02	36,23	23,79
jun-00	78,33	63,25	26,53	36,71
jul-00	74,98	74,71	18,94	55,77
ago-00	59,12	68,56	10,91	57,65
sep-00	90,35	118,06	13,45	104,60
oct-00	71,17	99,65	8,23	91,41
nov-00	41,72	60,69	3,97	56,72
dic-00	43,24	64,85	5,20	59,64
ene-01	41,08	54,06	5,73	48,33
feb-01	36,82	37,31	5,40	31,91
TOTAL	806,96	816,28	170,60	645,68

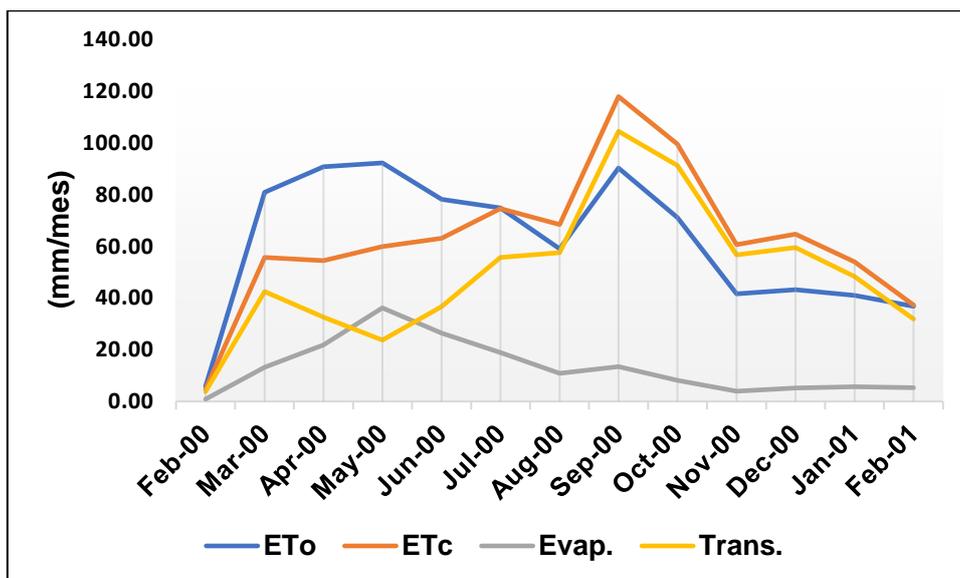


Figura 36: Valores de ET_0 , ET_c , evaporación y transpiración para el periodo 28/2/2000 – 16/2/2001.

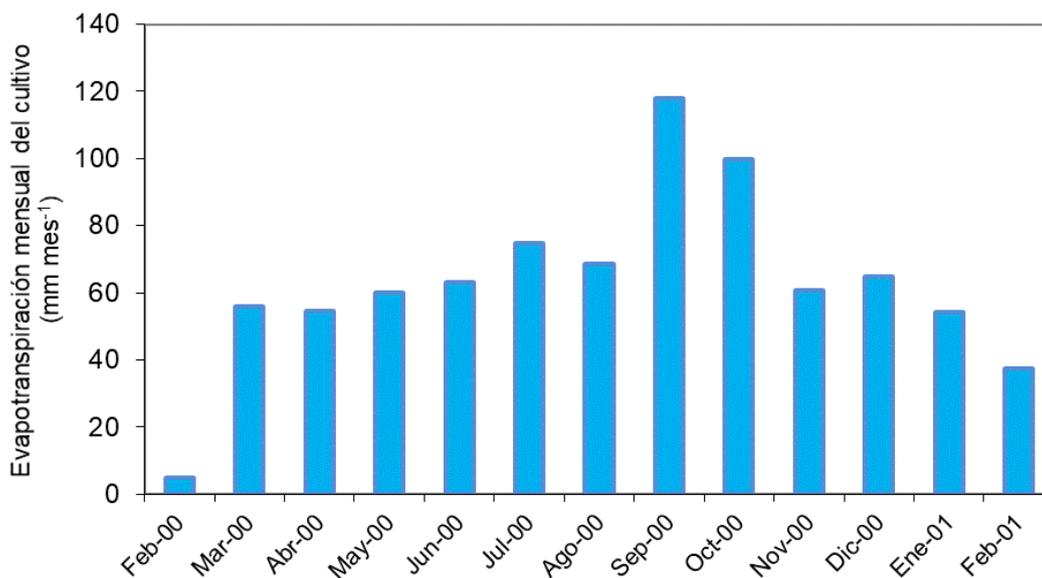


Figura 37: Valores de ET_c mensuales (28/02/2000 – 16/02/2001).

En ellos se puede apreciar como los valores de transpiración siguen una tendencia similar a la función de Índice de Área Foliar y valores reducidos de evapotranspiración del cultivo en los meses de abril, mayo y junio.

La correcta determinación de los parámetros asociados al cultivo, como lo son los descritos en este apartado, tienen una influencia importante en el

resultado final, ya que de ellos depende la magnitud de la extracción de agua por la planta, debido a que alteran el balance hídrico del dominio.

5.4 SIMULACIONES Y PROCESOS DE CALIBRADO

5.4.1 SIMULACIONES CON PARÁMETROS INICIALES

Se realizaron varias simulaciones preliminares empleando los parámetros obtenidos en campo (Ritter et al., 2004) para la visualización de las tendencias de los datos, obteniendo los siguientes resultados:

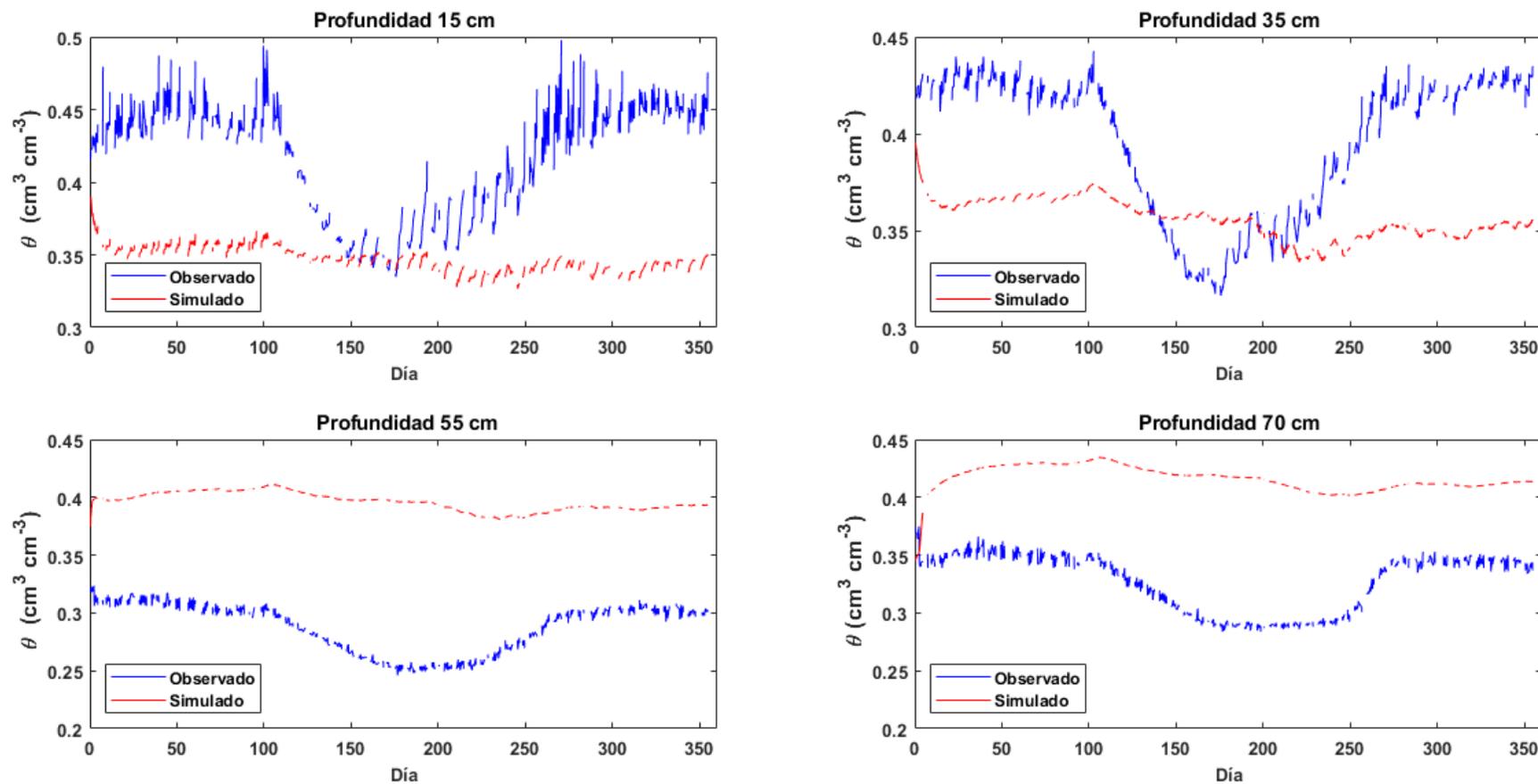


Figura 38: Resultados con parámetros iniciales. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Si bien los resultados distaban bastante de los recogidos en campo, se podían apreciar ligeros descensos en el contenido de agua simulado en el periodo de 200-260 días, iniciándose alrededor del día 100 de simulación.

Tras realizar un primer contacto con los resultados proporcionados por el modelo se procedió a llevar a cabo un proceso de simulación inversa dado que las lecturas registradas por los TDR para el tercer horizonte (55 cm de profundidad) contenían valores inferiores a los determinados como contenido de humedad residual para dicha profundidad. Además, la conductividad hidráulica saturada es un parámetro con gran variabilidad dentro de un mismo suelo debido a factores intrínsecos y extrínsecos al mismo (Deb et al., 2012).

El proceso de calibración inversa es un proceso lento en el que el programa realiza una elevada cantidad de iteraciones para obtener los parámetros que garantizan el mejor ajuste. Cada uno de estos procesos realizados consume más de tres horas, para el presente caso, en contraposición con los procesos de simulación directa, que se completan en un intervalo de tiempo cercano a los quince minutos.

Primeramente, se optimizaron los parámetros de humedad residual, contenido de humedad a saturación y conductividad hidráulica saturada para los cuatro horizontes de manera simultánea. Posteriormente se procedió a la optimización de los parámetros α y n siguiendo el mismo proceso. Los resultados obtenidos tras completarse el proceso fueron:

Tabla 10: Parámetros obtenidos por simulación inversa.

Horizonte	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	K_s (cm día ⁻¹)	α (cm ⁻¹)	n (-)
H1	0,272	0,553	280,39	0,0168	1,60
H2	0,255	0,528	105,42	0,0413	1,33
H3	0,160	0,414	113,15	0,0442	1,24
H4	0,182	0,482	7795,4	0,0542	1,23

El coeficiente de determinación R^2 para esta calibración fue de 0,91 y un error en el balance de masa del 0,56%, lo que indicaba un buen funcionamiento del dominio definido. Se procedió a la realización de una simulación con dichos parámetros, obteniendo el siguiente resultado:

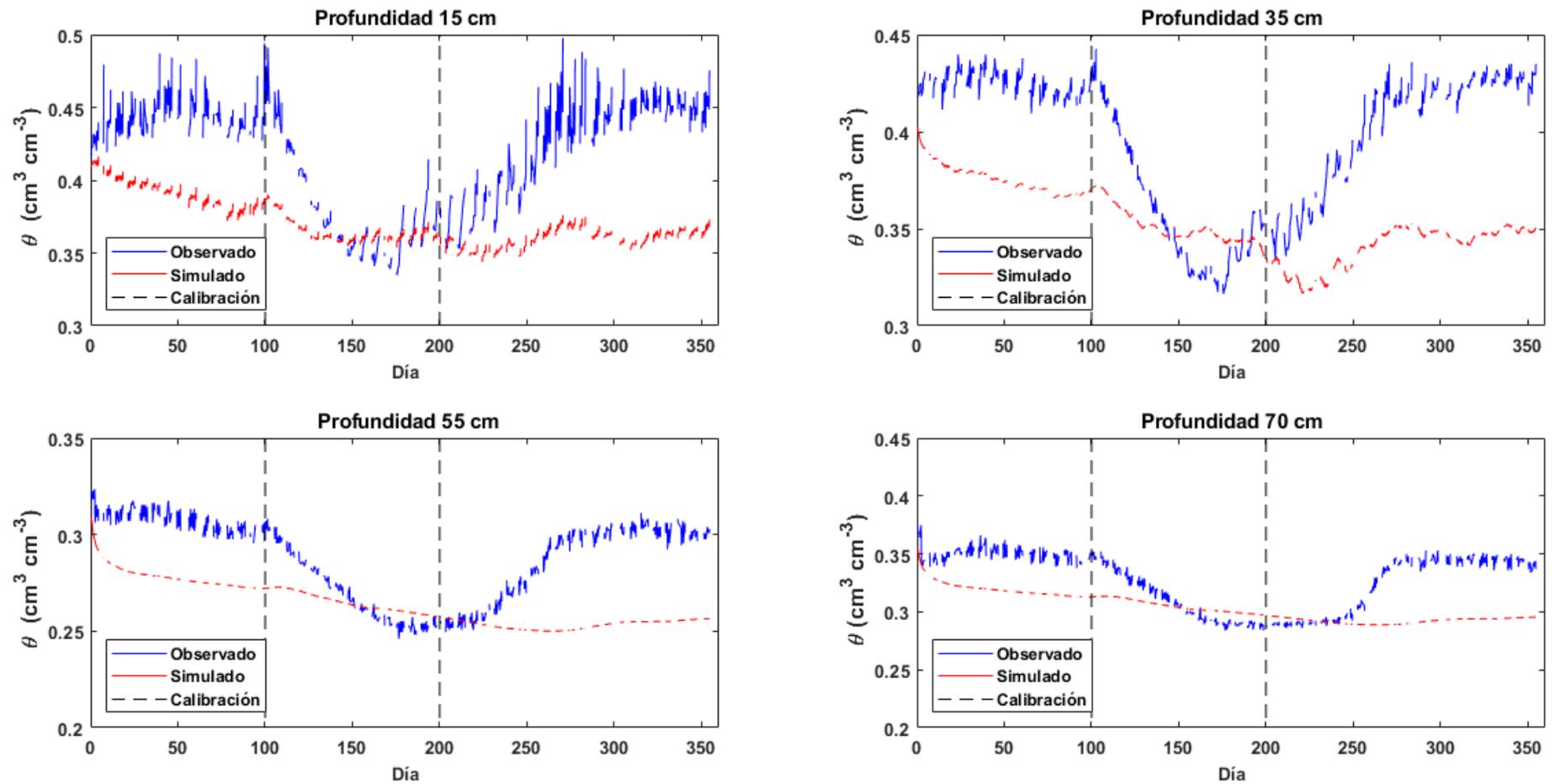


Figura 39: Simulación con parámetros obtenidos por calibración. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Para valorar la bondad del ajuste del modelo con las lecturas de campo se determinaron tres coeficientes, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2).

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) varía de 0 a ∞ , tal que un RMSE= 0 indica un ajuste perfecto del modelo a los datos. Respecto al coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) ($-\infty \leq \text{NSE} \leq 1$) un NSE = 1 indica un ajuste perfecto del modelo, mientras que $-\infty \leq \text{NSE} < 0.65$ es sintomático de una capacidad de predicción insatisfactoria.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 11: Estadísticos de ajuste del modelo, calibración n°1.

Profundidad	RMSE	NSE	R^2
15 cm	0,058	-1,225	0,251
35 cm	0,052	-0,994	0,349
55 cm	0,030	-1,017	0,228
70 cm	0,032	-0,597	0,249

Los valores de RMSE indicaban un mal ajuste del modelo, así como el NSE cuyo valor debería de estar próximo a uno para indicar un buen ajuste. El coeficiente de determinación describía una nula correlación frente a los resultados observados, siendo mayor para el segundo horizonte ($R^2 = 0,349$).

Tras valorar los resultados, se llevaron a cabo un gran número de simulaciones, más de cien, variando parámetros de profundidad radicular, número de emisores de los que recibía agua la planta, valores de evaporación y transpiración, puntos de entrada de agua en el domino, sin resultado alguno. Se recalcularon y revisaron también los parámetros de entrada del modelo, obteniendo los mismos valores.

Sin embargo, estas simulaciones realizadas tenían algo en común, los descensos en el contenido de humedad eran más acusados entre los días 200 – 270, frente a los registrados por las lecturas de campo, que presentaban un periodo descendiente entre los días 100-270. Esto hacía indicar que los coeficientes de cultivo empleado en el cálculo de la evapotranspiración no se ajustaban al comportamiento descrito por planta a la hora de extraer agua del

suelo. Para verificar esto se realizó una simulación con los parámetros iniciales variando los coeficientes de cultivo menores a uno por unos mayores a este. Se obtuvieron los siguientes resultados:

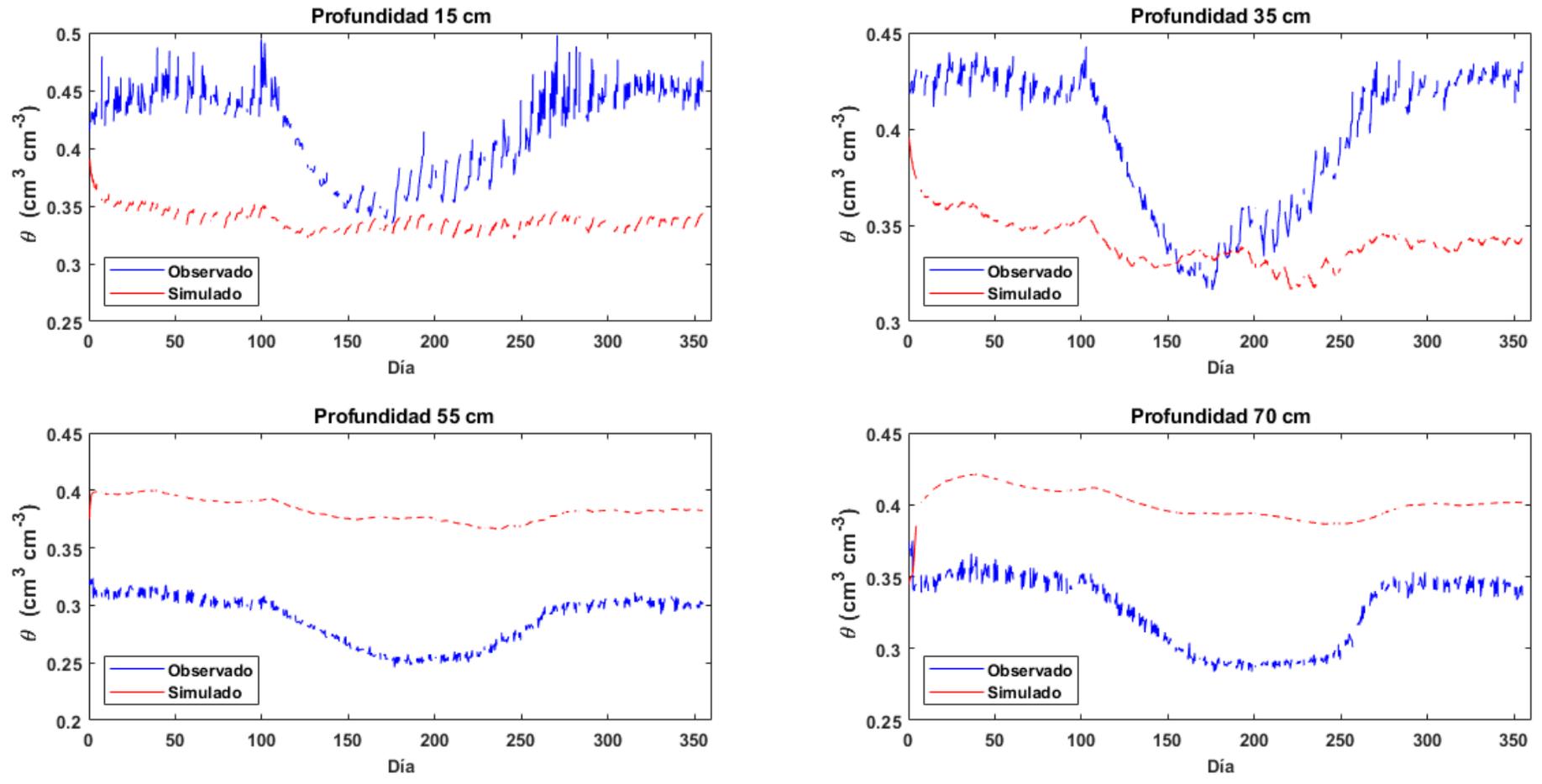


Figura 40: Resultados con parámetros iniciales, aumentando valores de K_c . En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

En esta simulación, aunque el modelo no se encontraba calibrado, se pudo apreciar como los valores de contenido de humedad presentaban un mayor descenso en el periodo de los 100-200 días de simulación, indicando que los coeficientes de cultivo inicialmente empleados no describían correctamente los meses de descenso en el contenido de humedad. Los coeficientes obtenidos por Santana et al., (1993) no diferencian entre una planta de primer año o una obtenida a partir de un hijo de la planta madre, para el segundo y posteriores años de cultivo. Sin embargo, diversos autores han demostrado un comportamiento hídrico diferente acorde al año de cultivo, siendo mayores los coeficientes de cultivo para plantas provenientes de un hijo (Basso et al., 2004). Estos coeficientes suelen estar validados para regiones de cultivo con climas definidos y suelen estar sujetos a amplios errores, lo que hace difícil su empleo en otras zonas (Carr et al., 2009). Un ejemplo a la variación y el error que presenta la determinación de estos coeficientes se puede encontrar en Basso et al., (2004), donde los coeficientes determinados presentan errores estándares que llegan a alcanzar valores de $\pm 0,5$.

5.4.2 SIMULACIÓN CON COEFICIENTES DE CULTIVO FAO

Se optó por el empleo de otros coeficientes que describieran mejor el consumo hídrico del cultivo, por lo que se emplearon valores del coeficiente del cultivo similares a los correspondientes al 2º año, según la FAO. Hay que tener en cuenta que estos valores están recomendados para un clima mediterráneo. Se procedió a la tabulación de los coeficientes de acuerdo con el periodo de plantación y la duración de las diferentes etapas, según los valores estipulados por la FAO.

Tabla 12: Valores tabulados de K_c (FAO).

Mes	K_c
Enero	1,1
Febrero	1
Marzo	1
Abril	1
Mayo	1
Junio	1,2
Julio	1,2
Agosto	1,1
Septiembre	1,1
Octubre	1,1
Noviembre	1,1
Diciembre	1,1

Tabla 13: Valores de ET_o , ET_c , evaporación y transpiración con coeficientes FAO.

Mes	ET_o (mm)	ET_c (mm)	Evap. (mm)	Trans. (mm)
feb-00	5,83	5,83	1,10	4,73
mar-00	81,04	81,04	19,47	61,57
abr-00	90,91	90,91	36,40	54,51
may-00	92,38	92,38	55,65	36,72
jun-00	78,33	93,99	39,79	54,20
jul-00	74,98	89,97	23,03	66,94
ago-00	59,12	65,04	10,37	54,67
sep-00	90,35	99,39	11,37	88,02
oct-00	71,17	78,29	6,47	71,82
nov-00	41,72	45,90	3,00	42,89
dic-00	43,24	47,56	3,82	43,74
ene-01	41,08	45,18	4,84	40,34
feb-01	36,82	36,82	5,34	31,48
TOTAL	806,96	872,29	220,66	651,64

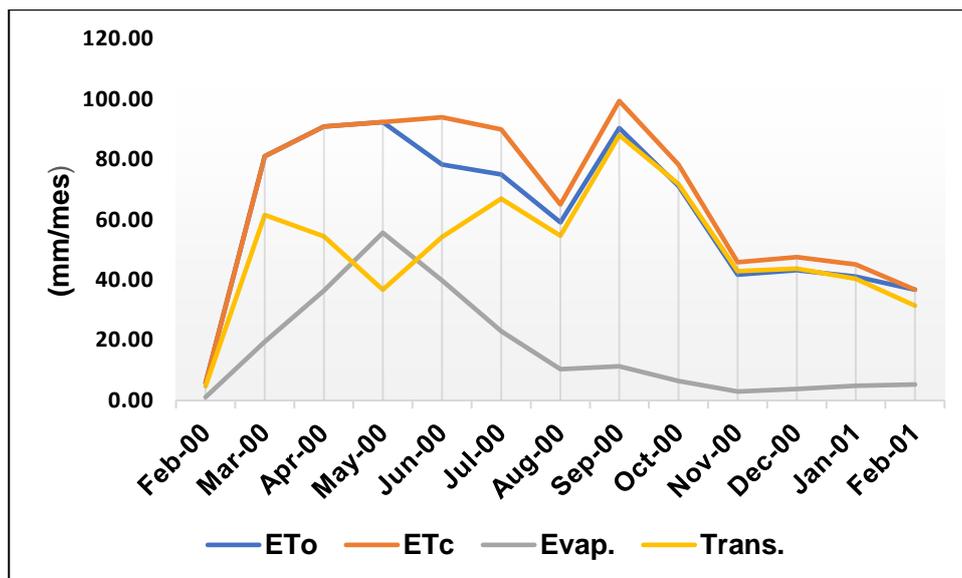


Figura 41: Valores de ET₀, ET_c, evaporación y transpiración con coeficientes FAO.

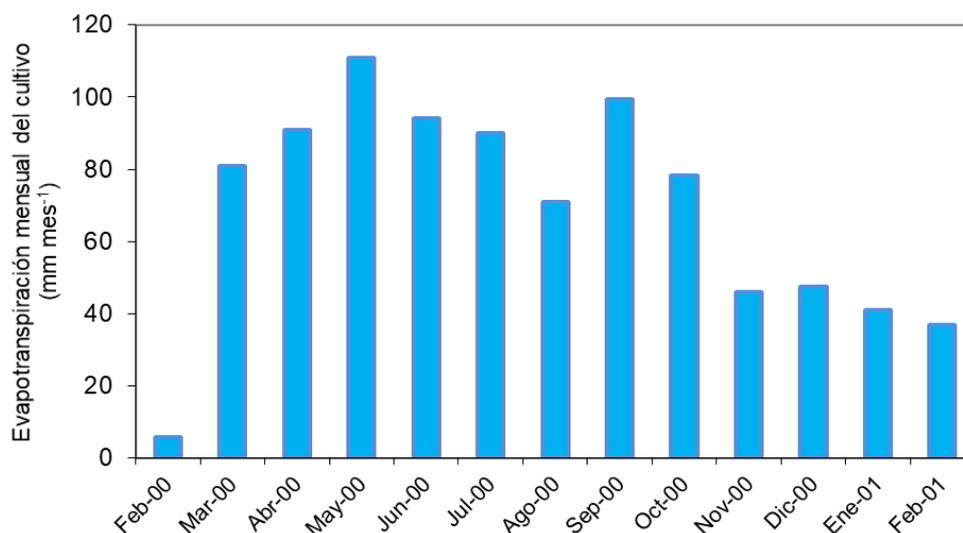


Figura 42: Valores de ET_c mensuales, coeficientes FAO (28/02/2000 – 16/02/2001).

Se realizó una calibración del modelo empleando dichos valores tabulados, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14: Simulación inversa con parámetros de cultivo FAO.

Horizonte	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	K _s (cm día ⁻¹)	α (cm ⁻¹)	n (-)
H1	0,276	0,522	12,81	0,0206	1,58
H2	0,298	0,549	24,64	0,0379	1,42
H3	0,195	0,456	66,83	0,1266	1,21
H4	0,276	0,594	410,2	0,1222	1,21

El coeficiente de determinación obtenido en este proceso de calibración fue de $R^2 = 0,75$, con un error reducido en el balance de masa.

Con estos parámetros se llevó a cabo una simulación con el siguiente resultado:

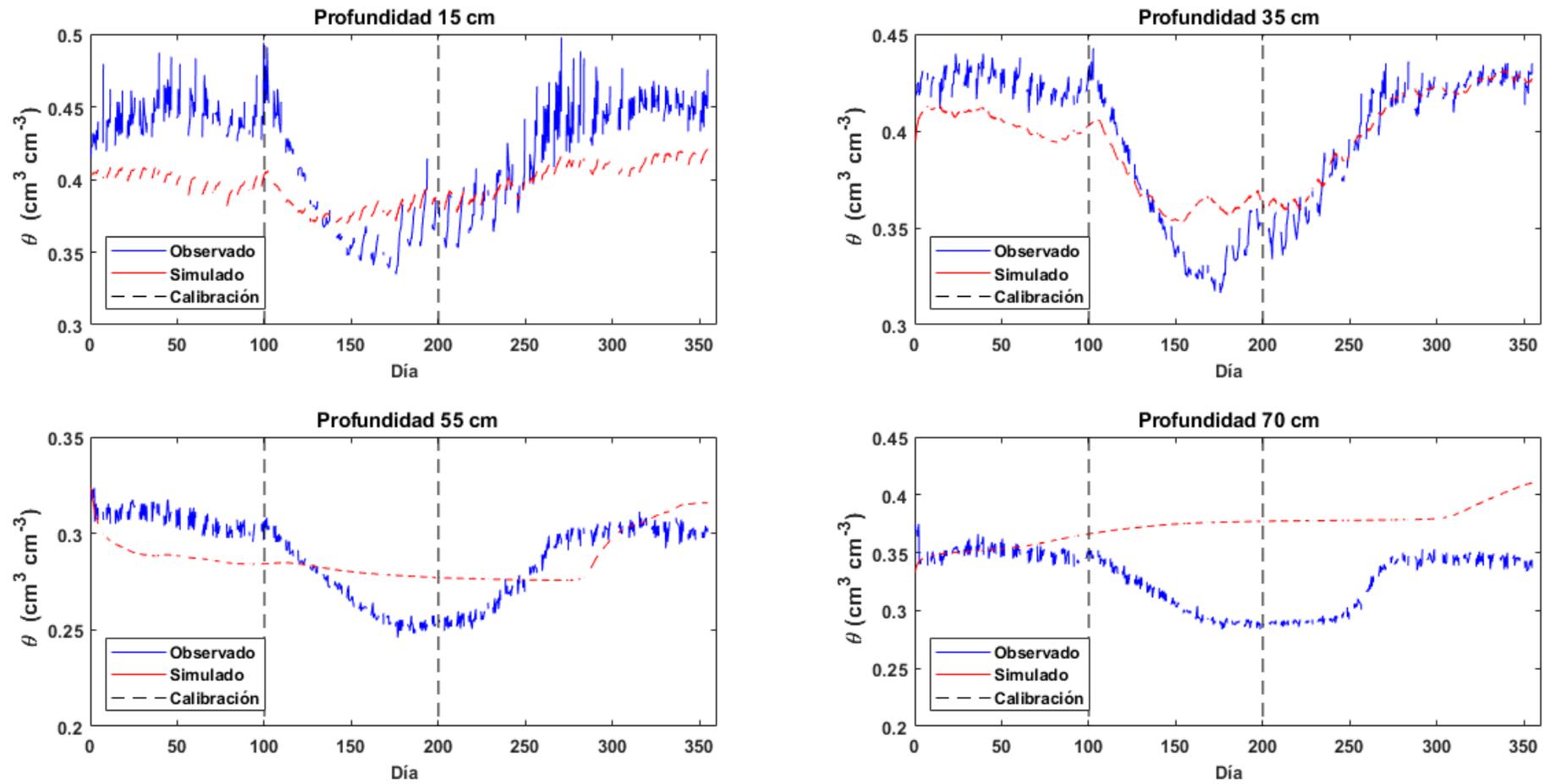


Figura 43: Resultados con modelo calibrado a partir de coeficientes FAO. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Los estadísticos correspondientes a la simulación:

Tabla 15: Estadísticos de ajuste del modelo, calibración nº 2.

Profundidad	RMSE	NSE	R ²
15 cm	0,0357	0,158	0,663
35 cm	0,018	0,748	0,847
55 cm	0,017	0,353	0,362
70 cm	0,058	-4,375	0,092

siendo RMSE la raíz del error cuadrático medio, NSE el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) y R² el coeficiente de determinación.

Esta vez el modelo arrojaba una mejor respuesta, obteniendo un buen ajuste a una profundidad de 35 cm, como indica el coeficiente de determinación de 0,84, un reducido RMSE y un valor de NSE cercano al uno (0,748). A pesar de ello, el resto de los horizontes, especialmente el más profundo (70 cm), no se ajustaba a los datos recogidos, presentando una nula correlación. Puede influir la determinación de los parámetros del modelo de VG-M solamente mediante lecturas de contenido de humedad, sin apoyarse en lecturas de potencial hídrico.

El coeficiente de cultivo juega un papel esencial a la hora del correcto ajuste del modelo de simulación, como ha quedado comprobado en este caso. Esto va unido a los valores de índice de área foliar, que varían según la etapa de desarrollo del cultivo. Por lo tanto, el correcto ajuste de estos parámetros de acuerdo con el estado fenológico de la planta, además del cultivar, tienen un peso importante a la hora de la adecuación de los valores simulados con la realidad. Esto tiene una mayor importancia cuando se hace uso del proceso de simulación inversa para la determinación de los parámetros del suelo, porque se obtendrían unos parámetros calibrados para un periodo donde los balances hídricos no se encuentran bien definidos, introduciendo una mayor incertidumbre en el modelo.

En la comprobación de las diversas opciones de simulación disponibles, se planteó la entrada de agua en el dominio por una superficie menor, de 5 cm de radio, a ver si así se conseguía una mejoría en los resultados.

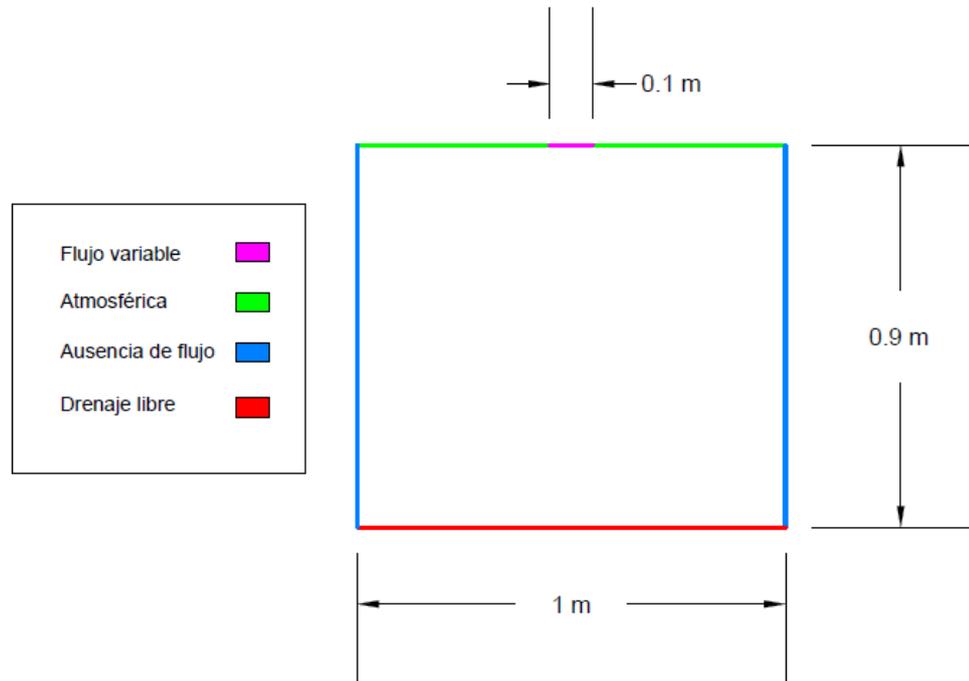


Figura 44: Condiciones de contorno con flujo variable en un área de 5 cm de radio. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

Desafortunadamente, los valores obtenidos en las simulaciones mostraban este aspecto:

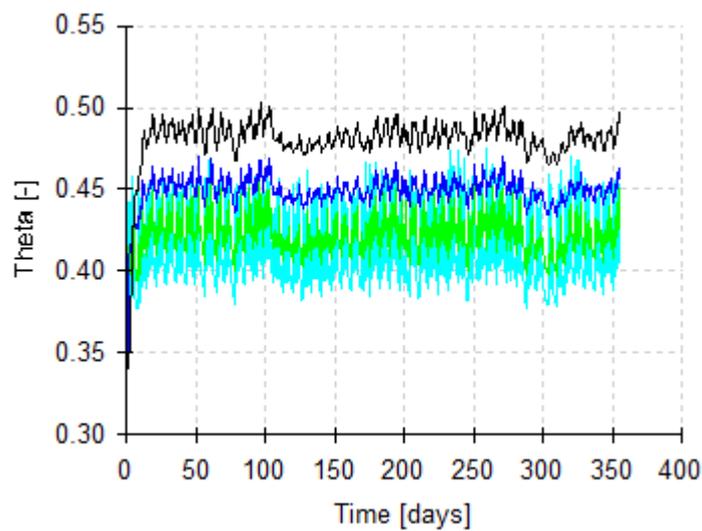


Figura 45: Resultados de simulación con entrada de agua de 10 cm. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

5.5 REFORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Tras los malos ajustes obtenidos con el planteamiento en sentido longitudinal a la línea de emisores, se barajó la opción de simular un plano transversal a esta, evitando así la simplificación del problema que acarrea considerar el plano longitudinal. En el planteamiento seguido en este trabajo se considera la entrada de agua de tres emisores que se encontraban repartidos a ambos lados de la planta, el sistema radicular y los TDR en el mismo plano vertical. Esto puede conducir a error la simulación, ya que no se estarían definiendo las condiciones de campo correctamente. Para evitar dicho error se planteó el siguiente esquema:

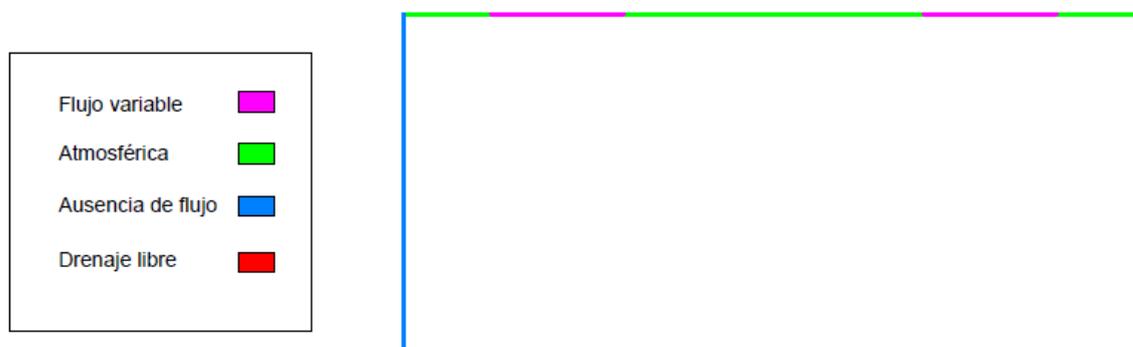


Figura 46: Nuevo dominio a simular.

En el que se consideraba la entrada de agua a ambos lados de la planta, y en el que se podía definir la posición de los TDR dentro del sistema radicular. Sin embargo, en los datos disponibles no se contaba con la longitud entre tuberías de riego, así como las coordenadas exactas que había que asignarle a los TDR en el sistema radicular. También, esta versión del modelo contaba con la limitación de poder definir un único flujo variable, por lo que esto conllevaría asumir un flujo de entrada de la misma magnitud en ambos lados, que no era el caso, dado que la planta recibía agua de un emisor por un lateral y de dos por el lado contrario al foso.

6. CONCLUSIONES

En las condiciones en las que se realizó este estudio se puede colegir lo siguiente:

- 1) La insuficiente caracterización de la evolución del coeficiente de cultivo y el índice de área foliar de las variedades de platanera cultivadas constituye una limitación considerable en el éxito de la simulación de la dinámica del agua en el suelo, por lo que resulta importante contar con más información de estos parámetros para el uso del modelo HYDRUS-2D.

- 2) Las limitaciones derivadas del empleo de un modelo bidimensional (valor único de flujo variable, considerar que las sondas TDR, el sistema radicular y la entrada de agua procedente de los emisores se encuentran en un mismo plano vertical) para la simulación de las condiciones de campo presentes en el proyecto de investigación IDEASS (SC99-024-C2), conllevan una deficiente representación de la realidad, la cual a su vez puede tener un papel importante a la hora de obtener buenos resultados. Por lo tanto, se recomienda el empleo de un modelo tridimensional, como puede ser el HYDRUS 2D/3D que permita definir de manera fehaciente las condiciones de campo presentes en dicho proyecto.

Under the conditions that this study was conducted, the following can be concluded:

- 1) The insufficient characterization of the evolution of the crop coefficient and the leaf area index of the banana varieties used constitutes a considerable limitation in the success of the simulation of water dynamics in the soil, so it is important to have more information on these parameters for the use of the HYDRUS-2D model.

- 2) The limitations derived from the use of a two-dimensional model (single variable flow value, consider that the TDR probes, the root system and the entry of water from the emitters are in the same vertical plane) for the simulation of the conditions of field present in the IDEASS research project (SC99-024-C2), entail a poor representation of reality, which can play an important role in obtaining good results. Therefore, the use of a three-dimensional model is recommended, such as the HYDRUS 2D / 3D that allows to define in a reliable way the field conditions present in that project.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. EUR-LEX. Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. [Fecha de consulta: 1 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:31991L0676>

AGROCALBILDO. Normativa > Buenas prácticas agrícolas. [Fecha de consulta: 3 de julio de 2019]. Disponible en Internet: http://www.agrocabildo.org/sostenibilidad_practicas.asp

ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; PUIG, J.; POCH, R.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Evaluación de los modelos numéricos de flujo de agua en el suelo HYDRUS-2D y SIMDAS en riego localizado. *Actas de las VI Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 2003, vol. 6, p. 279-288.

ARBAT, G.; PUIG, J.; BARRAGÁN, J.; BONANY, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Modelación Directa e Inversa de la Dinámica del Agua en una Plantación de Manzanos Regada por Microaspersión. *Actas de las VII Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 2005, vol. 7, p. 243-248.

ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Distribución del agua en el suelo en riego por superficie: aplicación del código Hydrus. *Actas de las VIII Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 2007, vol. 8, p. 305-312.

ARCGIS. Tenerife Soil Taxonomy. [Fecha de consulta: 5 de julio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.arcgis.com/apps/PublicInformation/index.html?appid=0cffa8a465cc4a058a68cf1d182e0e9b>

ARMAS, S.; HERNÁNDEZ MORENO, J. M.; MUÑOZ-CARPENA, R. *Propiedades físicas de suelos volcánicos cultivados con características ándicas*. Universidad de La Laguna - Centro Superior de Ciencias Agrarias, 2001.

ASPROCAN. Estadísticas de producción y comercialización de Plátano de Canarias (Año 2017). [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://platanodecanarias.es/wp-content/uploads/2016/10/dossier-estadisticas-2018.pdf>

AUTOVINO, D.; RALLO, G.; PROVENZANO, G. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with HYDRUS-2D: Model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 2018, vol. 203, p. 225-235.

BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; LIMA-FILHO, J. M. P.; SILVA, J. A. M.; SILVA, E. E. G.; RAMOS, C. M. C.; SEDIYAMA, G. C. Guidelines for irrigation scheduling of banana crop in São Francisco Valley, Brazil. II - Water consumption, crop coefficient, and physiological behavior. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2004, vol. 26 n°3, p.464-4

BLANDA, F.; PROVENZANO, G.; RALLO, G.; MINACAPILLI, M.; AGNESE, C. Mediterranean environment assessing agro-hydrological models to schedule irrigation for crops of Mediterranean environment. *Options Méditerranéennes*, 2008, vol. 284, p. 275–284.

CABILDO DE TENERIFE. Plan Hidrológico de Tenerife. [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.aquastenerife.org/images/pdf/PHT1erCiclo/I-DocumentoInformacion/I-2-Anejos/I-2-Anejo7-EstudioGralDemarcacion.pdf>

CAMPBELL SCIENTIFIC. TE525MM-L, Metric Rain Gage with 9.6 in. [Fecha de consulta: 20 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.campbellsci.com/te525mm-l>

CARR, M. The water relations and irrigation requirements of banana (*Musa spp.*). *Experimental Agriculture*, 2009, vol. 45. p. 333 - 371.

DEB, S.; SHUKLA, M. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Sciences*, 2012, vol. 8 n°5, p. 489-502.

DINGMAN, S. L. *Physical Hydrology*. 3ª ed. Illinois: Waveland Press, Inc, 2014.

FAO. Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *Centre for Agricultural Publishing and Documentation*. 1978.

GOALKICKER. MATLAB Notes for Professionals. [Fecha de consulta: 3 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://books.goalkicker.com/MATLABBook/>

GOBIERNO DE CANARIAS. Contaminación por nitratos de origen agrario, Conserjería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: http://www.gobiernodecanarias.org/agricultura/agricultura/temas/contaminacion_nitratos/

GOBIERNO DE CANARIAS. DECRETO 49/2000, de 10 de abril, por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas vulnerables por dicha contaminación. [Fecha de consulta: 1 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.gobiernodecanarias.org/boc/2000/048/003.html>

GOBIERNO DE CANARIAS. El cultivo del plátano en Canarias. [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursosdigitales/files/formidable/Cultivo-platanera.pdf>

GOBIERNO DE CANARIAS. Informe estadístico - Mapa de cultivos de Tenerife, Campaña 2015-2016. [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: http://www.gobiernodecanarias.org/cmsgobcan/export/sites/agricultura/agricultura/galerias/doc/obrasRegadios/INFORME_estadistico_tf_2016.pdf

GOBIERNO DE CANARIAS. ORDEN de 11 de febrero de 2000, por la que se aprueba el Código de Buenas Prácticas Agrarias de la Comunidad Autónoma de Canarias. [Fecha de consulta: 1 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.gobiernodecanarias.org/boc/2000/023/003.html>

GOBIERNO DE CANARIAS. ORDEN de 19 de mayo de 2009, por la que se modifica el Programa de Actuación previsto en la Orden de 27 de octubre de 2000, que establece el Programa de Actuación a que se refiere el artículo 6 del Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, con el objeto de prevenir y reducir la contaminación causada por los nitratos de origen agrario. [Fecha de consulta: 1

de junio de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.gobiernodecanarias.org/boc/2009/099/001.html>

GOBIERNO DE CANARIAS. Plátano canario. [Fecha de consulta: 22 de junio de 2019]. Disponible en Internet: http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Pl%C3%A1tano_canario

IAGUA. Eutrofización. Causas, consecuencias y soluciones. [Fecha de consulta: 6 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.iagua.es/noticias/sewervac-iberica/eutrofizacion-causas-consecuencias-y-soluciones>

ICIA. Datos históricos isla de Tenerife, Estación TF106 Valle de Guerra - Pajalillos. [Fecha de consulta: 12 de agosto de 2019]. Disponible en Internet: https://www.icia.es/icia/index.php?option=com_content&view=article&id=4032&Itemid=100052&lang=es

INTERNATIONAL SOIL MODELING CONSORTIUM. Model collection. [Fecha de consulta: 3 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal>

KIRKHAM, J. M.; SMITH, C. J.; DOYLE, R. B.; BROWN, P. H. Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). *PeerJ*, 2019, vol. 6, e6002.

MATHWORKS. MATLAB - Answers, Get answers to your MATLAB and Simulink questions. [Fecha de consulta: 5 de abril de 2019]. Disponible en Internet: https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/index/?s_tid=gn_mlc_an

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA. Zonas vulnerables a contaminación por nitratos (Informe cuatrienio 2012-2015. Dir 91/676/CEE). [Fecha de consulta: 3 de junio de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/zonas-vulnerables.aspx>

MORILLO, J.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J.; MARTÍN ARROYO, M.; CAMACHO, E.; MONTESINOS, P. Diseño del pulso óptimo de riego en el cultivo de fresa con el

modelo numérico Hydrus 2D. *XXXIII Congreso Nacional de Riegos, Universitat Politècnica de València*, 2015, p. 529-539.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research (USA)*, 1976, vol. 12 nº3, p. 513-522.

MUÑOZ-CARPENA, R.; FERNÁNDEZ GALVÁN, D.; GONZÁLEZ TAMARGO, G.; HARRIS, P. Diseño de una estación micrometeorológica automática de bajo coste para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. *Riegos y Drenajes XXI*, 1996, nº88, p.17-25.

MUÑOZ-CARPENA, R.; PARSONS, J.E.; DUCHEYNE, S. Simulación con el modelo numérico WAVE del transporte de agua y nitrógeno a través de la zona no saturada en un cultivo de platanera. *Actas de las IV Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 1999, vol. 4, p. 163-168.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10 nº3 p. 282-290.

NYOMBI, K.; VAN ASTEN, P.J.A.; LEFFELAAR, P.A.; CORBEELS, M.; KAIZZI, K.; GILLER, K. Allometric growth relationships of East Africa highland bananas (*Musa AAA-EAHB*) cv. Kisansa and Mbwazirume. *Annals of Applied Biology*, 2009, vol. 155 nº3, p. 403-418.

PC-PROGRESS. Discussion Forums - Hydrus 2D (old version 1996 - 2005). [Fecha de consulta: 3 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.pc-progress.com/forum/viewforum.php?f=1>

PC-PROGRESS. The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.0, April 1999. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2019]. Disponible en Internet: https://www.pc-progress.com/Downloads/Pgm_Hydrus2D/HYDRUS2D.PDF

QINSI, H.; LIA, S.; KANGA, S.; YANGB, H.; QINA, S. Simulation of water balance in a maize field under film-mulching drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 2018, vol. 210 p. 252–260

RASSAM, D.; ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. TH. *Modelling Variably Saturated Flow with HYDRUS-2D*. First Edition. Australia: ND Consult, 2003.

REGALADO, C.M.; MUÑOZ-CARPENA, R.; SOCORRO, A. R.; HERNÁNDEZ, J. M. ¿Por qué los suelos volcánicos no siguen la ecuación de Topp? *Actas de las V Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo*, 2001, vol. 5 p. 75-82.

RITTER, A. PMETp-w: Penman-Monteith's Potential Evapotranspiration - WINDOWS GUI, Updated Sep. 2016. [Fecha de consulta: 14 de abril de 2019]. Disponible en Internet: https://aritter.webs.ull.es/Software/PMETp-w_v14.zip

RITTER, A.; HUPET, F.; MUÑOZ-CARPENA, R.; VANCLOOSTER, M.; LAMBOT, S. Técnicas de optimización inversa aplicadas a la simulación del flujo de agua en la ZNS en un cultivo de plátanos en Tenerife. *Actas de las V Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 2001, vol. 5, p. 109-115.

RITTER, A.; MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; VANCLOOSTER, M.; LAMBOT, S. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 295, p. 124-139.

RUIZ-SALLERES, I. Simulación y validación del contenido de agua en el suelo con el modelo Hydrus. *IV Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT*, 2011, nº4, p. 42-44.

SANSOULET, J.; CABIDOUCHE, Y-M.; CATTAN, P.; RUY, S.; ŠIMŮNEK, J. Spatially Distributed Water Fluxes in an Andisol under Banana Plants: Experiments and Three-Dimensional Modeling. *Vadose Zone Journal*, 2008, vol. 7 nº2, p. 819–829.

SANTAMARTA CEREZAL, J. C. *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Colegio de Ingenieros de Montes, Tenerife, 2013. ISBN:978-84-616-3858-1.

SANTANA, J.L.; SUAREZ, C.L.; FERERES, E. Evapotranspiration and crop coefficients in banana. *Acta Horticulturae*, 1993, vol. 335, p. 341-348.

SELIM, T.; BOUKSILA, F.; HAMED, Y.; BERNDTSSON, R.; BAHRI, A.; PERSSON, M. Field experiment and numerical simulation of point source irrigation with multiple tracers. *PloS one*, 2018, vol. 13 n°1.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. TH.; GRIBB, M. M.; HOPMANS, J. W. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil & Tillage Research*, 1998, vol. 47, p. 27-36.

SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ŠIMŮNEK, J.; SHOUSE, P. J. Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, vol. 130 n°4.

SOIL SURVEY STAFF. *Keys to Soil Taxonomy*. 12^a ed. Washington DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014.

STACK OVERFLOW. MATLAB – Questions. [Fecha de consulta: 20 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://es.stackoverflow.com/questions/tagged/matlab>

TOMER, M.D.; CLOTHIER, B.E.; VOGELER, I.; GREEN, S. A dielectric–water content relationship for sandy volcanic soils in New Zeland. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, vol. 63 n°4, p. 777-781.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research (USA)*, 1980, vol.16 n°3, p. 574-582.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN. MATLAB para ingenieros. [Fecha de consulta: 3 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <http://dea.unsj.edu.ar/control2/matlab%20para%20ingenieros.pdf>

VAN GENUCHTEN, M. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, vol. 44, p. 892-898.

WANG, Z; JIUSHENG, L.; YANFENG, L. Assessing the effects of drip irrigation system uniformity and spatial variability in soil on nitrate leaching through simulation. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. 2016, vol. 59, p. 279-290.

WEITZ, A.M.; GRAUEL W.T.; KELLER, M.; VELDKAMP, E. Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resources Research (USA)*, 1997, vol. 33 n°6, p. 1241-1249.

8. APÉNDICES

En el transcurso de este trabajo se realizó la corrección de las lecturas de humedad volumétrica de suelo obtenidas en los seis sectores instrumentados, aunque a posteriori fueron empleadas solo las lecturas del sector nº2. A continuación, se representan las lecturas de humedad volumétrica de suelo corregidas para todos los sectores.

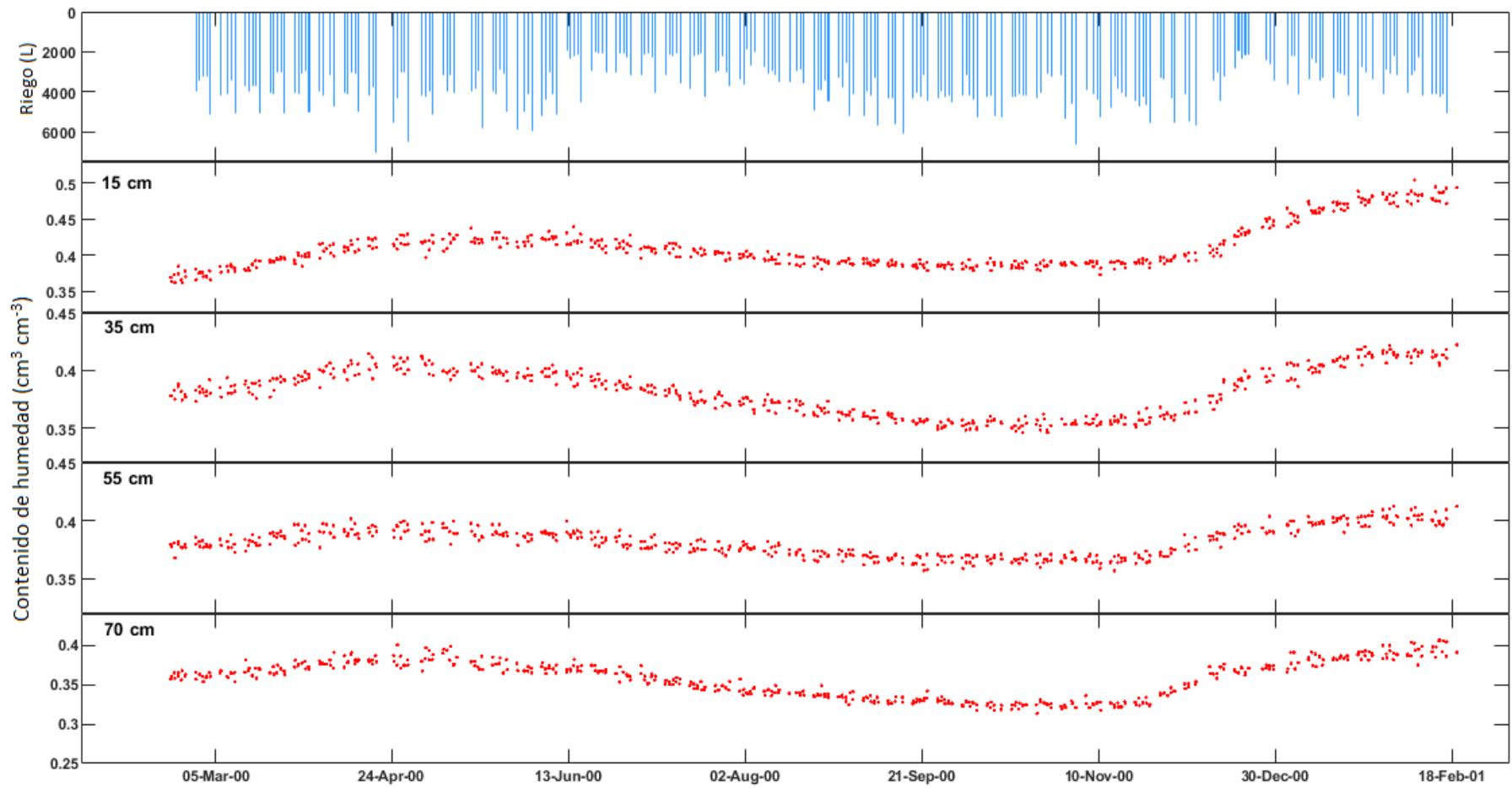


Figura 47: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº1. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

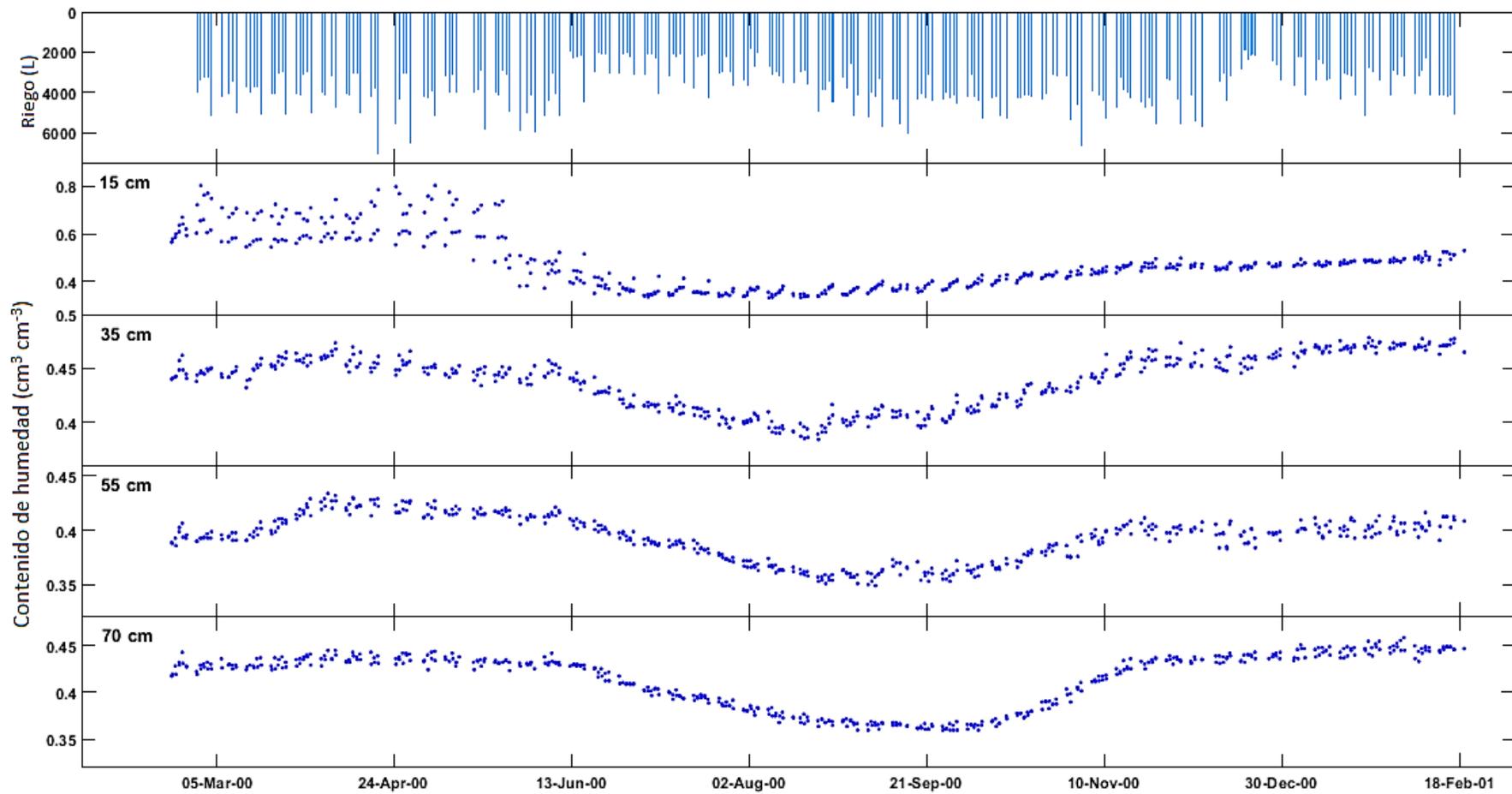


Figura 48: Lecturas de TDR corregidas – Sector n°3. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

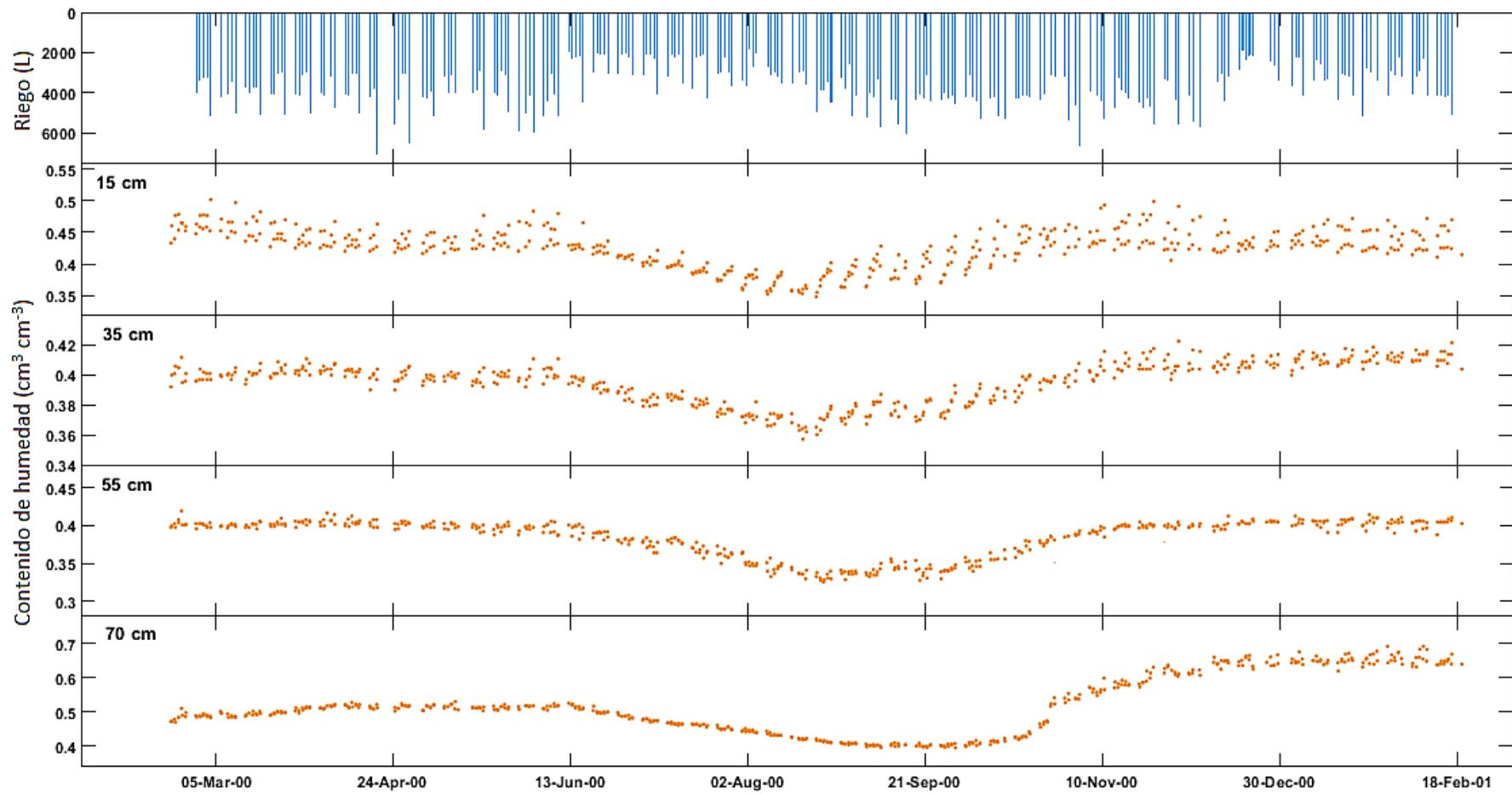


Figura 49: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº4. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

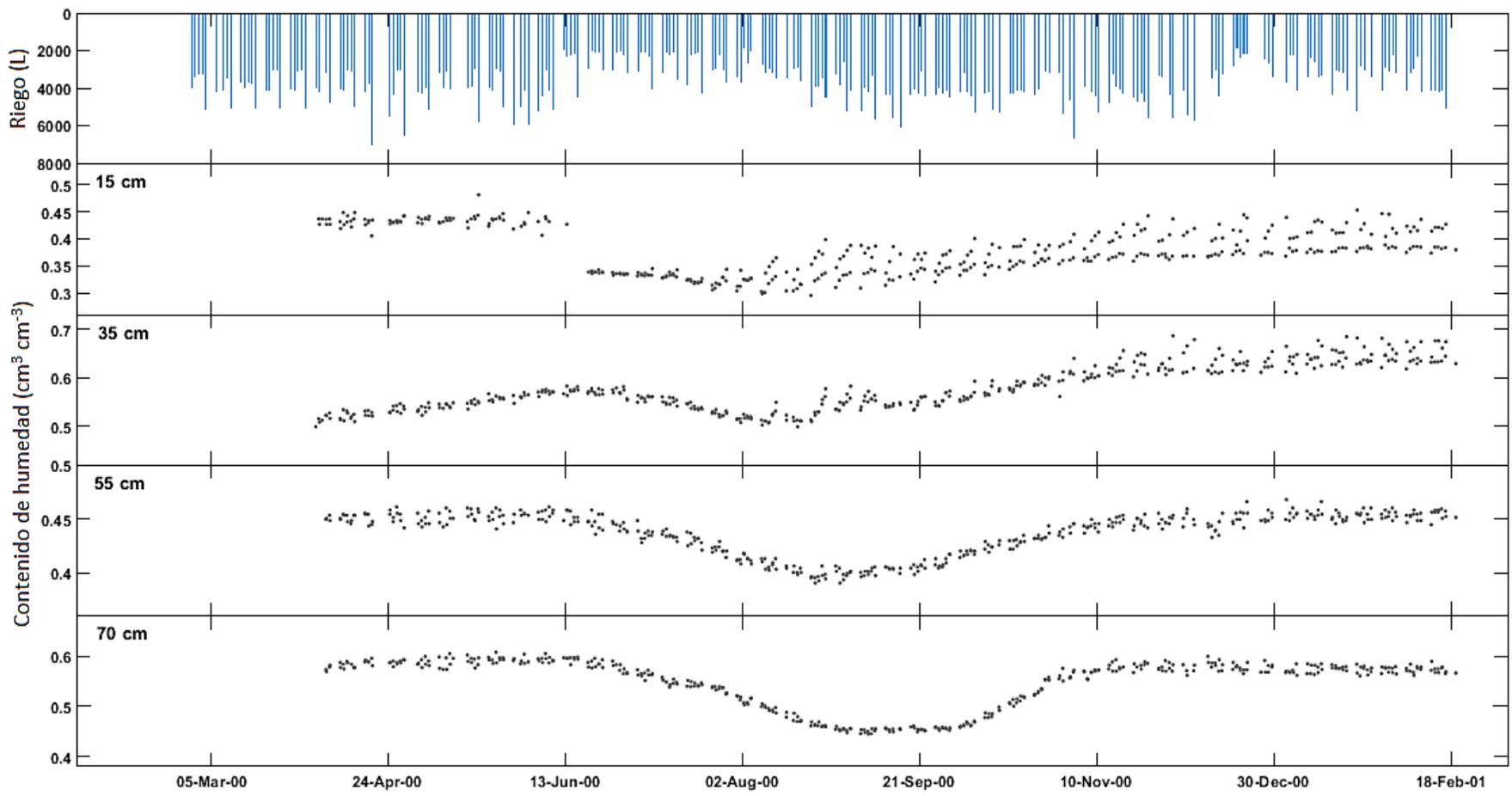


Figura 50: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº5. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

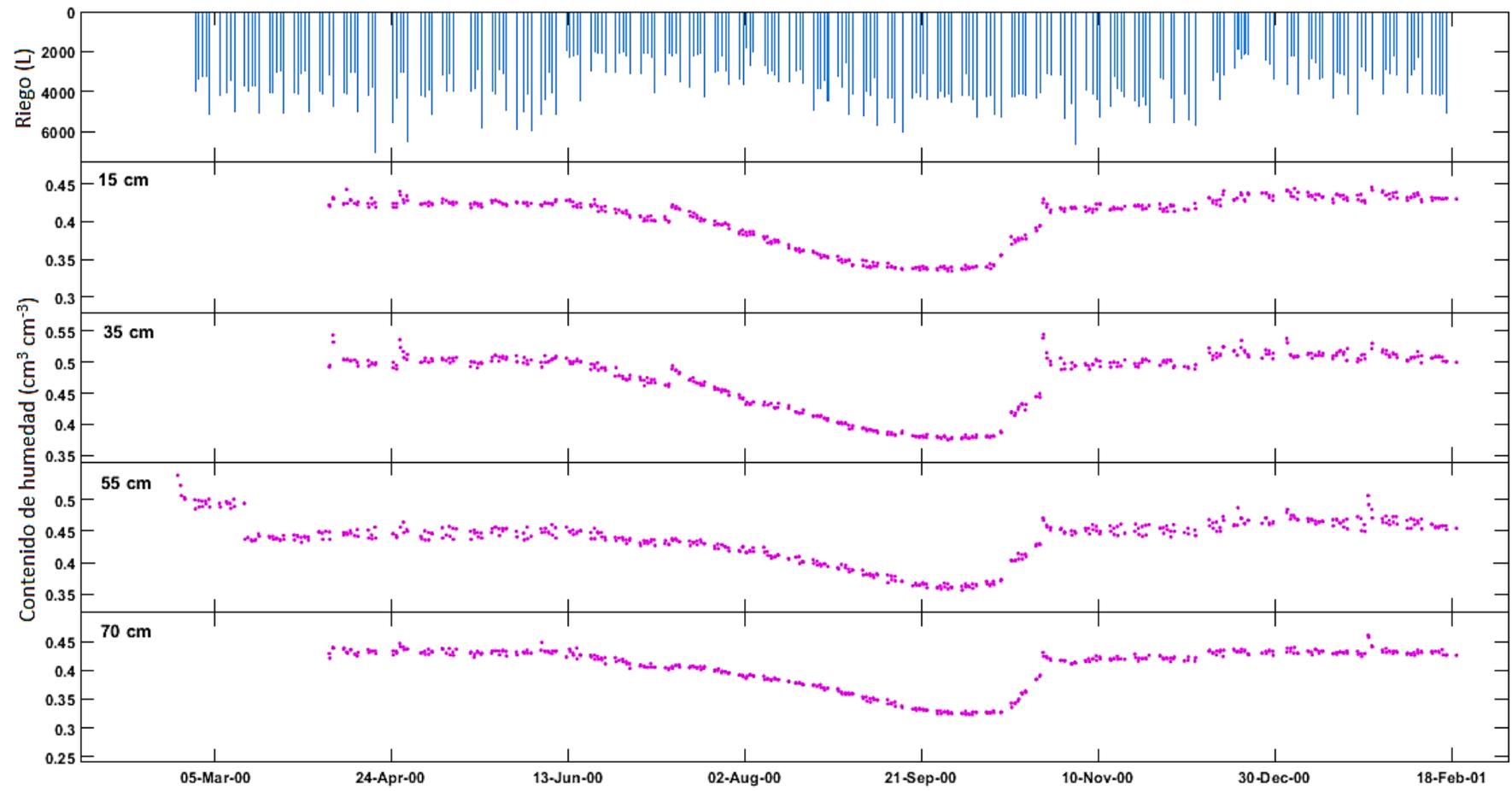


Figura 51: Lecturas de TDR corregidas – Sector nº6. En las cifras se usa el punto como separador de decimales.

El proceso de calibración del modelo requiere de la introducción de las lecturas de humedad volumétrica del suelo (Y), acompañadas del nodo de observación donde fueron recogidas (Position, 1 = 70 cm, 2 = 55 cm, 3 = 35 cm, 4 = 15 cm), el momento en el que fueron recogidas (X, días a partir del 28/2/2000), el tipo de lecturas que son (Type = 2 para lecturas de contenido de humedad) y un valor de ponderación (Weight).

Tabla 16: Parámetros del proceso de calibrado.

X (día)	Y (cm ³ cm ⁻³)	Type (-)	Position (-)	Weight (-)
100,396	0,452	2	4	1
100,583	0,478	2	4	1
101,413	0,454	2	4	1
101,563	0,491	2	4	1
102,417	0,452	2	4	1
105,417	0,436	2	4	1
105,559	0,461	2	4	1
106,424	0,442	2	4	1
106,570	0,446	2	4	1
107,414	0,444	2	4	1
107,566	0,462	2	4	1
108,434	0,443	2	4	1
108,555	0,439	2	4	1
109,417	0,432	2	4	1
109,549	0,453	2	4	1
112,413	0,418	2	4	1
112,563	0,428	2	4	1
113,410	0,422	2	4	1
113,552	0,428	2	4	1
114,389	0,419	2	4	1
114,573	0,426	2	4	1
115,417	0,421	2	4	1
115,563	0,421	2	4	1
116,420	0,417	2	4	1
116,563	0,421	2	4	1
119,399	0,403	2	4	1
119,570	0,408	2	4	1
120,417	0,408	2	4	1
120,518	0,409	2	4	1
121,385	0,408	2	4	1
121,559	0,403	2	4	1
122,410	0,402	2	4	1
122,563	0,405	2	4	1
123,399	0,404	2	4	1

123,510	0,399	2	4	1
126,393	0,386	2	4	1
126,559	0,383	2	4	1
127,552	0,382	2	4	1
128,424	0,382	2	4	1
128,561	0,382	2	4	1
129,406	0,381	2	4	1
129,570	0,379	2	4	1
130,406	0,381	2	4	1
130,552	0,385	2	4	1
133,396	0,373	2	4	1
133,555	0,369	2	4	1
134,420	0,367	2	4	1
134,552	0,368	2	4	1
135,413	0,369	2	4	1
135,549	0,374	2	4	1
136,417	0,369	2	4	1
136,555	0,371	2	4	1
137,396	0,371	2	4	1
137,563	0,379	2	4	1
140,375	0,364	2	4	1
141,413	0,360	2	4	1
141,580	0,360	2	4	1
142,406	0,362	2	4	1
142,583	0,359	2	4	1
143,410	0,363	2	4	1
143,580	0,358	2	4	1
144,406	0,360	2	4	1
144,573	0,361	2	4	1
147,427	0,353	2	4	1
147,559	0,348	2	4	1
148,403	0,349	2	4	1
148,563	0,348	2	4	1
149,420	0,355	2	4	1
149,580	0,352	2	4	1
150,403	0,354	2	4	1
150,573	0,354	2	4	1
151,406	0,360	2	4	1
151,573	0,356	2	4	1
154,438	0,348	2	4	1
154,570	0,346	2	4	1
155,365	0,344	2	4	1
155,576	0,346	2	4	1
156,365	0,356	2	4	1
156,573	0,356	2	4	1

157,365	0,362	2	4	1
157,573	0,361	2	4	1
158,365	0,368	2	4	1
158,573	0,363	2	4	1
161,375	0,349	2	4	1
161,573	0,345	2	4	1
162,354	0,350	2	4	1
162,573	0,341	2	4	1
163,396	0,346	2	4	1
163,559	0,346	2	4	1
164,424	0,354	2	4	1
164,573	0,356	2	4	1
165,389	0,362	2	4	1
165,559	0,362	2	4	1
168,396	0,350	2	4	1
168,528	0,348	2	4	1
170,406	0,342	2	4	1
170,552	0,342	2	4	1
171,393	0,340	2	4	1
171,559	0,339	2	4	1
172,393	0,346	2	4	1
172,555	0,347	2	4	1
175,396	0,337	2	4	1
175,570	0,335	2	4	1
176,410	0,341	2	4	1
176,559	0,340	2	4	1
177,393	0,357	2	4	1
177,565	0,362	2	4	1
178,413	0,367	2	4	1
178,559	0,367	2	4	1
179,375	0,383	2	4	1
179,524	0,382	2	4	1
182,389	0,359	2	4	1
182,563	0,357	2	4	1
183,399	0,355	2	4	1
183,576	0,354	2	4	1
184,417	0,360	2	4	1
184,570	0,359	2	4	1
185,393	0,370	2	4	1
185,570	0,374	2	4	1
186,413	0,381	2	4	1
186,570	0,381	2	4	1
189,406	0,357	2	4	1
189,542	0,354	2	4	1
190,394	0,360	2	4	1

190,570	0,366	2	4	1
191,448	0,377	2	4	1
191,580	0,378	2	4	1
192,393	0,386	2	4	1
192,548	0,393	2	4	1
193,393	0,394	2	4	1
193,555	0,414	2	4	1
196,410	0,369	2	4	1
196,566	0,366	2	4	1
197,399	0,367	2	4	1
197,552	0,365	2	4	1
198,427	0,382	2	4	1
198,549	0,386	2	4	1
200,409	0,381	2	4	1
200,573	0,374	2	4	1
100,396	0,434	2	3	1
100,583	0,429	2	3	1
101,413	0,426	2	3	1
101,563	0,436	2	3	1
102,417	0,426	2	3	1
102,570	0,443	2	3	1
105,417	0,426	2	3	1
105,559	0,420	2	3	1
106,424	0,424	2	3	1
106,570	0,416	2	3	1
107,414	0,424	2	3	1
107,566	0,414	2	3	1
108,434	0,416	2	3	1
108,555	0,412	2	3	1
109,417	0,417	2	3	1
109,549	0,414	2	3	1
112,413	0,408	2	3	1
112,563	0,405	2	3	1
113,410	0,412	2	3	1
113,552	0,406	2	3	1
114,389	0,411	2	3	1
114,573	0,404	2	3	1
115,417	0,405	2	3	1
115,563	0,404	2	3	1
116,420	0,398	2	3	1
116,563	0,399	2	3	1
119,399	0,397	2	3	1
119,570	0,393	2	3	1
120,417	0,395	2	3	1
120,518	0,389	2	3	1

121,385	0,393	2	3	1
121,559	0,389	2	3	1
122,410	0,393	2	3	1
122,563	0,385	2	3	1
123,399	0,383	2	3	1
123,510	0,391	2	3	1
126,393	0,383	2	3	1
126,559	0,375	2	3	1
127,410	0,377	2	3	1
127,552	0,376	2	3	1
128,424	0,373	2	3	1
128,561	0,373	2	3	1
129,406	0,372	2	3	1
129,570	0,370	2	3	1
130,406	0,370	2	3	1
130,552	0,370	2	3	1
133,396	0,367	2	3	1
133,555	0,370	2	3	1
134,420	0,364	2	3	1
134,552	0,364	2	3	1
135,413	0,358	2	3	1
135,549	0,363	2	3	1
136,417	0,358	2	3	1
136,555	0,366	2	3	1
137,396	0,359	2	3	1
137,563	0,358	2	3	1
140,375	0,353	2	3	1
140,559	0,358	2	3	1
141,413	0,352	2	3	1
141,580	0,355	2	3	1
142,406	0,354	2	3	1
142,583	0,349	2	3	1
143,410	0,351	2	3	1
143,580	0,350	2	3	1
144,406	0,346	2	3	1
144,573	0,344	2	3	1
147,427	0,351	2	3	1
147,559	0,344	2	3	1
148,403	0,343	2	3	1
148,563	0,341	2	3	1
149,420	0,337	2	3	1
149,580	0,335	2	3	1
150,403	0,339	2	3	1
150,573	0,339	2	3	1
151,406	0,341	2	3	1

151,573	0,337	2	3	1
154,438	0,338	2	3	1
154,570	0,336	2	3	1
155,365	0,330	2	3	1
155,576	0,326	2	3	1
156,365	0,327	2	3	1
156,573	0,325	2	3	1
157,365	0,330	2	3	1
157,573	0,327	2	3	1
158,365	0,329	2	3	1
158,573	0,326	2	3	1
161,375	0,325	2	3	1
161,573	0,327	2	3	1
162,354	0,324	2	3	1
162,573	0,324	2	3	1
163,396	0,329	2	3	1
163,559	0,328	2	3	1
164,424	0,327	2	3	1
164,573	0,327	2	3	1
165,389	0,324	2	3	1
165,559	0,331	2	3	1
168,396	0,327	2	3	1
168,528	0,331	2	3	1
170,406	0,323	2	3	1
170,552	0,325	2	3	1
171,393	0,322	2	3	1
171,559	0,323	2	3	1
172,393	0,317	2	3	1
172,555	0,324	2	3	1
175,396	0,322	2	3	1
175,570	0,316	2	3	1
176,410	0,320	2	3	1
176,559	0,320	2	3	1
177,393	0,324	2	3	1
177,565	0,327	2	3	1
178,413	0,326	2	3	1
178,559	0,333	2	3	1
179,375	0,340	2	3	1
179,524	0,341	2	3	1
182,389	0,341	2	3	1
182,563	0,341	2	3	1
183,399	0,335	2	3	1
183,576	0,334	2	3	1
184,417	0,333	2	3	1
184,570	0,334	2	3	1

185,393	0,334	2	3	1
185,570	0,337	2	3	1
186,413	0,342	2	3	1
186,570	0,350	2	3	1
189,406	0,339	2	3	1
189,542	0,336	2	3	1
190,394	0,336	2	3	1
190,570	0,340	2	3	1
191,448	0,341	2	3	1
191,580	0,346	2	3	1
192,393	0,356	2	3	1
192,548	0,359	2	3	1
193,393	0,358	2	3	1
193,555	0,359	2	3	1
196,410	0,359	2	3	1
196,566	0,360	2	3	1
197,399	0,349	2	3	1
197,552	0,351	2	3	1
198,427	0,353	2	3	1
198,549	0,351	2	3	1
200,409	0,359	2	3	1
200,573	0,359	2	3	1
100,396	0,307	2	2	1
100,583	0,303	2	2	1
101,413	0,308	2	2	1
101,563	0,302	2	2	1
102,417	0,304	2	2	1
102,570	0,302	2	2	1
105,417	0,304	2	2	1
105,559	0,298	2	2	1
106,424	0,304	2	2	1
106,570	0,296	2	2	1
107,414	0,299	2	2	1
107,566	0,296	2	2	1
108,434	0,300	2	2	1
108,555	0,296	2	2	1
109,417	0,299	2	2	1
109,549	0,297	2	2	1
112,413	0,297	2	2	1
112,563	0,291	2	2	1
113,410	0,291	2	2	1
113,552	0,296	2	2	1
114,389	0,296	2	2	1
114,573	0,289	2	2	1
115,417	0,290	2	2	1

115,563	0,290	2	2	1
116,420	0,291	2	2	1
116,563	0,288	2	2	1
119,399	0,291	2	2	1
119,570	0,286	2	2	1
120,417	0,285	2	2	1
120,518	0,285	2	2	1
121,385	0,286	2	2	1
121,559	0,286	2	2	1
122,410	0,284	2	2	1
122,563	0,284	2	2	1
123,399	0,287	2	2	1
123,510	0,286	2	2	1
126,393	0,283	2	2	1
126,559	0,282	2	2	1
127,410	0,282	2	2	1
127,552	0,281	2	2	1
128,424	0,284	2	2	1
128,561	0,283	2	2	1
129,406	0,282	2	2	1
129,570	0,279	2	2	1
130,406	0,279	2	2	1
130,552	0,283	2	2	1
133,396	0,278	2	2	1
133,555	0,278	2	2	1
134,420	0,278	2	2	1
134,552	0,276	2	2	1
135,413	0,277	2	2	1
135,549	0,275	2	2	1
136,417	0,278	2	2	1
136,555	0,273	2	2	1
137,396	0,272	2	2	1
137,563	0,273	2	2	1
140,375	0,273	2	2	1
140,559	0,275	2	2	1
141,413	0,273	2	2	1
141,580	0,273	2	2	1
142,406	0,271	2	2	1
142,583	0,274	2	2	1
143,410	0,274	2	2	1
143,580	0,271	2	2	1
144,406	0,273	2	2	1
144,573	0,269	2	2	1
147,427	0,266	2	2	1
147,559	0,270	2	2	1

148,403	0,273	2	2	1
148,563	0,265	2	2	1
149,420	0,265	2	2	1
149,580	0,265	2	2	1
150,403	0,267	2	2	1
150,573	0,267	2	2	1
151,406	0,262	2	2	1
151,573	0,262	2	2	1
154,438	0,262	2	2	1
154,570	0,261	2	2	1
155,365	0,264	2	2	1
155,576	0,260	2	2	1
156,365	0,262	2	2	1
156,573	0,261	2	2	1
157,365	0,262	2	2	1
157,573	0,262	2	2	1
158,365	0,262	2	2	1
158,573	0,261	2	2	1
161,375	0,257	2	2	1
161,573	0,259	2	2	1
162,354	0,264	2	2	1
162,573	0,256	2	2	1
163,396	0,259	2	2	1
163,559	0,257	2	2	1
164,424	0,255	2	2	1
164,573	0,255	2	2	1
165,389	0,256	2	2	1
165,559	0,257	2	2	1
168,396	0,259	2	2	1
168,528	0,253	2	2	1
170,406	0,257	2	2	1
170,552	0,256	2	2	1
171,393	0,257	2	2	1
171,559	0,253	2	2	1
172,393	0,254	2	2	1
172,555	0,253	2	2	1
175,396	0,252	2	2	1
175,570	0,254	2	2	1
176,410	0,254	2	2	1
176,559	0,246	2	2	1
177,393	0,255	2	2	1
177,565	0,249	2	2	1
178,413	0,255	2	2	1
178,559	0,249	2	2	1
179,375	0,255	2	2	1

179,524	0,252	2	2	1
182,389	0,253	2	2	1
182,563	0,252	2	2	1
183,399	0,252	2	2	1
183,576	0,249	2	2	1
184,417	0,257	2	2	1
184,570	0,254	2	2	1
185,393	0,252	2	2	1
185,570	0,248	2	2	1
186,413	0,251	2	2	1
186,570	0,248	2	2	1
189,406	0,254	2	2	1
189,542	0,251	2	2	1
190,394	0,254	2	2	1
190,570	0,249	2	2	1
191,448	0,254	2	2	1
191,580	0,251	2	2	1
192,393	0,255	2	2	1
192,548	0,249	2	2	1
193,393	0,253	2	2	1
193,555	0,252	2	2	1
196,410	0,257	2	2	1
196,566	0,253	2	2	1
197,399	0,257	2	2	1
197,552	0,252	2	2	1
198,427	0,253	2	2	1
198,549	0,253	2	2	1
200,409	0,255	2	2	1
200,573	0,254	2	2	1
100,396	0,352	2	1	1
100,583	0,348	2	1	1
101,413	0,352	2	1	1
101,563	0,345	2	1	1
102,417	0,348	2	1	1
102,570	0,345	2	1	1
105,417	0,352	2	1	1
105,559	0,346	2	1	1
106,424	0,348	2	1	1
106,570	0,340	2	1	1
107,414	0,345	2	1	1
107,566	0,343	2	1	1
108,434	0,344	2	1	1
108,555	0,338	2	1	1
109,417	0,345	2	1	1
109,549	0,340	2	1	1

112,413	0,345	2	1	1
112,563	0,338	2	1	1
113,410	0,342	2	1	1
113,552	0,333	2	1	1
114,389	0,338	2	1	1
114,573	0,332	2	1	1
115,417	0,339	2	1	1
115,563	0,337	2	1	1
116,420	0,338	2	1	1
116,563	0,332	2	1	1
119,399	0,334	2	1	1
119,570	0,331	2	1	1
120,417	0,339	2	1	1
120,518	0,328	2	1	1
121,385	0,331	2	1	1
121,559	0,323	2	1	1
122,410	0,331	2	1	1
122,563	0,323	2	1	1
123,399	0,329	2	1	1
123,510	0,332	2	1	1
126,393	0,327	2	1	1
126,559	0,323	2	1	1
127,410	0,331	2	1	1
127,552	0,322	2	1	1
128,424	0,327	2	1	1
128,561	0,323	2	1	1
129,406	0,329	2	1	1
129,570	0,318	2	1	1
130,406	0,329	2	1	1
130,552	0,322	2	1	1
133,396	0,325	2	1	1
133,555	0,315	2	1	1
134,420	0,322	2	1	1
134,552	0,316	2	1	1
135,413	0,323	2	1	1
135,549	0,320	2	1	1
136,417	0,320	2	1	1
136,555	0,311	2	1	1
137,396	0,321	2	1	1
137,563	0,318	2	1	1
140,375	0,320	2	1	1
140,559	0,310	2	1	1
141,413	0,316	2	1	1
141,580	0,311	2	1	1
142,406	0,317	2	1	1

142,583	0,310	2	1	1
143,410	0,316	2	1	1
143,580	0,308	2	1	1
144,406	0,314	2	1	1
144,573	0,308	2	1	1
147,427	0,305	2	1	1
147,559	0,306	2	1	1
148,403	0,311	2	1	1
148,563	0,306	2	1	1
149,420	0,308	2	1	1
149,580	0,305	2	1	1
150,403	0,303	2	1	1
150,573	0,303	2	1	1
151,406	0,307	2	1	1
151,573	0,305	2	1	1
154,438	0,298	2	1	1
154,570	0,301	2	1	1
155,365	0,299	2	1	1
156,365	0,301	2	1	1
156,573	0,299	2	1	1
157,365	0,300	2	1	1
157,573	0,298	2	1	1
158,365	0,300	2	1	1
158,573	0,298	2	1	1
161,375	0,294	2	1	1
161,573	0,292	2	1	1
162,354	0,304	2	1	1
162,573	0,293	2	1	1
163,396	0,294	2	1	1
163,559	0,293	2	1	1
164,424	0,292	2	1	1
164,573	0,289	2	1	1
165,389	0,297	2	1	1
165,559	0,291	2	1	1
168,396	0,293	2	1	1
168,528	0,292	2	1	1
170,406	0,291	2	1	1
170,552	0,292	2	1	1
171,393	0,294	2	1	1
171,559	0,288	2	1	1
172,393	0,291	2	1	1
172,555	0,289	2	1	1
175,396	0,291	2	1	1
175,570	0,288	2	1	1
176,410	0,290	2	1	1

176,559	0,284	2	1	1
177,393	0,289	2	1	1
177,565	0,285	2	1	1
178,413	0,290	2	1	1
178,559	0,291	2	1	1
179,375	0,293	2	1	1
179,524	0,289	2	1	1
182,389	0,291	2	1	1
182,563	0,288	2	1	1
183,399	0,289	2	1	1
183,576	0,288	2	1	1
184,417	0,288	2	1	1
184,570	0,290	2	1	1
185,393	0,290	2	1	1
185,570	0,289	2	1	1
186,413	0,290	2	1	1
186,570	0,291	2	1	1
189,406	0,288	2	1	1
189,542	0,286	2	1	1
190,394	0,288	2	1	1
190,570	0,292	2	1	1
191,448	0,289	2	1	1
191,580	0,292	2	1	1
192,393	0,289	2	1	1
192,548	0,285	2	1	1
193,393	0,291	2	1	1
193,555	0,290	2	1	1
196,410	0,290	2	1	1
196,566	0,285	2	1	1
197,399	0,290	2	1	1
197,552	0,287	2	1	1
198,427	0,289	2	1	1
198,549	0,284	2	1	1
200,409	0,288	2	1	1
200,573	0,287	2	1	1