

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE ECOSISTEMAS AGROFORESTALES

MÁSTER EN SANIDAD Y PRODUCCIÓN VEGETAL



Determinación de las curvas de retención de humedad de un suelo mediante diferentes metodologías para su aplicación en el manejo del riego

Trabajo Fin de Máster

Presentado por:

Harold Mauricio Vélez Zapata

Dirigida por:

Dr. Bernardo Pascual España

Dra. Nuria Pascual Seva

Valencia, septiembre 2021

Resumen

El conocimiento de la curva de retención de humedad del suelo resulta fundamental para la programación del riego. Las curvas de retención de humedad se han determinado tradicionalmente con las ollas a presión de Richards. Recientemente ha aparecido una nueva metodología, rápida, eficiente y precisa, que facilita su determinación, el HYPROP 2 *soil measurements*. No obstante, este instrumento todavía no se ha utilizado ampliamente, y del cual no se ha reportado mucha información al respecto, particularmente en habla hispana. El objetivo de este TFM fue comparar las curvas obtenidas con las dos metodologías, y previsiblemente utilizar los resultados obtenidos con el HYPROP en el diseño de un protocolo de riego, que será exportable al país del autor, Colombia. Para ello tomamos primero muestras de suelo procedentes de la parcela de frutales del departamento de Producción vegetal de la UPV, las cuales fueron tomadas a dos profundidades distintas, 25 y 50 cm. Además, se realizaron con y sin alteración de suelo; esto porque las dos metodologías anteriormente mencionadas requieren de estos dos tipos de muestreo para su ejecución. Paralelo a ello, se instaló sensores de humedad en la parcela, correspondientes a las sondas de capacitancia que trabajan con tecnología FDR, bajo un árbol de kumquat, a las dos profundidades anteriormente mencionadas, y en dos posiciones diferentes: bajo el emisor de riego y 50 cm alejado de él sobre la línea de riego, para conocer el contenido volumétrico de agua en ese suelo. Posterior a ello se sometió dichas muestras a procesos de análisis de textura mediante el método de Bouyoucos en la unidad de suelos del departamento de producción vegetal de la universidad. Los resultados en ambos procesos fueron evaluados por distinto, y posteriormente cotejados y comparados entre sí y también con la bibliografía existente. Las CRH fueron ilustradas por el HYPROP-FIT entre unos valores de 23,7% y 15,9%, correspondiendo con la CC y PMP, mientras que fueron de 26,9% y 12,6% cuando se implementó las placas Richards. En ese sentido el número de riegos a realizar fueron mayores empleando la tecnología HYPROP2, requiriendo un total de 57 riegos en el año y una lámina a aplicar de 538 mm para suplir con la demanda de agua según su CRH. Por otra parte, se requirió un total de 52 riegos al año y 548 mm de agua empleando la tecnología de las ollas a presión, por lo que no se encontró diferencias importantes en las dos tecnologías para el manejo de riego, siendo entonces el HYPROP2 una tecnología eficaz y rápida para diseñar el protocolo de manejo de riego.

Abstract

The knowledge of moisture retention curves becomes an important input to develop the irrigation program. CRH had usually been determined by traditional methods as pressure plate method. Recently has appeared a new technology, fast, efficient and precise, that allows its determination, HYPROP 2 soil measurements. However, this technology hasn't been used amply, neither has been investigation about it, particularly in Spanish culture. The objective of this research was to compare the curves obtained with both technologies (HYPROP 2 and pressure plates) and use their results in a program irrigation protocol, that will be exportable to Spanish idiom culture. For it, first we take soil samples from the experimental place (fruit trees plot from vegetable production department from UPV) using two depths, 25 and 50 cm which were taken disturb and undisturb samples because the technologies used require this kind of samples to work. At the same time, it was installed moisture sensors at the plot, called capacitance probes that Works with FDR technology, under a Kumquat tree into the same two depths previously mentioned and on two different points, under irrigation emitter, and 50 cm away from the irrigation emitter, to know volumetric moisture of the soil. After this, the soil samples were evaluated in soils unit from vegetable production department, determining the texture with Bouyoucos method. The results using both technologies were evaluated and compare with other's researchs bibliography. CRH were illustrated by HYPROP-FIT among 23,7% and 15,9%, corresponding with CC and PMP, while it was 26,9% and 12,6% by using the pressure plates method. In that way, the irrigation number of applications was 57 in a year, with a 538 mm of water supply using HYPROP2, while was 52 and 548 mm of water supply by pressure plates, with not big differences between those technologies in irrigation program, concluding that HYPROP 2 becomes an easy, fast, and efficient technology able to develop a good irrigation program to crops production.

Tabla de contenido

1.0 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 MARCO TEÓRICO	3
METODOLOGÍAS DE DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA EN EL CULTIVO	3
1.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ETC).....	3
1.5 MÉTODO DEL TANQUE EVAPORÍMETRO	5
1.6 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO.....	5
1.7 HUMEDAD EN EL SUELO	5
1.7.1 MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS.....	6
1.7.2 MÉTODOS DIELECTRICOS.....	6
1.8 POTENCIAL HÍDRICO DEL SUELO	6
1.9 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO	8
1.9.1 MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO	8
2.0 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVOS GENERALES	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3.0 MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 LOCALIZACIÓN	12
3.2 TOMA DE MUESTRA DE SUELO	12
3.3 PROFUNDIDAD DEL SUELO.....	13
3.4 EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO.....	14
3.5 ANÁLISIS DE LA TEXTURA DEL SUELO	14
3.6 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS PLACAS RICHARDS.....	15
3.7 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD MEDIANTE HYPROP 2	17
3.7.1 DESGASIFICACIÓN.....	17
3.7.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	18
3.7.3 MUESTRA DE SUELO Y CALIBRACIÓN EN BALANZA.....	18
3.7.4 PAQUETES INFORMÁTICOS	18
3.8 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ETC).....	19
3.9 PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)	19
3.9.1 DOSIS Y FRECUENCIA DE RIEGO.	20
4.0 RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	21
4.1 ANÁLISIS TEXTURAL DE SUELO	21
4.2 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD MEDIANTE PLACAS RICHARDS.....	23
4.3 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD MEDIANTE HYPROP 2	25

4.3.1 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD A 25 CM DE PROFUNDIDAD.	25
4.3.2 CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD A 50 CM DE PROFUNDIDAD MEDIANTE HYPROP 2	26
4.4 HUMEDAD EN EL SUELO MEDIANTE EL DISPOSITIVO FDR JUNTO A LOS SENSORES DE CAPACITANCIA.....	27
4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO (ETC).....	28
4.6 PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)	29
4.7 NECESIDAD DE RIEGO.....	29
4.8 UMBRAL DE RIEGO	30
4.9 DISEÑO DEL SISTEMA AGRONÓMICO DE RIEGO	30
4.9.1 VOLUMEN DE AGUA A APLICAR Y DURACIÓN.....	31
5.0 CONCLUSIONES	36
6.0 BIBLIOGRAFÍA	37

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PARCELA CULTIVOS LEÑOSOS DEL DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL, UPV..	12
FIGURA 2. TOMA DE MUESTRAS CON ANILLO.	13
FIGURA 3. A LA IZQUIERDA LA BARRENA GRADUADA, EN LA DERECHA LAS MUESTRAS A CADA PROFUNDIDAD EVALUADA.....	13
FIGURA 4. A LA IZQUIERDA LOS SENSORES DE CAPACITANCIA. A LA DERECHA EL DATALOGGER EM50.....	14
FIGURA 5. TAMIZADOR MECÁNICO CON FILTROS DE 2 MM DE DIÁMETRO.	15
FIGURA 6. SUB-MUESTRAS DE SUELO EN LAS OLLAS A PRESIÓN.	16
FIGURA 7. EQUIPO DE LLENADO DE LA UNIDAD.	17
FIGURA 8. MONTAJE DEL SISTEMA HYPROP.....	18
FIGURA 9. PRECIPITACIÓN EFECTIVA MENSUAL MEDIA (PE) EN RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MENSUAL MEDIA (MM) Y EL CONSUMO DE AGUA MENSUAL MEDIO (MM).....	19
FIGURA 10. DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES.	21
FIGURA 11. TRIÁNGULO DE CLASIFICACIÓN TEXTURAL DEL USDA PARA LOS PRIMEROS 25 CM DE PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA.....	21
FIGURA 12. DIAGRAMA DE CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES.	22

FIGURA 13. TRIÁNGULO DE CLASIFICACIÓN TEXTURAL PARA 50 CM DE PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA.	22
---	-----------

FIGURA 14. PROMEDIO MENSUAL DE LA TA Y LA PLUVIOMETRÍA 1996-2009 (FUENTE: RIVAS-MARTÍNEZ, 2009)	34
--	-----------

FIGURA 15. DATOS TOMADOS DE AGRICULTORES DE HUELVA.....	34
--	-----------

FIGURA 16. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES DE RIEGO EMPLEANDO LAS METODOLOGÍAS DE DETERMINACIÓN DE LA RETENCIÓN DE HUMEDAD.....	35
--	-----------

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD A 25 CM DE PROFUNDIDAD.	23
---	-----------

GRÁFICA 2. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD A 50 CM DE PROFUNDIDAD.	23
---	-----------

GRÁFICA 3. CRH MEDIANTE EL HYPROP-FIT A UNA PROFUNDIDAD DE 25 CM.	25
---	-----------

GRÁFICA 4. CRH MEDIANTE EL HYPROP-FIT A UNA PROFUNDIDAD DE 50 CM.	26
---	-----------

GRÁFICA 5. DATOS TOMADOS A 25 Y 50 CM DE PROFUNDIDAD BAJO EL EMISOR DE RIEGO.	27
---	-----------

GRÁFICA 6. DATOS TOMADOS A 25 Y 50 CM DE PROFUNDIDAD ALEJADOS 50 CM CON RESPECTO AL EMISOR DE RIEGO.	27
--	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DATOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA, PRECIPITACIÓN EFECTIVA Y NECESIDAD DE RIEGO MENSUAL. (EXPRESADOS EN MM).....	28
---	-----------

TABLA 2. HUMEDAD INICIAL DE SUELO EN DISTINTOS HORIZONTES Y POSICIONES RESPECTO AL EMISOR DE RIEGO.	30
---	-----------

TABLA 3. UMBRAL DE RIEGO DE ACUERDO CON EL CONSUMO DE AGUA RESPECTO A LA CAPACIDAD DE CAMPO.	31
--	-----------

TABLA 4. CAUDAL DE RIEGO POR EMISOR Y ÁREA A MOJAR.	31
---	-----------

TABLA 5. NÚMERO DE RIEGOS MENSUALES UTILIZANDO LAS DOS TECNOLOGÍAS.	32
---	-----------

TABLA 6. NECESIDAD DE RIEGO PARA NARANJOS SEGÚN RECOMENDACIÓN DEL IVIA, EMPLEANDO LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE MONCADA.	33
---	-----------

TABLA 7. VOLUMEN DE AGUA A APLICAR Y TIEMPO DE RIEGO MENSUAL EN LA PARCELA EXPERIMENTAL.....	33
---	-----------

1.0 Introducción

1.1 Antecedentes

El suelo constituye el componente principal de los ecosistemas terrestres y, como tal, es uno de los recursos naturales más importantes para la vida en nuestro planeta (Lal y Shukla, 2004) siendo un gran reservorio y regulador de la humedad y por tanto del ciclo hidrológico del agua (Pascual y Pascual-Seva, 2020). No obstante, la disminución en el agua disponible para las plantas y el cambio climático se convierten hoy en día en los retos más grandes en la agricultura (FAO, 2017).

La agricultura es la actividad que más cantidad de agua demanda, entendiéndose esto como el agua que entra a la unidad productiva y se consume directamente por las plantas para su desarrollo, o que se pierde por procesos de evapotranspiración, convirtiéndose en cualquier caso en agua no reutilizable. La creciente preocupación entonces yace principalmente en el incremento de la población mundial y la mejora de la calidad de vida de países subdesarrollados, que ejercen presión sobre este recurso al ser menester la producción agrícola a gran escala para su abastecimiento (Grupo de riegos, agronomía y medio ambiente, 2013).

Estos retos se complican aún más por la erosión inducida antrópicamente, generando pérdidas de las capas más superficiales del suelo, siendo estas las más productivas para la agricultura, afectando así a las características texturales, estructurales, de permeabilidad y contenido de materia orgánica, traduciéndose al final en la pérdida de la productividad agrícola (Doran y Zeiss, 2000).

Dentro de los procesos erosivos más relevantes, los hídricos cumplen un papel preponderante y en los cuales se ha puesto la lupa en la agricultura moderna, dado a que han representado cerca de 115 millones de ha perdidas para su uso en Europa y además existe un riesgo de degradación medio-alto de la mitad de los suelos cultivables en España (Almorox-Alonso *et al*, 2010).

Además, no únicamente los procesos erosivos surgen como consecuencia de una mala práctica en la distribución del riego, también se genera otro problema correlacionado, que es la salinización, de lo cual se estima que cerca de 800 millones de ha en el planeta están siendo afectadas por la misma. De ellas, 397 millones están afectadas por salinidad y 434 millones por sodicidad (Munn, 2005; FAO, 2000). Varias pueden ser las causas de esta problemática, entre las que se destaca principalmente el uso excesivo de fertilizantes y el empleo de agua de mala calidad para el riego agrícola (Tanwar, 2003).

Esto conlleva a utilizar prácticas de lavado de sales mediante la implementación de una mayor cantidad de riego, aumentando la cantidad de agua aportada por unidad de área, además de las actividades empíricas de la distribución de riego que se desarrollan aún en muchos países, que promueven un exceso en la aplicación de fertilizantes y agua, agravando la situación (Grupo de riegos, agronomía y medio ambiente, 2013).

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad hay una creciente preocupación sobre el manejo de los recursos naturales, en particular sobre el agua y la tierra, y sobre el cambio climático global debido al efecto invernadero, ocasionado en gran parte por la degradación del suelo, la tala indiscriminada de árboles, la destrucción de grandes superficies de selvas, el uso de gases efecto invernadero, la industrialización y la masificación de sistemas de transporte dependientes del petróleo, cuyo principal efecto es el aumento de las temperaturas medias del planeta, la disminución de las reservas de agua dulce y la salinización de un alto porcentaje de tierra arable (Núñez *et al*, 2010). La creciente presión sobre los recursos naturales ha producido la desertificación de algunas áreas. Sin embargo, en años recientes, se ha llegado a la conclusión de que el mal uso de la tierra es tal vez el principal factor, y la sequía es solo una consecuencia.

La causa directa es el mal manejo del suelo a través de algunas prácticas excesivas de pastoreo, métodos de labranza inapropiados, tala indiscriminada, sobreexplotación de la tierra y malos sistemas de distribución de agua. La desertificación es únicamente otra palabra para definir la degradación del suelo, pero dentro de un contexto de suelo árido.

Es allí entonces donde un buen conocimiento de las características fisicoquímicas del suelo, así como las biológicas, puedan llevar hacia tecnologías más precisas adaptadas a ese suelo en particular y en función de ello diseñar un plan de riego capaz de satisfacer con las necesidades de este, pero sin caer en el exceso cuya consecuencia inmediata sería lo anteriormente nombrado. Por ello en este trabajo se llevará un seguimiento y monitoreo correcto del contenido de humedad del suelo y de sus propiedades físicas para establecer una relación cuyo desenlace será una buena práctica cultural del riego.

1.3 Marco teórico

Se entiende por riego al aporte artificial de agua al suelo, con el objetivo de suministrar la humedad necesaria para el desarrollo y el crecimiento de las plantas. Expresado de otra manera, el riego es la aplicación oportuna y uniforme de agua a un perfil del suelo para reponer en éste el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

Para abastecer a la unidad productiva con el agua que requiere, se ponen en marcha diferentes metodologías para la determinación de la necesidad de agua de cultivo. Por una parte, se emplean parámetros que relacionan las condiciones climatológicas con las demandas de agua del cultivo en una zona determinada, y por otra parte se utilizan estrategias de monitoreo del contenido de humedad en el suelo, conociendo sus propiedades físicas, manteniéndolo dentro de un umbral en donde las plantas puedan permanentemente tomar de dicha agua. No obstante, las técnicas más adecuadas consideran la combinación del suelo, clima, disponibilidad de agua y los cultivos que van a regarse; el conocimiento individual de cada parámetro y el conocimiento holístico integrando todas sus partes llevan a un diseño más eficiente en el uso de riego en la agricultura (Gurovich, 1985).

Metodologías de determinación de las necesidades de agua en el cultivo

Según la FAO (Allen *et al.*, 2006), las necesidades de agua de un cultivo se definen como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración (ET). A pesar de que los valores de la ET del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua de cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua consumida a través de la ET. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. Dentro de las principales estrategias de determinación de las necesidades de agua en un cultivo en ese sentido, se utilizan parámetros como la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith o el tanque evaporímetro; y para la determinación de la necesidad de riego, será necesario además, conocer la precipitación efectiva. La observación del comportamiento hídrico en el suelo en cuestión permite determinar la dosis de riego, conociendo la humedad volumétrica y el potencial hídrico entendiéndose que el suelo puede retener agua gracias a sus características físicas que pueden permitir intervalos de tiempo entre dos riegos.

1.4 Evapotranspiración de cultivo (ET_c)

La ET consiste en dos procesos: la evaporación directa del suelo y la transpiración de la planta, y ambos ocurren simultáneamente, de modo que se han realizado importantes esfuerzos para cuantificarlos por separado (Zhang *et al.*, 2013). Este parámetro es importante porque indica la cantidad de agua que un cultivo puede perder en un día, en una zona en específico, de modo que permite determinar la necesidad de riego si es el caso; los resultados pueden darse en altura de agua (mm) por unidad de tiempo (h, día, 10 días, mes) (Allen *et al.*, 2006).

Se ha desarrollado una amplia variedad de métodos y modelos para estimar con precisión la ET_c, los cuales se han implementado a diversas escalas espaciales y temporales, desde el más simple (balance hídrico del suelo), pasando por la estimación mediante el tanque evaporímetro, hasta el más complejo (covarianza de torbellinos y scintilometría). Todos los métodos presentan limitaciones relacionadas con las condiciones del experimento, así como con la cantidad y calidad de los datos requeridos para la estimación (Er-Raki *et al.*, 2013). El modelo más utilizado, por su simplicidad y robustez es el modelo

FAO-56, que describe la relación entre la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc) y evapotranspiración de referencia (ETo) a través de un coeficiente de cultivo (Kc), que involucra los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998).

La evapotranspiración de referencia (ETo) es definida por Allen *et al* (1998) como la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 12 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, con una resistencia a la superficie de 70 s/m y un albedo de 0,23 que asombran totalmente el suelo y que no escasea de agua.

Para la estimación de la ETc, se debe conocer previamente la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al*, 2006):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde:

ETo= evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Rn= radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

Ra= radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G= flujo de calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T= temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂= velocidad media del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s= presión de vapor de saturación (kpa)

e_a= presión real de vapor (kpa)

e_s-e_a= déficit de presión de vapor (kpa)

Δ= pendiente de la curva de presión de vapor (kpa °C⁻¹)

γ= constante psicrométrica (kpa °C⁻¹)

El coeficiente de cultivo (Kc) es la relación entre la evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar, es decir, asumiendo que no carezca de ningún factor que pueda irrumpir con su crecimiento, limitándose únicamente al agua como agente de cambio, sobre la evapotranspiración de referencia (ETc/ETo) del cual existe información documentada por diversos autores para la mayoría de los cultivos de importancia agrícola (Allen *et al*, 2006).

1.5 Método del tanque evaporímetro

El tanque evaporímetro es un instrumento que usualmente se encuentra en las estaciones meteorológicas y que se utiliza para medir la evaporación efectiva de una zona con características climatológicas similares; es otro método para obtener la ET_c, mediado igualmente por la ET_o y por otros coeficientes que se aplican para acercarse a lo que sería una evapotranspiración real de cultivo. La tasa evaporativa en una superficie libre de cultivos se produce por el efecto integrado de los mismos factores climáticos que afectan a la evapotranspiración de los cultivos (radiación, viento, temperatura y humedad). Aunque existan importantes diferencias en los procesos de evaporación del tanque y de evapotranspiración de los cultivos, la evaporación del tanque puede utilizarse para predecir correctamente la ET_o para períodos de 10 días, considerando un coeficiente empírico (K_p).

$$ET_o = K_p * E_{pan}$$

ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d⁻¹)

K_p = coeficiente del tanque evaporímetro (-)

E_{pan} = evaporación del tanque evaporímetro (mm d⁻¹)

De los distintos tipos de tanques, el más utilizado en Europa es el tanque Clase A.

Allen *et al.* (2006) describen el tanque evaporímetro Clase A de la siguiente manera: El valor de K_p depende de la localización y ambiente, considerándose dos casos: A (instalado en una zona de pasto corto verde, rodeado de suelo en barbecho) y B (situado sobre un suelo en barbecho, rodeado por un cultivo verde).

1.6 Disponibilidad de agua en el suelo

Quizá la relación más estrecha entre los anteriores términos reside en que la ET_c conlleva a unas necesidades de agua diarias, dado a las condiciones climáticas que promueven las pérdidas de agua, no obstante, el riego no se ejecuta todos los días supliendo con dicha demanda. Esto es dado a que el suelo funciona como un reservorio de agua, capaz de almacenarla en sus microporos y mediado por fuerzas de retención y cohesión, impidiendo que se seque totalmente, y de servirle de abasto al cultivo durante un tiempo determinado, cuando ya se ha perdido lo suficiente como para retomar el riego (Gurovich, 1985). Por ello, así como conocer las condiciones climáticas que repercuten en el desarrollo del cultivo, también de importante es conocer las condiciones edáficas e hidráulicas del suelo que permiten evaluar el contenido de humedad en el mismo y las fuerzas que actúan sobre el agua que impiden o promueven su equilibrio con las partículas coloidales del suelo.

1.7 Humedad en el suelo

El contenido de agua del suelo es expresado como una relación entre la masa de agua contenida en una muestra de suelo y la masa seca de la muestra de suelo, o del volumen de agua con el volumen total de la muestra. Sus resultados pueden darse como un porcentaje en peso o porcentaje en volumen. Para el caso de realizarse el cálculo de porcentaje en peso, estas expresiones están linealmente relacionadas por la densidad aparente del suelo muestreado (Greacen, 1981).

La estimación de las necesidades y dosis de agua para un cultivo utilizando la anterior metodología, no implica que deba realizarse un riego para su abastecimiento, sino que debe conocerse el contenido de humedad actual en ese suelo y sus fluctuaciones a lo largo del tiempo, dado que como se mencionó, el suelo funciona como un reservorio de agua, y solo deberá regarse cuando se lleguen a los umbrales que, según el cultivo o las características texturales del suelo, variarán. Por ello lo primero a conocer es el contenido de humedad, y para ello existen diferentes herramientas:

1.7.1 Métodos gravimétricos

El método gravimétrico es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Dicho método consiste en tomar una muestra de suelo, pesarla antes y después de su desecado y calcular su contenido de humedad. La muestra de suelo se considera seca cuando su peso permanece constante a una temperatura de 105 °C, que suele darse a las 24 horas después de puesta a calor en estufa. Se han construido numerosos tipos de equipo de muestreo, así como hornos de secado y balanzas especiales, para ser utilizados con este método. El método gravimétrico es el más exacto para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Sin embargo, no puede usarse para obtener un registro continuo de la humedad del suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio (Schmugge, 1985).

1.7.2 Métodos dieléctricos

Son sistemas de medición indirecta de la humedad del suelo, dentro de los cuales los más destacados son la sonda de neutrones, la reflectometría en el dominio del tiempo (*time domain reflectometry*, TDR), y la reflectometría en el dominio de la frecuencia (*frequency domain reflectometry*, FDR, junto a las sondas de capacitancia).

La sonda de neutrones se basa en la dispersión de neutrones al suelo, los cuales se mueven a rápida velocidad, pero al colisionar con átomos de H se tornarán lentos, por lo que cuantos más átomos de H haya en ese suelo, más serán las colisiones y por tanto la disminución de la velocidad más marcada. Dichos neutrones al final llegarán a un detector que transformará el mensaje en impulsos eléctricos en un medidor. Este sistema determina la humedad volumétrica con un error muy pequeño.

El equipo TDR mide la constante dieléctrica a partir del tiempo de recorrido de un pulso electromagnético introducido en el suelo a través de unas varillas de acero inoxidable. La constante dieléctrica depende de la humedad, por lo que el equipo proporciona la misma de manera indirecta.

Finalmente, el equipo FDR y las sondas de capacitancia utilizan el suelo como un condensador, que almacena parte de una carga eléctrica introducida a través de dos o tres electrodos insertados en el suelo. Los cambios en la frecuencia de la onda a medida que pasa a través del suelo están relacionados con la constante dieléctrica, por tanto, determinan la humedad como anteriormente se ha dicho (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

Todos los métodos de medición del contenido de humedad en el suelo indirectos, se instalan directamente en el suelo en donde estarán permanentemente midiendo los cambios volumétricos de humedad en función de las pérdidas o ganancias de agua dado a las condiciones ambientales, así como manejo agrícola, cuya información será luego almacenada en programas informáticos y marcarán pautas útiles a la hora de establecer un calendario de riego; por ello en contraste con el método de gravimetría, estos otros suelen ser más utilizados para el diseño de estrategias de riego agrícolas.

1.8 Potencial hídrico del suelo

Además de conocer el contenido de humedad en el suelo, también es importante conocer la energía con que esa agua es retenida por las partículas coloidales, las cuales ejercerán cierta fuerza de retención o expulsión y con ello la absorción de agua por las plantas tendrá un trabajo a ejercer. A estas fuerzas se les llama potencial hídrico del suelo, y no es más que la cantidad de trabajo que es necesario aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de masa de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto de suelo considerado. Puede medirse en términos de trabajo dividido por volumen (potencial de presión, expresado en bar, atmósfera o Kpa), trabajo dividido por masa o trabajo dividido por peso (Pascual y Pascual-Seva, 2020). Los potenciales se

agrupan en potencial de presión (ψ_p), matricial (ψ_m), gravitacional (ψ_g) y osmótico (ψ_o). Cuya suma es equivalente al potencial hídrico.

$$\psi = \psi_p + \psi_m + \psi_g + \psi_o$$

-El potencial de presión (ψ_p) existe únicamente en zonas saturadas y es igual a la presión ejercida por una columna de agua sobre un punto específico dentro del suelo. En la práctica, su valor se considera cero al nivel de presión atmosférica y positivo, e igual a la profundidad de la columna de agua, para puntos que subyacen por debajo de la superficie.

-El potencial matricial (ψ_m) solo existe en suelos no saturados. Por tanto, el ψ_m y el ψ_p son mutuamente exclusivos. El signo de ψ_m es negativo (menor que la presión atmosférica) y es debido a las fuerzas de tensión superficial, adhesión-cohesión, contracción-dilatación y las de la interfase entre la partícula y el agua, que tienen lugar en la matriz del suelo.

-El potencial gravitacional (ψ_z) es la energía requerida para mover una cantidad infinitesimal de agua pura y libre desde el nivel de referencia hasta el punto de elevación. Este potencial es debido estrictamente a la posición de un punto específico y es independiente de las propiedades del suelo o condiciones atmosféricas. Sus magnitudes dependen con la distancia vertical entre la referencia y el punto en cuestión. En el caso de suelos saturados $\psi = \psi_p + \psi_g$, es decir solo se tienen en cuenta dos de sus componentes.

-El potencial osmótico (ψ_o) se debe a la presencia de solutos en el agua del suelo que afectan sus propiedades termodinámicas. Se manifiesta cuando el agua es absorbida en presencia de membranas y es importante en lo referente a la absorción de agua por las raíces de las plantas. (Pascual y Pascual-Seva, 2020; García Coronado, 2011).

Dentro de las fuerzas que más importancia tienen en relación con la absorción de agua por parte de las plantas, se encuentra la tensión mátrica y la osmótica, las cuales determinan la capacidad de retención de agua por el suelo y la capacidad de absorción de agua en función de los gradientes químicos (diferencia entre los solutos intra y extracelular) entre la planta y el suelo respectivamente. Por una parte, la tensión mátrica depende en su mayoría de la textura del suelo dado que el agua es retenida en mayor medida sobre la superficie de las partículas y en los pequeños poros existentes entre ellas. Por ello, los suelos con textura fina (arcillosos) que tienen un gran número de partículas con una gran superficie total, y que tienen un elevado volumen de pequeños poros distribuidos entre sus partículas, presentan una elevada retención de agua, mucho mayor a la correspondiente a la de suelos con textura gruesa (arenosos) (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

A su vez, los suelos con una alta salinidad (alto contenido de solutos disueltos) presentan una mayor presión osmótica sobre el cultivo e impedirán que pueda tomar agua de allí; incluso todo lo contrario, provoca que el cultivo se deseque al pasar agua de la planta al suelo siguiendo los gradientes de solución, siendo entonces un problema en campo.

1.9 Curvas de retención de humedad del suelo

Para establecer la relación entre el potencial hídrico y la humedad en el suelo, se utilizan las curvas de retención de humedad. Las curvas de retención de humedad (CRH) en el suelo expresan la relación existente entre el contenido de humedad y su potencial matricial, además reflejan la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión; dicha relación depende de los factores relacionados con la porosidad del suelo (Teepe *et al.*, 2003). Entre otros factores que pueden influir en la retención del agua se destaca la textura, las arcillas y tipo de arcillas, la materia orgánica y la estructura (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

Para un mismo contenido de humedad, los distintos tipos de suelos retienen el agua con distinta energía, por tanto, la relación humedad- potencial mátrico cambia para cada tipo de suelo. Las CRH representan la fracción extraída de agua útil al aplicar una succión en un suelo determinado. Así, cuando se somete a diferentes presiones dicho suelo, va a coincidir en el punto de 0,33 atm y 15 atm, correspondiendo a capacidad de campo (CC) y a punto de marchitez permanente (PMP) respectivamente.

Las plantas tienen la capacidad de absorber agua entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, dos puntos en las curvas de retención de humedad que marcan lo que sería el agua aprovechable para el cultivo. Se entiende como capacidad de campo al máximo contenido de agua que puede retener un suelo en condiciones de libre drenaje, y se alcanza entre 24 y 72 horas después de haberse concluido el riego, según el tipo de suelo.

El punto de marchitamiento es el contenido de agua en el cual las plantas se marchitan de forma irreversible, es decir, que no se recuperan después de haber sido sometidas durante la noche a condiciones de un ambiente saturado de humedad.

El agua útil o disponible (AU) para las plantas es entonces, la humedad comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Pascual y Pascual-Seva, 2020). En ese sentido, el intervalo máximo supondría no regar hasta que la humedad del suelo llegue hasta el PMP, con lo cual la dosis a aportar sería la máxima, e igual al AU. Pero esto no es viable en la práctica, porque entonces las plantas ya habrían sufrido daños irreversibles.

Como se ha visto anteriormente, los suelos con distinta textura poseen diferentes CRH, por ello se recomienda regar cuando se ha agotado diferentes porcentajes de agua útil en función de la textura del suelo (Hidalgo, 1971), sin embargo, conociendo además el cultivo a sembrar, dado que al poseer diferentes ET y enraizamientos, su capacidad de absorción puede diferir. Así, se recomienda regar cuando se ha consumido el 25-40% del AU en cultivos de alto valor y de raíces superficiales, 40-50% en cultivos con raíces de profundidad intermedia, 60-65% en cultivos con menor valor comercial y raíces profundas. Estas recomendaciones son las utilizadas actualmente por el USDA-NRCS (1997) en riegos de superficie.

1.9.1 Métodos de determinación de las curvas de retención de humedad del suelo

Para la determinación de las CRH, deben conocerse primeramente los contenidos hídricos del suelo mediante los métodos de medición directa o indirecta descritos anteriormente. Paralelo a ello, se utilizan equipos de medición de la tensión en ese mismo suelo, relacionándolo con el contenido de humedad in situ. Varios son los equipos que se pueden utilizar para la determinación del potencial hídrico o de alguno de sus componentes, destacando los tensiómetros (miden la suma de los ψ_m y ψ_g) y los sensores de matriz granular (bloques de yeso, miden la suma del ψ_m y del ψ_o). Sin embargo, los equipos de placa o membrana de presión permiten relacionar el contenido hídrico del suelo con el ψ_m directamente en laboratorio (Pascual y Pascual-Seva, 2020). Recientemente se han establecido

otros modelos de obtención de las curvas de retención de humedad, correspondiente al HYPROP 2 quien utiliza tensiómetros y mide la humedad por desorción, relacionando directamente ambos patrones en laboratorio. Además, también se utilizan modelos matemáticos de pedotransferencia que, utilizando parámetros como la textura, estructura, materia orgánica, o cantidad de arcillas, pueden predecir las características hidráulicas de ese suelo.

1.9.1.1 Equipo de placas o membranas a presión

Entre las técnicas de presión el equipo más utilizado son las placas de presión, también llamadas placas Richards (Klute, 1986). El método de placas a presión fue aplicado a la ciencia del suelo y desarrollado primeramente por L.A Richards (1941) para conocer las ratios de movimiento de humedad de una muestra de suelo bajo condiciones insaturadas. Dichas muestras primeramente se tomaban inalteradas, manteniendo sus condiciones estructurales, conociendo la importancia de la estructura en las características hidráulicas del suelo, y significó un gran avance en la investigación del suelo dado que antes las mediciones de la tensión y su relación con el contenido de humedad se hacían directamente en el campo (Takayanagi et al, 1986).

El aparato consiste en una cámara de acero con cierre hermético que se somete a presiones internas, simulando de esta forma las condiciones de succión del suelo (tensión matricial). En el interior de la cámara hay una placa cerámica semipermeable sobre la que se coloca la muestra, esta placa permite el paso del agua, pero no del aire. La placa está conectada con un colector a través del cual se extrae el agua que drena de las muestras. En la parte superior de la cámara está el colector de aire a través del cual se inyecta aire en el interior a la presión deseada. Si se determinan varios puntos de la curva característica, en cada equilibrio se determina la humedad del suelo y se empareja con el valor de tensión aplicada. En función de la presión a aplicar o el punto de la curva de retención a obtener se utilizarán muestras de suelo inalteradas o no. Así para medidas donde la estructura del suelo tiene un peso importante en la retención de agua, se utilizarán muestras de suelo inalteradas, que se corresponde con el rango de menos de 100 kPa. Las placas de presión permiten obtener medidas de tensiones desde 10 a 2000 kPa, para medidas con tensiones menores se requiere sustituir la placa cerámica por una lámina de acetato de celulosa.

Una problemática de las placas de presión, destacada por numerosos autores, es debida a la falta de contacto entre la muestra de suelo y la placa cerámica que genera sobreestimaciones de la humedad (Schelle *et al.* 2013). También Bittelli y Flury, (2009) describieron este problema principalmente a tensiones por encima de 1000 kPa, obteniendo sobreestimaciones de la humedad en suelos franco-limosos, concluyendo que esta sobrestimación se debía a los procesos de secado a los que se sometió la muestra para determinar diferentes puntos de la curva característica.

1.9.1.2 Hyprop 2 soil measurements

HYPROP 2 es un sistema automatizado de medida y evaluación basado en el método de evaporación de Schindlers (1980) para determinar las propiedades hidráulicas en muestras de suelo.

Este método explica el uso del HYPROP 2 (hydraulic property Analyzer) como una técnica alternativa a las convencionales que, utilizando los tensiómetros ubicados a dos profundidades diferentes, puede medir las características de CRH y la conductividad hidráulica insaturada del suelo. Además, el contenido volumétrico de agua es calculado a través de continuos registros de pérdida de peso. Con esta información la CRH puede ser ilustrada. Las CRH siempre han sido difíciles de obtener dado a la cantidad de datos necesarios para su ejecución y los largos periodos de tiempo que los otros métodos convencionales demandan para sus resultados. HYPROP 2 sigue un método de evaporación donde dos tensiómetros miden la tensión implícita por el agua a la columna de suelo. Además, como el contenido de agua en la columna de suelo cambia cada tiempo a diferentes tensiones, puede ser observado

dicho cambio y registrado. Como sea, la limitación de los tensiómetros antiguamente es que podían cavitarse a pequeñas presiones (entre 70 y 90 kPa). No obstante, un nuevo diseño de tensiómetros creado a principios del siglo XXI permitió evitar la cavitación hasta alcanzar presiones más altas (435 kPa), tensiómetros en los que HYPROP 2 basa su tecnología de evaluación.

HYPROP 2 mide el potencial hídrico a diferentes niveles de saturación del suelo con la ayuda de sus tensiómetros (el bottom ten y el top ten). Además de su precisión, también tiene una instalación LED que permite monitorear el estado actual del dispositivo. Durante su instalación, la muestra de suelo está sobre una balanza de precisión en el laboratorio, cuya finalidad es la de registrar los cambios en el peso de la muestra asociados a la pérdida de agua por la evaporación, y medir en esos momentos además la presión que se ejerce mediante los dos tensiómetros, cotejando la información y correlacionándola así para sus resultados finales.

Wind (1966) desarrolló el método de evaporación a mediados del siglo XX. Para ello, 5 tensiómetros fueron utilizados en la muestra de suelo. La muestra fue puesta en la balanza y en función de la evaporación a medida que cambia el peso de suelo y de los tensiómetros fueron registrados medidas en diferentes intervalos de tiempo. Basado en estos datos se pudo ilustrar la curva de retención de humedad entre la saturación y los 50 kPa.

Schindler (1980) simplificó este método. Él usó solo 2 tensiómetros y simplificó el procedimiento de evaluación. HYPROP 2 trabaja utilizando este procedimiento actualmente (Wendroth *et al.*, 1993, Peters y Durner, 2008; Peters *et al.*, 2015). Los nuevos resultados obtenidos tras los análisis científicos promovieron el uso del procedimiento de medición (Schindler y Mueller, 2006). Usando el HYPROP 2, hoy en día se puede determinar simultáneamente la CRH y la función de conductividad hidráulica insaturada en el rango entre la saturación de agua y cerca del punto de marchitez permanente. El tiempo de medición asciende, dependiendo del suelo, desde 2 días (muestras de arcilla) a un máximo de 10 días (muestras de turba y arena).

Finalmente, HYPROP-FIT es un programa que grafica el potencial hídrico (presión mátrica) contra la humedad de la muestra, creando la curva de retención de humedad. No obstante, la curva no puede ser completada porque la muestra no alcanza a llegar a las 15 atm, sin embargo, el mismo HYPROP 2 puede estimar los valores de humedad a 15 atm mediante la tendencia en función de todos los datos muestreados.

Existen muchos estudios obtenidos del HYPROP 2 que además lo comparan con otros métodos convencionales, entre los que se destacan la caja de arena, caja de caolín, recipiente a presión, entre otros. La comparación de los resultados de medición de HYPROP 2 y los métodos clásicos demostró una buena congruencia (Schelle *et al.*, 2010, 2011, 2013a, b; Schindler *et al.*, 2012). No se pudieron encontrar diferencias sistemáticas, sugiriendo en todos los casos que los resultados del HYPROP 2 son más rápidos siguiendo un continuo proceso de deshidratación de la muestra, obteniendo más datos y asertividad que los métodos anteriormente nombrados (Shokrana *et al.*, 2020).

2.0 Objetivos

2.1 Objetivos generales

- Determinar y comparar las CRH empleando dos tecnologías, el equipo de membranas a presión (placas Richards) y el HYPROP 2 *soil measurements*, y utilizar los resultados obtenidos en el diseño de un protocolo de riego.

2.2 Objetivos específicos

- Calibración y puesta en marcha de la tecnología HYPROP 2.
- Comparar los resultados de esta tecnología con los obtenidos con las placas Richards.
- Recomendar un manejo del riego, umbral, dosis y frecuencia, para lo cual se determinará la textura del suelo, la profundidad del suelo y la evolución actual de la humedad volumétrica del suelo.

3.0 Materiales y métodos

3.1 Localización

El desarrollo del proyecto se llevó en las instalaciones de la Universitat Politècnica de València en la parcela de árboles frutales de la unidad docente de cultivos leñosos del departamento de Producción vegetal (39°29'02.4"N, 0°20'27.1"W) en donde se realizaron las tomas de muestra de suelo para su caracterización y en donde se instalaron los sensores de humedad.



figura 1. Parcela cultivos leñosos del departamento de producción vegetal, UPV.

La estación meteorológica de la UPV, ubicada en el camino de Vera (coordenadas: 39°29'04.8"N, 0°20'34.8"W) ha registrado para la zona en los últimos 5 años temperaturas máximas de hasta 42,1 °C, mínimas de hasta 2,1 °C, temperatura promedio anual de 18,9 °C y reportándose además una precipitación acumulada promedio anual de 457 mm correspondiendo ello con los regímenes xéricos de la zona mediterránea, caracterizados por veranos húmedos e inviernos suaves, catalogándose, así como un clima BSk (semiárido- frío) según la clasificación de Köppen-Geiger (Peel *et al*, 2007).

3.2 Toma de muestra de suelo

Las muestras de suelo se tomaron bajo un árbol de kumquat (*Fortunella margarita*), en dos posiciones diferentes, a los 25 y a los 50 cm de profundidad, considerando la distribución del sistema radical real en la parcela.

Las muestras que se tomaron fueron por una parte 500 gr de suelo por cada profundidad evaluada, para posteriormente realizarle las caracterizaciones más relevantes, siendo estas el análisis de textura, así como de la dinámica hidráulica, en donde participa principalmente la presión mátrica en los procesos de capacidad de retención de agua por parte de ese suelo, utilizando el modelo de evaluación con las placas Richards que se explicará más adelante. A su vez se realizaron tomas de suelo a esas dos profundidades, con un anillo de muestreo que permite tomar porciones inalteradas de suelo manteniendo sus propiedades estructurales dado que será necesario que esté intacto para el análisis de las curvas de retención de humedad mediante el uso del HYPROP2 cuyo procedimiento se explicará también adelante.



figura 2. toma de muestras con anillo.

3.3 Profundidad del suelo

Para conocer la profundidad radical del suelo, se utiliza una barrena graduada a diferentes longitudes: a 25 cm, a 30 cm, 40 cm y 50 cm, en cuyos puntos se sacan muestras de suelo para posteriormente evaluar la cantidad de raíces que hay en ese perfil. Es importante conocer la profundidad radical ya que en ese perfil es a donde se va a dirigir el sistema de riego, propiciándole agua aquellos perfiles donde la actividad radical de absorción de agua sea mayor; teniendo en cuenta además que las raíces absorbentes son las de mayor interés en mojar, obviando las raíces de anclaje las cuales como lo indican, solo sirven de sostén a la planta.



Figura 3. A la izquierda la barrena graduada, en la derecha las muestras a cada profundidad evaluada.

3.4 Evaluación del contenido de humedad en el suelo

La parcela dispone de una instalación de riego localizado, con dos tuberías de polietileno de 16 mm de diámetro por fila de árboles, distanciadas a 150 cm, con emisores autocompensantes integrados con caudal de 4 l/h, distanciados a 100 cm. Existen diferentes métodos directos o indirectos para el análisis del contenido de humedad del suelo; en este caso optamos por usar un método indirecto correspondiente a los sensores de capacitancia ECH2O EC-5 (DECAGON DEVICES INC., Washington, USA) que utilizan la tecnología FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). Este sistema consta de un sensor que opera a una frecuencia de 70 MHz, disminuyendo los efectos de la salinidad y la textura del suelo, presentando una buena asertividad en sus resultados (METER group inc., USA). Se instalaron 2 sensores, a 25 y a 50 cm de profundidad debajo del emisor de riego y así mismo se instaló otros cuatro sensores utilizando las mismas dos profundidades, pero a una separación de 25 cm perpendicular y 50 cm en la línea de los goteros. La instalación de los mismos se hizo considerando la profundidad teórica radical del cultivo, así como de la profundidad del suelo, procurando observar la humedad en estas profundidades y además, evaluando las diferencias que pueden haber en humedad debajo del emisor de riego y cuando se encuentra a 50 cm alejado a él, con el fin de conocer la uniformidad de riego. Estos sensores arrojan datos cada 15 minutos de la evolución de la humedad a través de los Datalogger EM50 ECH2O LOGGER y EM5b (DECAGON DEVICES, WA, USA) que permitirán recolectar y almacenar la información en un computador mediante la aplicación ECH2O Utility que nos exporta los datos en un cuadro Excel, pudiendo representar gráficamente la evolución del contenido volumétrico de humedad en distintos periodos de tiempo. Es importante esto porque podremos monitorear permanentemente la humedad del suelo y regar cuando se toque dicho umbral.



figura 4. A la izquierda los sensores de capacitancia. A la derecha el datalogger EM50.

3.5 Análisis de la textura del suelo

En este caso se evalúa la textura en las dos profundidades, siendo ellas las de mayor influencia en el desarrollo y la determinación de las CRH. Para el análisis, utilizamos el método de Bouyoucos, el cual determina la densidad de sedimentación de diferentes líquidos con suspensiones sólidas utilizando un

hidrómetro calibrado, y que, dependiendo del tamaño de las mismas partículas, puede obtenerse las fracciones coloidales que la componen (Bouyoucos, 1962).

Para ello, lo primero que se debe hacer es secar el suelo a temperatura ambiente por algunos días (dependiendo de la textura o la humedad del ambiente) o hacerlo en una estufa a 105°C durante 24 horas evitando así quemar el contenido de materia orgánica que pueda tener. En nuestro caso lo realizamos con un secado a estufa. Después se debe tamizar las dos muestras tomadas por separado, mediante un tamizador mecánico o manual, para poder reducir la muestra a sus partículas más finas las cuales condicionan las propiedades físicas más relevantes. En nuestro caso utilizamos el tamizador mecánico con filtros de 2 mm de diámetro, para dejar entrar únicamente las partículas más pequeñas (arenas, limos y arcillas) y descartar piedras y otros agregados.



figura 5. Tamizador mecánico con filtros de 2 mm de diámetro.

Una vez se ha tamizado las muestras se llevan a laboratorio, se ponen en frascos separados y se les da un número identificador registrado en una libreta, que será importante durante todos los procesos posteriores para no perder su seguimiento. Posterior a ello se realiza el protocolo de bouyoucos junto a las tablas de clasificación de texturas propuestas por el USDA en 1999.

3.6 Curvas de retención de humedad mediante el método de las placas Richards

Para este procedimiento, se cogieron dos muestras de suelo, a 25 y a 50 cm de profundidad, las cuales fueron secadas, tamizadas e identificadas como se ha indicado previamente. Ya con esta muestra se procedió a tomar sub-muestras con peso promedio de 15,60 gr de suelo las cuales se disponían en los anillos de caucho en donde debía cubrir bien su volumen. Este proceso se realizó sobre la base membranososa a la cual se le inyecta agua para humedecerla y posteriormente humedecer las muestras que están sobre ella, ascendiendo el agua por capilaridad hasta quedar a saturación (se notará por un brillo sobre la superficie de la muestra).

Una vez estén humedecidas se disponen en las ollas a presión, se sella y mediante un conjunto de válvulas puede regularse la presión dentro de ellas. En este caso se sometieron las muestras a

presiones de: 1/3, ½, 1, 1 ½, 5 y 15 bares entendiéndose que el agua disponible para la planta se encuentra entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, valores que se obtienen cuando dicho suelo se somete a presiones entre 1/3 Bar y 15 Bar (Pascual y Pascual-Seva, 2020). Para cada presión ejercida se pusieron 3 repeticiones de suelo y teniendo 2 muestras diferentes, se hizo en total una evaluación de 6 sub-muestras para cada presión. Cuando las muestras se someten a presiones inferiores a 1 bar pueden sacarse de la olla al otro día para seguir con los otros procesos, mientras que cuando se someten a más de 1 bar, deben dejarse por lo menos 3 días para garantizar que la presión se haya ejercido correctamente.

Tras este tiempo se sacan las muestras de las ollas, determinándose su peso en fresco y se lleva a horno a 105°C por 24 horas y se toma su peso seco. Ya con toda esta información se procede con métodos gravimétricos a obtener la humedad retenida en función de la presión ejercida.

El cálculo gravimétrico para determinar el porcentaje en peso de agua se realiza mediante la siguiente ecuación (Semarnat, 2002):

$$\theta_g = [(P_{sh} - P_{ss}) / P_{ss}] * 100$$

Donde:

θ_g = Contenido de humedad (%p)

P_{sh} = Peso húmedo del suelo (g)

P_{ss} = Peso seco del suelo (g)

Con los valores obtenidos, se estimó las curvas de retención de humedad, capacidad de campo (0,33 Bares), punto de marchitez permanente (15 Bares) y agua disponible (diferencia entre *CC* y *PMP*).



figura 6. sub-muestras de suelo en las ollas a presión.

3.7 Curvas de retención de humedad mediante HYPROP 2

Dentro de los procesos de calibración más importantes para la puesta en marcha del HYPROP 2, la desgasificación cumple un papel importante, dado que impide que la presión se vea afectada o sesgada por vapor de aire que contrarreste la presión ejercida por el agua; por ello deben realizarse previamente los procesos de desgasificación.

3.7.1 Desgasificación

Los tensiómetros transducen el potencial mátrico de la muestra a través de unos poros que se encuentran en la punta de cerámica de ellos, los cuales se permean del agua que está a su alrededor por capilaridad y que serán importantes para hacer una posterior transducción de la señal cuando se ponga la muestra real de suelo. En ese sentido, lo primero para tener en cuenta es que todo el sistema (tanto la base como los tensiómetros) al operar con agua, debe pasar por procesos de desionización y desgasificación, haciendo una correcta calibración de este.

Este proceso se logra llevando el agua primeramente a microondas ya que el calor libera las partículas de oxígeno disueltas en ella, y posteriormente con el HYPROP REFILL UNIT, un equipo que trabaja con un manómetro y una bomba de vacío que operan a una presión de 0,8 kPa, al que se conectarán los tensiómetros y la base (previamente llenos de agua), y se les va a extraer las moléculas de oxígeno disueltas.

Este proceso puede realizarse 24 horas antes de poner la muestra de suelo en la base, dado que es necesario permanecer un tiempo en contacto con el agua para que se permeen bien y queden libres de gas interno.



figura 7. Equipo de llenado de la unidad.

3.7.2 Calibración del equipo

Una vez pasadas las 24 horas, tanto los tensiómetros como la base están listos para su calibración. mediante el programa HYPROP VIEW (Meter Group Inc.,USA), concretamente con la opción “offset recalibration”.

3.7.3 Muestra de suelo y calibración en balanza

La muestra inalterada de suelo se tomó de la parcela en dos profundidades distintas, a 25 y a 50 cm de profundidad con un anillo que mantuvo sus características estructurales. Posterior a ello se dejó humedeciendo en baño de agua entre 24 y 48 horas antes de instalarse en el equipo dado que es necesario que la muestra esté saturada, y finalmente se le realizaron dos agujeros que es donde se insertaron los tensiómetros.

Una vez se encuentre la muestra encima de la base, debe hacerse una calibración de la balanza. En principio debe ponerse en un sitio libre de vibraciones que puedan perturbar con sus resultados; además debe asegurarse que esté completamente nivelada respecto a la mesa en donde se encuentre.

Posterior a ello debe conectarse a la energía y al computador, y empezar un proceso de calibración siguiendo el manual de operación propuesto por Meter Group Inc. Una vez calibrada, se procede a poner la muestra de suelo sobre ella, se conecta dicha muestra a la balanza mediante un cable de sensor unitario y después utilizando el HYPROP VIEW seleccionamos el dispositivo conectado, insertamos los datos (volumen y peso del anillo) y se inicia el ensayo.

3.7.4 Paquetes informáticos

Existen dos programas informáticos que serán necesarios para combinarlo con este dispositivo, el HYPROP VIEW y el HYPROP FIT. El primero nos da información constante (cada minuto) de la presión a la que se está sometiendo la muestra, y las pérdidas del agua, proceso que dura alrededor de una semana en el cual se puede obtener información relativa del comportamiento hidráulico de la muestra. El segundo programa analiza toda la información recogida por el HYPROP VIEW y la relaciona, teniendo además en cuenta el peso seco de la muestra, para indicarnos el % de humedad de la muestra en cada momento del proceso y la presión registrada a esa humedad, para al final arrojarlos las curvas de retención y de comportamiento hidráulico.



figura 8. Montaje del sistema HYPROP.

3.8 Evapotranspiración de cultivo (ETc)

Como se mencionó con anterioridad, para el cálculo de la ETc se deben realizar dos procedimientos: por una parte, se calcula la ETo mediante la ecuación de FAO PENMAN-MONTEITH que utiliza los parámetros ambientales principalmente para su determinación. Dentro de los datos más relevantes se destacan las temperaturas máximas, mínimas y medias; la humedad relativa máxima, mínima y media; la radiación solar, el número de horas luz y la velocidad media del viento diaria.

Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica de la UPV, ubicada en las instalaciones de la misma, junto a la zona experimental, por lo que sus datos son de bastante fiabilidad para la determinación de la ETo.

Una vez se obtiene la ETo diaria, debe multiplicarse por un coeficiente Kc que es quien relaciona directamente la ETo con la ETc; dicho coeficiente variará según cada cultivo y según la época del año en la que se encuentre, dado que este muestra el consumo de agua que pueda tener un cultivo según su estado fenológico, por lo que cultivos frutales como los cítricos, tendrán un coeficiente mayor cuando se encuentran en fase de cuajado y crecimiento de fruto, coincidiendo además con el verano, lo que como se verá a continuación, generará una gran demanda de agua.

Los datos del Kc fueron tomados del IVIA (instituto valenciano de investigación agraria) el cual ha hecho un gran esfuerzo de investigación para los cítricos, principal cultivo de la comunidad valenciana, y que ha determinado su coeficiente para cada mes del año, teniendo un total de 12 datos que fueron con los que se trabajaron para la determinación de la ETc.

3.9 precipitación efectiva (Pe)

Para obtener los datos de la precipitación efectiva, se deben tener en cuenta características como la frecuencia y la intensidad de las lluvias, características orográficas, propiedades físicas del suelo, contenido de humedad en el suelo o prácticas culturales.

Existen a su vez fórmulas empíricas con la precipitación y la ET como variables independientes. En nuestro caso optamos por utilizar el método del SCS del USDA, propuesto por Doorenbos y Pruitt en 1976, en donde consideran las lluvias (mm) y el consumo de agua mensual medio (mm) relacionándolos en la figura 9, atendiendo a un valor de Pe que depende de estos dos factores.

Lluvia mes(mm)	Consumo de agua mensual media (mm)													
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
12,5	7,5	8,0	8,7	9,0	9,2	10,0	10,5	11,2	11,7	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
25,0	15,0	16,2	17,5	18,0	18,5	19,7	20,5	22,0	24,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
37,5	22,5	24,0	26,2	27,5	28,2	29,2	30,5	33,0	36,2	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
50,0	25,0	32,2	34,5	35,7	36,7	39,0	40,5	43,7	47,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
62,5		39,7	42,5	44,5	46,0	48,5	50,5	53,7	57,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
75,0		46,2	49,7	52,7	55,0	57,5	60,2	63,7	67,5	73,7	75,0	75,0	75,0	75,0
87,5		50,0	56,7	60,2	63,7	66,0	69,7	73,7	77,7	84,5	87,5	87,5	87,5	87,5
100,0			63,7	67,7	72,0	74,2	78,7	83,0	87,7	95,0	100,0	100,0	100,0	100,0
112,5			70,5	75,0	80,2	82,5	87,2	92,7	98,0	105,0	111,0	112,0	112,0	112,0
125,0			75,0	81,5	87,7	90,5	95,7	102,0	108,0	115,0	121,0	125,0	125,0	125,0
137,5				88,7	95,0	98,7	104,0	111,0	118,0	126,0	132,0	137,0	137,0	137,0
150,0				95,2	102,0	106,0	112,0	120,0	127,0	136,0	143,0	150,0	150,0	150,0
162,5				100	109,0	113,0	120,0	128,0	135,0	145,0	153,0	160,0	162,0	162,0
175,0					115,0	120,0	127,0	135,0	143,0	154,0	164,0	170,0	175,0	175,0
187,5					121,0	126,0	134,0	142,0	151,0	161,0	170,0	179,0	185,0	187,0
200,0					125,0	133,0	140,0	148,0	158,0	168,0	178,0	188,0	196,0	200,0
225,0						144,0	151,0	160,0	171,0	182,0				
250,0						150,0	161,0	170,0	183,0	194,0				
275,0							171,0	181,0	194,0	205,0				
300,0							175,0	190,0	203,0	215,0				
325,0								198,0	213,0	224,0				
350,0								200,0	220,0	232,0				
375,0									225,0	240,0				
400,0										247,0				
425,0										250,0				

Figura 9. Precipitación efectiva mensual media (Pe) en relación con la precipitación mensual media (mm) y el consumo de agua mensual medio (mm).

3.9.1 Dosis y frecuencia de riego.

Finalmente, cuando ya se tiene el consumo de agua a lo largo del año, y además cuando ya se tiene la precipitación efectiva, se puede determinar la necesidad de riego, entendiendo esta como la diferencia entre la precipitación efectiva y la ETC diaria. Esta diferencia determinará lo que es el volumen de agua a aplicar en mm, el cual se irá sumando y acumulando hasta agotar el 15% del agua desde la capacidad de campo, momento en el que se debe regar.

Como las unidades de medida que se emplean en la agricultura son de litros por planta o metros cúbicos por ha, los resultados que tenemos en mm los pasamos a la unidad de l/m², la cual es una relación 1:1 por lo que no existen inconvenientes en su cambio. Se debe tener en cuenta además que una vez se tenga la lámina bruta a aplicar en l/m², debe considerarse cuantos metros cuadrados se van a mojar, siendo este el equivalente al marco de siembra, la edad y el tamaño de la plantación.

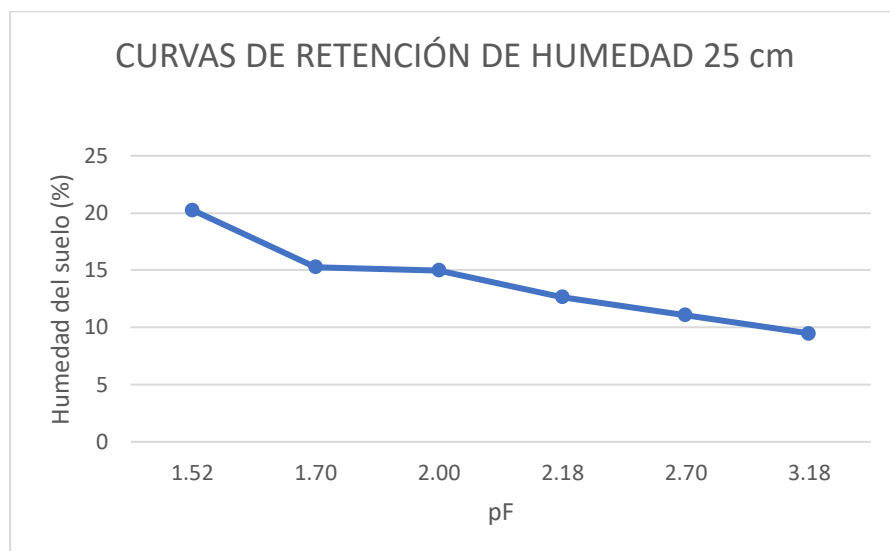
El marco de plantación es de 4*4, los emisores están separados a 1,5 metros entre líneas y a 1 metro emisores, por lo que a cada planta le corresponden 8 emisores de riego, cada uno con capacidad de humedecer hasta 0,75 m², por lo que el área a mojar en total serán 6 m². Multiplicando entonces la lamina bruta por el área a mojar, obtenemos la lamina neta de agua a aplicar.

La frecuencia de riego será entonces, la correspondiente a cuando se toque el umbral de acción, siendo este un consumo del 15% del agua desde la capacidad de campo, y el tiempo de riego se determina dividiendo la lámina neta sobre el caudal de riego, cuyo resultado se expresará en horas.

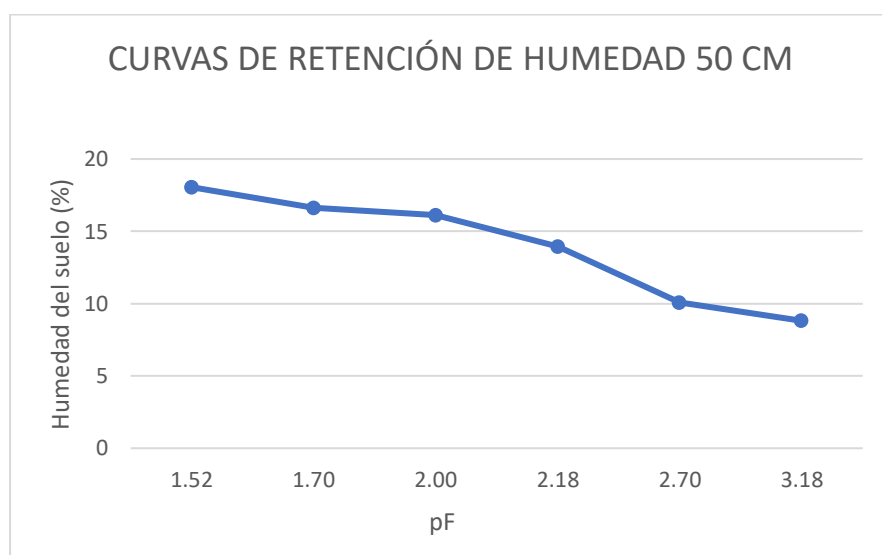
La muestra a 25 cm presenta una textura franco-arcillosa, mientras que a una profundidad de 50 cm es franco arcillo arenosa. Cabe resaltar que el suelo de la parcela de frutales, en donde se realiza el experimento, fue intervenido antrópicamente en el año 1980 cuando resultado de una excavación que se hizo para la construcción de una sede de la universidad, se tomó parte de dicho suelo para formar lo que ahora es la parcela.

La textura cumple un rol importante en la humedad y capacidad de retención de agua en el suelo, por lo que teniendo en cuenta que las dos profundidades poseen diferencias en sus partículas coloidales, el plan de riego debe tener en cuenta la capacidad de infiltración y percolación para lograr la máxima uniformidad y eficiencia posible.

4.2 Curvas de retención de humedad mediante Placas Richards



Gráfica 1. Curvas de retención de humedad a 25 cm de profundidad.



Gráfica 2. Curvas de retención de humedad a 50 cm de profundidad.

Las unidades pF fueron definidas en el año 1935 por Schofield como el logaritmo en base decimal de la tensión del agua del suelo, parámetro que aún es usado por muchos autores, pero que ahora se utilizan más los valores de presión con unidades en kPa. La CRH nos marca dos puntos clave, el 1.52 y

el 3.18 en el eje horizontal de la gráfica, los cuales corresponden con 33 kPa y 1500 kPa respectivamente, lo que hacen alusión a su vez a la CC y al PMP. En dichos puntos, en el caso de la gráfica 1, la CC es 20,26% y el PMP es 9,48%; mientras que para la gráfica 2, la CC es 18,05% y el PMP es 8,81%.

Los valores resultantes deben multiplicarse por la densidad aparente, que para el caso del suelo franco arcilloso se usa un valor medio de $1,33 \text{ gr/cm}^3$, y para el suelo franco-arcillo-arenoso un valor medio de $1,40 \text{ gr/cm}^3$. En ese caso, los datos finales serían para la gráfica 1, una CC de 26.9% y un PMP de 12,60%, mientras que para la gráfica 2, tenemos una CC de 25,27% y un PMP de 12,33%. Los datos de densidad aparente fueron tomados de las tablas de propiedades físicas del suelo realizadas por Israelsen y Hansen en 1979, en donde proponen un rango de densidad aparente en función de la textura y la porosidad de este.

Esta información nos indica para cada horizonte de suelo, el agua disponible máxima que pueden albergar, entendiendo esta como el agua útil. así, a 25 cm de profundidad, el AU es de 14,3%, y a 50 cm de profundidad tendrá uno de 12,94%. Entre el rango sea más amplio, las dosis de riego pueden ser menos frecuentes dado a la gran capacidad del suelo de poder almacenar agua dando abasto a los cultivos hasta que hayan agotado sus umbrales de acción.

Como se ha mencionado antes, a pesar de que el AU tenga estos valores, no por ello significa que debemos dejar desecar el suelo hasta el rango inferior, ya que para ese momento se generarán daños irreversibles en el cultivo, por lo que conviene establecer un umbral denominado agua fácilmente disponible, que puede variar según el cultivo y el suelo, y que puede ser monitoreado con la ETC diaria para poder automatizar la dosis de riego.

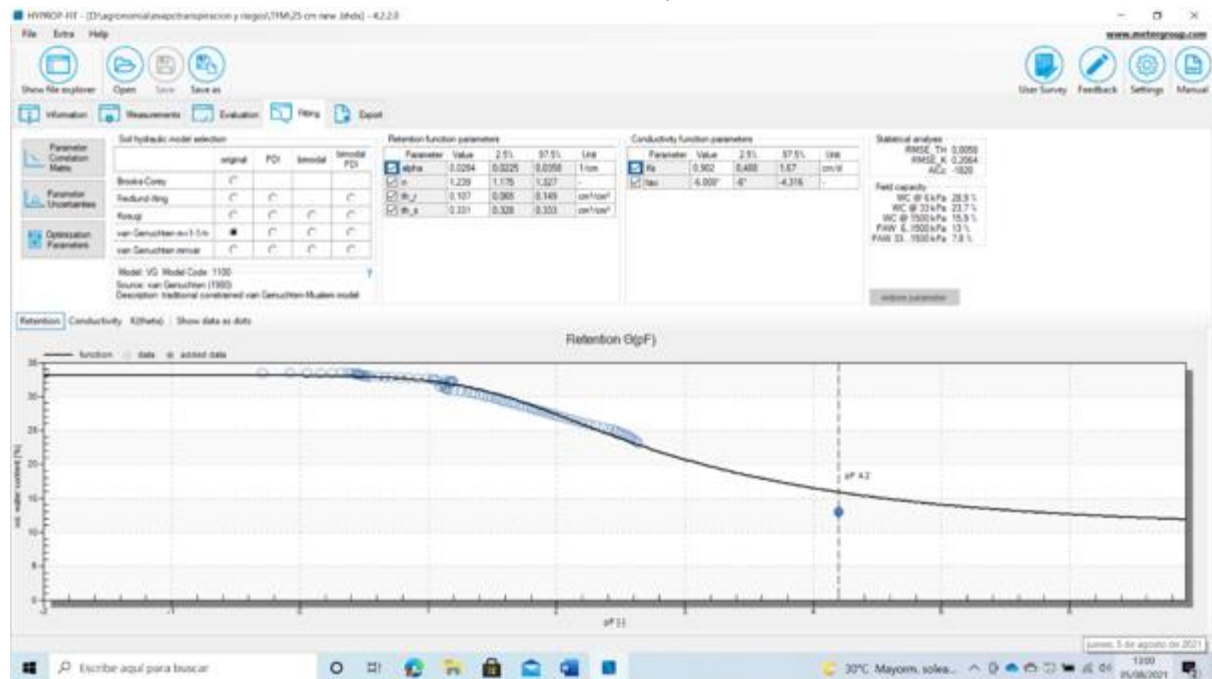
Haciendo una revisión bibliográfica de las tablas de las propiedades físicas del suelo realizadas por Israelsen y Hansen en 1979, detallan que, para suelos con textura franco-arcillosa, la CC debería oscilar entre los 23-31% y el PMP entre el 11-15%; mientras que para suelos franco-arcillo-arenosos, la CC debería oscilar entre los 18-26%, mientras que el PMP entre el 8-12%. Haciendo la comparación, los resultados obtenidos utilizando las placas Richard nos permiten entrar dentro de rangos aceptables a los que otros autores también han llegado.

Finalmente deben pasarse los datos a unidades de longitud, ya que, en adelante, para preparar los planes de riego en función del agua perdida, se utilizan parámetros de longitud/longitud (cm/m) ó (mm/10 cm). La lámina de agua útil en el primer horizonte de suelo es de 14,3 mm/10 cm de suelo, y asumiendo que se tomó a 25 cm de profundidad y que el perfil es homogéneo, entonces para el perfil 1 de suelo tendremos 35,75 mm de agua disponible. Para el perfil 2, que abarca desde los 25 cm hasta los 50 cm de profundidad, la cual es homogénea, se tiene una lámina de agua disponible de 12,94%, lo que significa una lámina de agua disponible de 32,35 mm. La lámina total disponible es de 68,1 mm de agua/50 cm de suelo.

4.3 Curvas de retención de humedad mediante HYPROP 2

A continuación se presentan las CRH obtenidas en las dos profundidades evaluadas. Los resultados fueron determinados por el programa HYPROP-FIT que utiliza los parámetros de desorción, peso y tensión, en conjunto con las fórmulas propuestas por Van Genuchten de evaporación para su estimación.

4.3.1 Curvas de retención de humedad a 25 cm de profundidad.

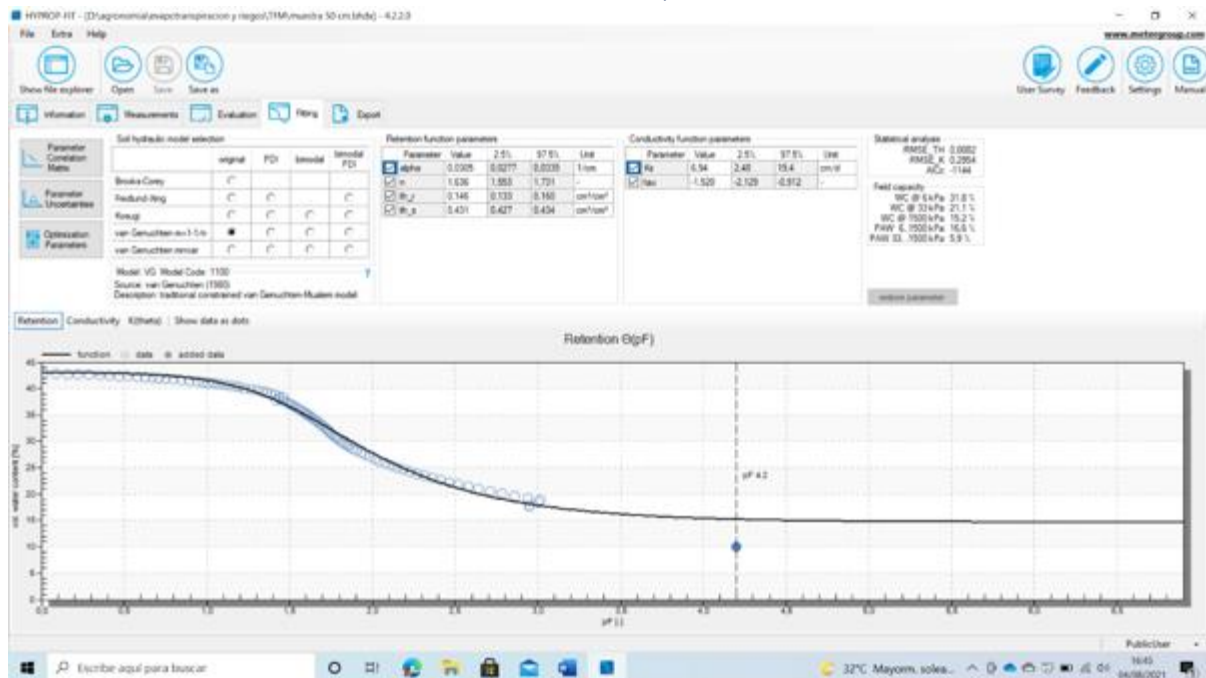


Gráfica 3. Curvas de retención de humedad mediante el HYPROP-FIT a una profundidad de 25 cm.

La humedad máxima (de saturación) que albergó la muestra fue de 33,5%, con un volumen de 324 cm³ y una masa seca de 430 g. La densidad aparente fue de 1,33 g/cm³ y una porosidad de 0,50. La CC resultante fue de 23,7% a 33kPa de presión (0,33 bar), mientras que la PMP fue de 15,9% a 1500 kPa (15 bar). Cabe recordar que el HYPROP SOIL MEASUREMENTS solo posee tensiómetros que miden tensiones hasta aproximadamente los 900 kPa, por lo que no alcanza a medir correctamente la PMP y solo la estima, utilizando una matriz de correlación de parámetros, en donde nos indican puntos hasta un pF de 4,2, lo cual en principio es información útil.

El AU (CC-PMP) es de 7,8% siendo inferior a la obtenida con las placas RICHARDS, por lo que podría sesgar el manejo del riego. En ese sentido, tendremos que cotejar la información con diferentes fuentes de información que corroboren la certeza de la PMP. Cabe remarcar que el dato de PMP no es fundamental para el correcto manejo del riego, ya que en riego localizado éste puede realizarse en función de la CC. Estos valores están de acuerdo con los propuestos por Israelsen y Hansen(1979) para estas texturas.

4.3.2 Curvas de retención de humedad a 50 cm de profundidad mediante HYPROP 2



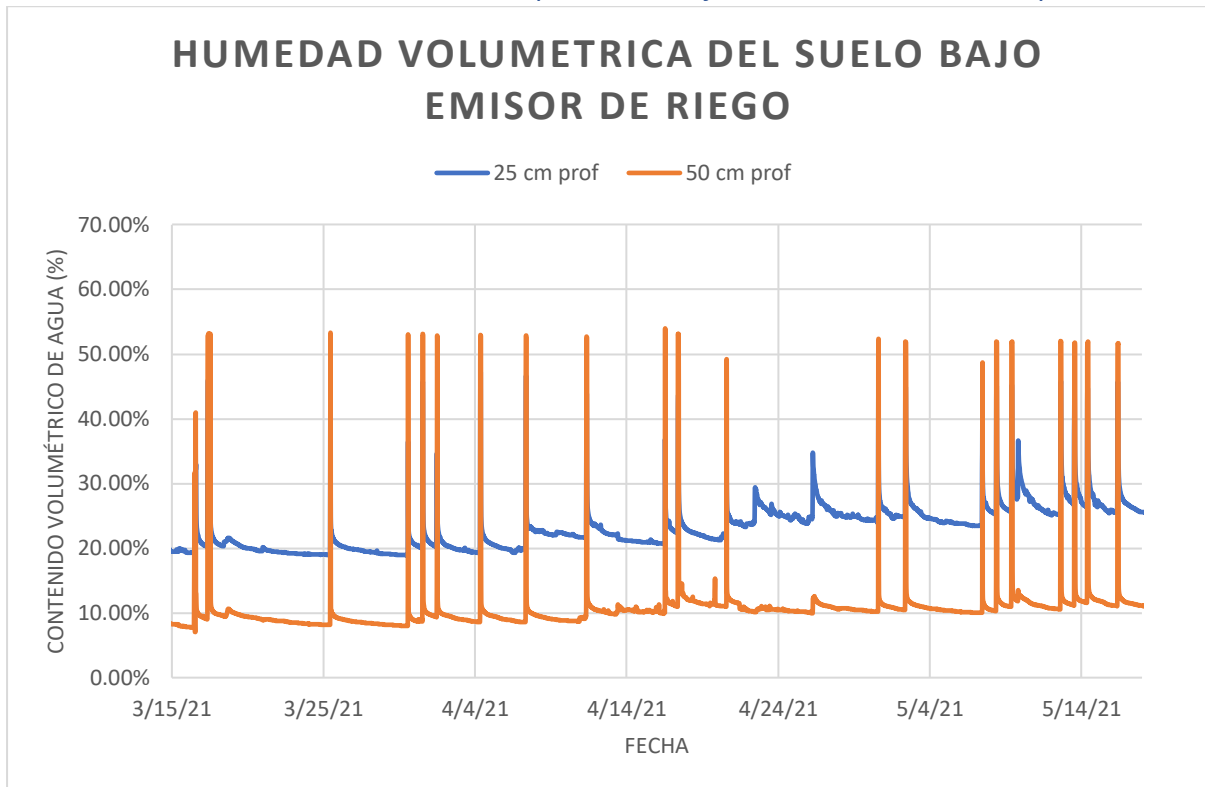
Gráfica 4. Curvas de retención de humedad mediante el HYPROP-FIT a una profundidad de 50 cm.

La humedad máxima (de saturación) que albergó la muestra fue de 44,4%, con un volumen de 249 cm^3 y una masa seca de 317 g. La densidad aparente fue de 1,27 g/cm^3 y una porosidad de 0,52. La CC resultante fue de 22,4% a 33kPa de presión (0,33 bar), mientras que la PMP fue de 15,7% a 1500 kPa (15 bar).

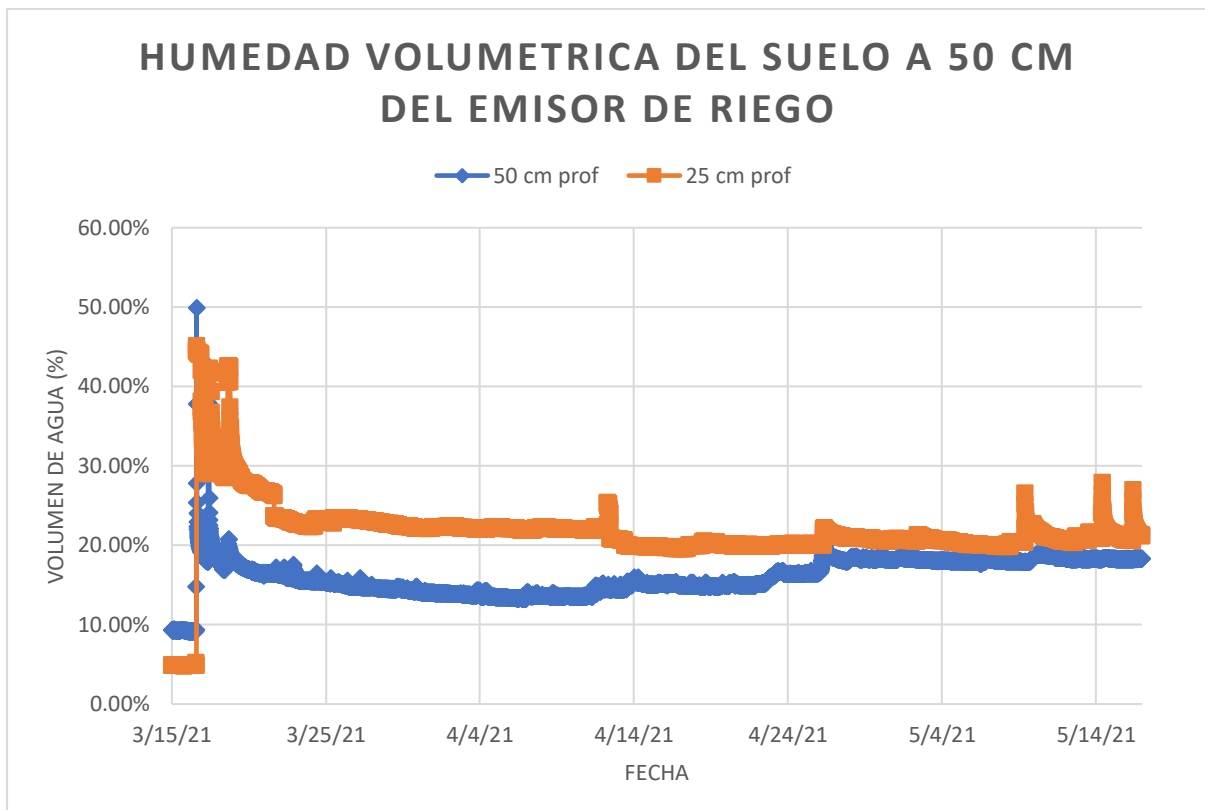
El AU (CC-PMP) es de 6,7% siendo inferior a la obtenida con las placas RICHARDS. En ese sentido, tendremos que cotejar la información con diferentes fuentes de información que corroboren la certeza de la PMP. Finalmente, los resultados de la CC y la PMP coinciden con los propuestos por ISRAELSEN y HANSEN en el año 1979 para estas texturas.

El agua útil en el horizonte 1 es de 7,8 mm/ 10 cm de suelo, por lo que para los 25 cm, el agua disponible es de 19,5 mm, mientras que para el horizonte 2, el agua disponible es de 16,75 mm, albergando un total de 36,25 mm en los 50 cm de suelo, siendo este dato inferior al obtenido con las placas Richards.

4.4 Humedad en el suelo mediante el dispositivo FDR junto a los sensores de capacitancia



Gráfica 5. Datos tomados a 25 y 50 cm de profundidad bajo el emisor de riego.



Gráfica 6. Datos tomados a 25 y 50 cm de profundidad alejados 50 cm con respecto al emisor de riego.

Lo primero que cabe aclarar es que existen diferencias marcadas en el contenido de agua en el suelo, dependiendo de la ubicación del emisor y la ubicación de la sonda de capacitancia. Observamos que el contenido de agua en el suelo no presenta diferencias importantes cuando se evalúa a 50 cm alejado al emisor de riego entre las dos profundidades, dándonos a entender de que existe una buena infiltración del agua, a su vez dado esto por la textura, densidad aparente y porosidad del suelo, siendo un punto a favor para la homogeneidad del riego y por tanto de su eficiencia en esa parte. No obstante, sí existen diferencias importantes cuando la sonda se encuentra bajo el emisor de riego, bajando en incluso 10 unidades porcentuales el contenido del agua en el suelo cuando este se encuentra a 50 cm de profundidad en comparación con la que se encuentra a 25 cm de profundidad. Esta información nos dice que el bulbo húmedo que es acaparado no logra cubrir todo el volumen de suelo, lo que resulta en una baja distribución entre los horizontes. La importancia de esta información radica en dos conclusiones; por una parte, el bulbo húmedo que es acaparado por los emisores presenta una uniformidad de distribución amplia en toda el área a mojar para el cultivo en sus primeros horizontes (primeros 25 cm), por lo que no habría problemas de disponibilidad de agua para la zona radical del cultivo en los primeros 25 cm de profundidad. A su vez observamos que, a 50 cm de profundidad, el agua que llega producto de la infiltración representa un aumento en el nivel del agua pero que rápidamente vuelve a bajar hasta niveles por debajo del 10%, por lo que la capacidad de retención en ese segundo perfil es baja, dado a su textura. No obstante, como se hará mención mas adelante, la zona radical con mayor extracción se encuentra en los primeros perfiles, por lo que una profundidad de 50 cm no acarrearía problemas en el cultivo, habiendo raíces de anclaje principalmente, mas no de absorción o extracción.

Por otra parte y haciendo hincapié en el agua útil, observamos que se mueve entre el 25% y el 14% en el caso del suelo franco arcilloso (primeros 25 cm de suelo) y entre el 26% y el 12% en el caso del suelo franco-arcillo-arenoso (25-50 cm profundidad) según los estudios de ISRAELSEN y HANSEN de 1979 de las propiedades físicas del suelo. dicha información es coherente con los datos obtenidos por los sensores de humedad, que expresan valores aceptables de humedad tratándose de la porción de suelo bajo el emisor.

4.5 Evapotranspiración de cultivo (ETc)

Tabla 1. Datos de Evapotranspiración de referencia (Eto), precipitación efectiva (Pe), evapotranspiración de cultivo (ETc) y necesidad de riego (Nr) mensual. (expresados en mm).

mes	Eto	Kc	Etc	Pe	Nr
enero	39,87	0,58	23,28	23,28	0
febrero	51,19	0,58	29,43	19,8	9,63
marzo	66,9	0,58	39,07	24,2	14,87
abril	89,18	0,55	48,87	47,6	1,27
mayo	149,49	0,49	72,65	20,4	52,25
junio	165,52	0,55	90,70	33,8	56,90
julio	171,18	0,601	102,87	10,4	92,48
agosto	157,46	0,70	109,91	0	109,91
septiembre	96,42	0,65	63,06	27,7	35,36
octubre	79,53	0,74	59,01	0	59,01
noviembre	29,13	0,65	18,79	18,79	0
diciembre	42,19	0,56	23,50	0	23,50
total	1138,06		681,16	225,97	455,18

La ETo total fue de 1138 mm/año usando la ecuación, la cual evidentemente tiene unos picos máximos y mínimos en función de la época del año evaluada, siendo mayor durante los meses de junio, julio y agosto, y mínima durante los meses noviembre, diciembre y enero. Este resultado debe de ser modificado por el Kc. Para el caso nuestro, los valores de kc utilizados corresponden a los obtenidos por el IVIA (instituto Valenciano de investigaciones agrarias) los cuales pondré a disposición en la siguiente tabla, y que relacionan directamente a la ETo con la ETc.

La ETc para algunos cultivos suele ser menor que la ETo, es el caso de los cítricos, cuyo factor de corrección (Kc) disminuye la evapotranspiración del cultivo frente a la ETo, dado que efectivamente es un cultivo que no demandaría tanta agua, como si lo fuera el pasto de referencia. No obstante, si existen otros cultivos con una ETc mayor, como es el caso del maíz, o la alfalfa, que demandan grandes cantidades de agua para su desarrollo. La ETo varía en función de la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar, dentro de los parámetros climatológicos más destacables. No obstante, la conversión a la ETc también tiene en cuenta el estado fenológico de la planta y edad de la plantación, asumiendo los valores de Kc para una plantación adulta, que está en plena producción, y que, de acuerdo con su etapa fenológica, mes a mes variará su demanda de agua mes a mes, siendo mayor esta entre julio a noviembre, momento en el cual la planta está en fase de fructificación, cuajado y crecimiento del fruto.

Por otra parte, la ETc mínima esta entre los meses de noviembre, diciembre y enero, coincidiendo claramente con la parada invernal de crecimiento, momentos en los que la planta no reaccionará de manera efectiva ante el suministro de agua para su desarrollo.

4.6 Precipitación efectiva (pe)

La primera manera como un cultivo puede compensar sus pérdidas ante la evapotranspiración es mediante la precipitación. No obstante, la misma sufre procesos de percolación y escorrentía, haciendo que no todo el agua que cae se pueda aprovechar. En ese punto, se estima que las lluvias por debajo de los 5 mm de agua caída, no se asumen en el plan de riego del cultivo, siendo únicamente importante las lluvias con una cantidad superior a esta cifra.

Además, como bien sabemos, el suelo funciona como un reservorio de agua, capaz de almacenar como máximo, el agua correspondiente a CC, por lo que toda lluvia que pueda subir el nivel de humedad del suelo por encima de la capacidad de campo (saturación) serán datos igualmente no efectivos para tener en cuenta dentro del plan de riego, ya que esa agua sobrante va a estancarse a manera de películas de agua sobre el suelo, encharcándolo, y posteriormente irse perdiendo en función de la infiltración del suelo, de modo que puede darse en un tiempo determinado que de igual manera no va a ser relevante para ser tenido en cuenta como agua aprovechable para el cultivo.

Dentro de los datos recogidos de la estación meteorológica de la UPV para el año 2020-2021, observamos una precipitación efectiva total anual de 225,97 mm presentando un pico máximo en abril con 47,6 mm, y mínimos en los meses agosto, octubre y diciembre con 0 mm de lluvia. Las lluvias en noviembre fueron mas intensas, no obstante la ETc es baja, por lo que la Pe también lo es.

4.7 Necesidad de riego

Se entiende por necesidad de riego a la aplicación de agua que debe efectuarse para suplir con la ETc restante que la Pe no pudo surtir. La necesidad de riego es pues, la diferencia entre la ETc y Pe. Cabe resaltar, además, que cuando se da una precipitación que eleve los niveles de humedad del suelo por encima de la CC, saturará el mismo, convirtiéndose esta agua en no aprovechable para la planta, por lo que no debe considerarse en el plan de riego. Así pues, se debe entender que este exceso de agua

se perderá en procesos de infiltración, evaporación, percolación, entre otros que, según la definición de la CC, deberá realizarse en un periodo de 72 horas.

Los meses que más necesidad de riego tendrán, son desde mayo hasta agosto, en donde la precipitación es escasa y la evapotranspiración alta, y en cada mes, el número de riegos dependerá de la ETc diaria, el consumo y el umbral de acción propuesto del cual se hablará más adelante. Así pues, la necesidad de riego total es de 455,18 mm a aportar, pudiendo incrementarse mucho más dado a la mala uniformidad en la distribución de la Pe, típica de los regímenes xéricos de la región mediterránea.

4.8 Umbral de riego

Como se mencionó anteriormente, se estima un umbral de agua fácilmente aprovechable cuando se ha consumido alrededor del 50% del agua útil cuando se tienen texturas franco-arcillosas; no obstante, esto aplica en principio para los riegos por superficie, en donde conviene dejar intervalos de tiempo largos a fin de tener una lámina de agua considerable a aplicar que pueda compensar los gastos operacionales de la misma. En este ensayo se tiene un sistema de riego localizado, en el cual los intervalos y la lámina de riego pueden ser menores dado que los gastos operacionales son mucho menores igualmente. En ese sentido, el umbral de acción puede bajarse hasta un consumo del 15% de la CC, o en su defecto, cuando se ha bajado a un 85% el agua desde la CC. Estos parámetros son pues, los que tendremos en cuenta para el diseño de nuestro plan de riego.

Por otra parte, con respecto a la profundidad a la que se pretende llegar mediante el riego, se determinó en principio llegar hasta los 50 cm de profundidad. Sin embargo, para riego localizado, que utiliza bajos caudales (4 l/hora), 32 l/h para un árbol dado que cada árbol tiene 8 emisores, se hace muy lento el proceso de infiltración, sumado a ello el tiempo de riego que debería implementarse para poder acaparar estos horizontes podría no ser una práctica rentable de riego. Además, tener en cuenta que la profundidad de suelo en la parcela de frutales es de alrededor de 50 cm, por lo que el 70% de la actividad radicular de la planta reposa sobre los primeros 25 cm de suelo, zona más importante de mantener húmeda y sobre la cual basaremos nuestro plan de riego.

4.9 Diseño del sistema agronómico de riego

Tabla 2. Humedad inicial de suelo en distintos horizontes y posiciones respecto al emisor de riego.

humedad inicial suelo	Humedad volumétrica (%)	Lámina total (mm)	fecha
25 cm bajo emisor	20,90%	52,5	1/4/21
50 cm bajo emisor	9,80%	24,5	1/4/21
50 cm longitudinal emisor, 25 cm profundidad.	22,30%	55,7	1/4/21
50 cm longitudinal sobre la línea de riego, 50 cm profundidad	14,00%	35	1/4/21

Para empezar, se debe tener en cuenta la humedad inicial del suelo utilizando los sensores de humedad. De normal debe realizarse al día actual con el que tiene pensado empezar el plan de riego; en este caso se empezaron a tomar las medidas el día 1 de abril de 2021, en cuyo caso la humedad bajo los emisores era del 20,90%, significando esto una lámina inicial de 52,50 mm en los primeros 25 cm de suelo. Como se mencionó anteriormente, este resultado es el que vamos a tener en cuenta para nuestro sistema de riego, dado que el 70% de las raíces activas se encuentran en este perfil, por lo que es importante mantenerlo hidratado.

Una vez conocida la humedad con la que se cuenta, se debe observar las propiedades físicas del suelo (las características de retención de humedad) y lograr ubicar esta humedad dentro del rango, para saber el estado actual del suelo, y si es necesario, regar para mantenerlo dentro de los umbrales aceptables.

Tabla 3. Umbral de riego de acuerdo con el consumo de agua respecto a la capacidad de campo.

Richards 25 CM	Humedad volumétrica (%)	mm/10 cm suelo	mm totales/horizonte
CC	26,9	26,9	67,25
umbral de acción:	22,9%	22,86	57,16
HYPROP 25 CM			
CC	23,7	23,7	59,25
umbral de acción:	20,25%	20,14	50,36

En ese sentido, para las placas RICHARDS se regaría cuando se hubiera agotado una lámina de 10 mm de agua, mientras que para el HYPROP cuando se ha agotado una lámina de 9 mm, por lo que no es una gran diferencia la una de la otra.

La humedad inicial es de 52,5 mm, por lo que es necesario realizar un primer riego en el caso de las placas RICHARDS, de 5 mm de agua, mientras que para el caso del HYPROP no es necesario realizar aun riego, dado que esta todavía dentro de rangos aceptables. Así pues, el plan de riego consistirá en observar día a día el balance de agua en el predio, sumando la precipitación efectiva, la humedad del suelo, y restando la ETc diaria, y cada que el agua disminuya al umbral de acción, se riega nuevamente hasta capacidad de campo, y así sucesivamente.

4.9.1 Volumen de agua a aplicar y duración

Tabla 4. Caudal de riego por emisor y área a mojar.

caudal de riego	4l/hora
distancia entre emisores	1,00 m
distancia entre líneas de riego	1,50 m
área por emisor	0,75 m ²
emisores por árbol	8
área para mojar por árbol	6 m ²

Cuando alcanza el umbral de acción y es necesario regar, se debe obtener la lámina de riego, expresada en términos de volumen para determinar el tiempo de riego. Para ello, se debe conocer el área a regar por árbol, entendiendo esto como el número de emisores para cada árbol.

Dentro de este sistema se cuentan con 8 emisores por árbol, separados a 1,5 metros entre líneas y 1,0 m entre emisores, dando un área total a mojar de 6 m². No obstante, el marco de plantación es de 4*4, con un diámetro de copa de 2,5 m, y un área por árbol de 16 m², por lo que los mm obtenidos en la lámina de riego son dados por unidad de m², siendo necesario que se multiplique por la superficie total, siendo esta la del marco de plantación. Siendo así, a cada árbol se le debe suministrar una lámina total de 160 mm en el caso de las placas Richards, o de 144 mm en el caso del HYPROP. Esto es equivalente a un volumen de 160 l/árbol y 144 l/árbol respectivamente. Para ello se debe considerar el marco de plantación o el área radicular de mayor importancia, que se determinó dependiendo de la edad y tamaño del árbol.

Un emisor tiene un caudal de 4 litros/hora, por lo que los 8 emisores tienen capacidad de suministrar 32 litros/hora, por lo que debe realizarse la división entre el volumen a mojar y el caudal a aportar

para obtener el tiempo de riego. En este caso si se piensa mojar una lámina de 160 litros por árbol, y el caudal total por árbol es de 32 litros/ hora, quiere decir que se requerirá 5 horas de riego continuo para suministrar la lamina necesaria.

Tabla 5. Número de riegos mensuales utilizando las dos tecnologías.

distribución de riegos	placas RICHARDS	HYPROP
mes	Número de riegos	Número de riegos
enero	1	2
febrero	2	2
marzo	2	2
abril	4	4
mayo	4	6
junio	8	8
julio	9	10
agosto	10	10
septiembre	3	4
octubre	6	6
noviembre	1	1
diciembre	2	2
total	52	57

Lo primero a observar es que no hay mucha diferencia utilizando los dos sistemas de determinación de las curvas de retención de humedad en cuanto la cantidad de riegos al año a aplicar. En el caso de las placas RICHARDS se deben realizar 52 riegos anuales, mientras que en el HYPROP 2 57, esto es dado precisamente a lo que se mencionó anteriormente que al HYPROP 2 tener valores de CC mas pequeños, el umbral de acción así mismo será mas estrecho y por tanto se verá en la necesidad de regar con mas frecuencia, no obstante los resultados entre uno y el otro no difieren mucho, cosa que debería ser así dado a que se esta trabajando sobre el mismo suelo, con sus mismas texturas, por lo que de haber grandes diferencias, significa que algo no esta marchando bien en alguna tecnología.

Otro punto para observar es el número de riegos mensuales en los diferentes meses, entendiendo que son mayores en los meses de junio, julio y agosto, evidentemente esto dado a las altas tasas de evapotranspiración diarias, llegando a valores de 5- 6 mm día, que pueden consumirse el agua útil en dos días, por lo que la frecuencia es mayor. Esto no es solo dado a la ETc, sino también al Kc de cultivo que en esos meses, se encuentra en fases criticas (crecimiento de fruto) por lo que demandan grandes cantidades de agua, aumentando entonces las necesidades de riego. Caso contrario es en los meses de noviembre, diciembre y enero, en donde se aplican en promedio 1 o 2 riegos mensuales, dado por una parte a las bajas tasas de evapotranspiración (hasta 0,2 mm diarios) y a que el cultivo se encuentra en parada invernal, por lo que el Kc es bajo y las necesidades también lo son.

Finalmente, el volumen utilizado durante toda la campaña agrícola anual fue de 8590 l/planta empleando la tecnología HYPROP, mientras que fue de 8738 l/planta utilizando las placas Richards. No hay mucha diferencia entre la una y la otra, siendo los datos inferiores empleando el HYPROP a pesar de que se regó mas veces, dado principalmente por el calendario de aplicación. Algunas lluvias fueron mas aprovechadas empleando la metodología HYPROP, en especial en el mes de noviembre, por lo que el volumen de agua a aplicar fue menor, no obstante la diferencia no se debe a las metodologías aplicadas.

Tabla 6. Necesidad de riego para naranjos según recomendación del IVIA, empleando la estación meteorológica de Moncada.

Mes	Desde	Hasta	ETo Reg	Días con datos	ETo	Kc	ETc	P	Pu	Pe	Nec. riego	Nec. riego brutas	Factor de modulación	Litros/planta	Horas riego
6	01/06/2020	30/06/2020	160.79	30	160.79	0.59	94.88	15.2	13.8	11.04	83.84	83.84	100	1341.38	1d 17:55
7	01/07/2020	31/07/2020	165.7	31	165.7	0.647	107.21	7.2	3.5	2.8	104.41	104.41	100	1670.53	2d 04:12
8	01/08/2020	31/08/2020	155.17	31	155.17	0.752	116.66	0.8	0	0	116.66	116.66	100	1866.54	2d 10:19
9	01/09/2020	30/09/2020	113.46	30	113.46	0.704	79.87	21.1	20.5	16.4	63.47	63.47	100	1015.5	1d 07:43
10	01/10/2020	31/10/2020	83.84	31	86.54	0.799	69.15	11.79	6.59	5.27	63.88	63.88	100	1022.08	1d 07:56
11	01/11/2020	30/11/2020	36	30	36	0.695	25.02	131.7	128.5	102.8	0	0	100	0	00:00
12	01/12/2020	31/12/2020	40.71	31	40.71	0.599	24.39	3.2	0	0	24.39	24.39	100	390.24	12:12
1	01/01/2021	31/01/2021	49.14	31	49.14	0.628	30.87	41.3	37.7	30.16	0.71	0.71	100	11.39	00:21
2	01/02/2021	28/02/2021	55.59	28	55.59	0.619	34.38	25.2	21.9	17.52	16.86	16.86	100	269.83	08:25
3	01/03/2021	31/03/2021	72.99	31	72.99	0.628	45.86	45.3	42.1	33.68	12.18	12.18	100	194.8	06:05
4	01/04/2021	30/04/2021	82.01	30	82.01	0.59	48.39	57.1	45.7	36.56	11.83	11.83	100	189.3	05:55
5	01/05/2021	31/05/2021	140.73	31	140.73	0.523	73.66	21.7	19.4	15.52	58.14	58.14	100	930.26	1d 05:04
TOTALES			1156.13	365	1158.83	0.648	750.33	381.59	339.69	271.75	556.37	556.37		8901.84	11d 14:11

La estación meteorológica de Moncada, perteneciente a las instalaciones del IVIA, se encuentra igualmente en la comunidad valenciana, a 20 km de distancia de las instalaciones de la UPV en donde se realizó el procedimiento experimental de este proyecto, por lo que una comparación entre los resultados aquí expuestos, con los resultados de este centro de investigación, podrían indicar la fiabilidad de la metodología empleada en este proyecto.

Tal y como lo observamos en la tabla 1, la ETo obtenida fue de 1138 mm/año, mientras que en los datos del IVIA, esta fue de 1158 mm/año. La ETc en la tabla 1 fue de 681 mm/año mientras que en los datos del IVIA fue de 750 mm/año. En sentido general, todos los datos aquí comparados no difieren drásticamente, por lo que podríamos dar certeza de fiabilidad del procedimiento realizado en este informe.

Tabla 7. Volumen de agua a aplicar y tiempo de riego mensual en la parcela experimental mediante tecnología HYPROP 2.

mes	litros por planta	tiempo (h)
enero	0,0	0,0
febrero	310,5	9,7
marzo	315,6	9,9
abril	751,9	23,5
mayo	738,8	23,1
junio	1276,2	39,9
julio	1469,1	45,9
agosto	1811,3	56,6
septiembre	476,6	14,9
octubre	975,7	30,5
noviembre	151,7	4,7
diciembre	312,9	9,8
	8590,4	268,4

Los mm obtenidos en la lámina bruta a aplicar deben multiplicarse por 16 m², correspondiente con la superficie a mojar, que a su vez se correlaciona con el área a mojar por los emisores de riego por árbol, por lo que los litros por planta van a ser “mayores” que la lámina de riego inicialmente calculada. En este caso obtuvimos un total de 8590 litros por planta a regar, mientras que en los resultados obtenidos por el IVIA, fueron de 8901 l/planta. Así mismo, el tiempo de riego, teniendo el caudal de 4 l/h fue de 268 horas en este ensayo, lo que sería un total de 11 días de riego al año, mientras que en los datos del IVIA este tiempo es de 11 días igualmente.

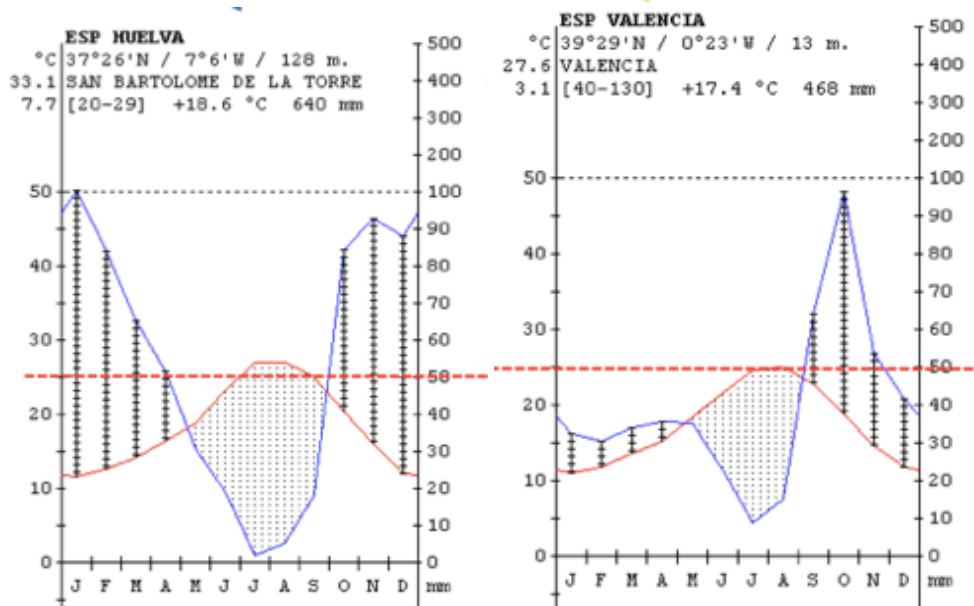


Figura 14. Promedio mensual de la Ta y la pluviometría 1996-2009 (Fuente: Rivas-Martínez, 2009)

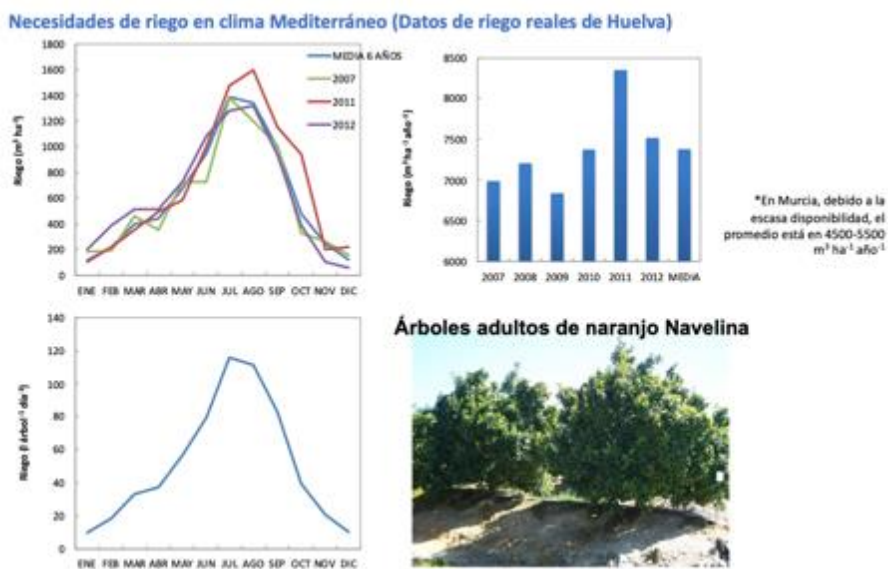


Figura 15. Datos tomados de agricultores de Huelva.

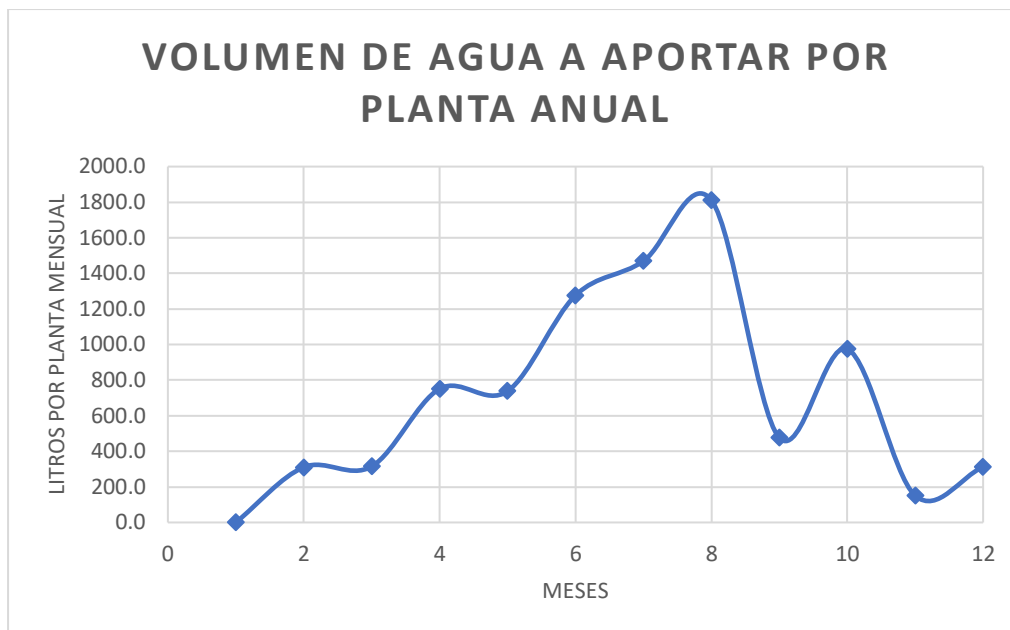


Figura 16. Volumen de agua a aportar en relación con las metodologías de determinación de la retención de humedad.

En las figuras 14, 15 y 16 realizamos dos tipos de comparación. Por una parte, los regímenes de temperatura y pluviometría que en ambos casos tienen similitud. La temperatura promedio en Huelva es de 18,6 grados, mientras que en valencia es de 17,4 grados. A su vez, la pluviometría es mayor en Huelva, registrando una precipitación acumulada promedio anual de 640 mm, mientras que en valencia es de 468 mm aproximadamente, por lo que a priori, nos indica una ETo similar, pero una necesidad de riego diferente, especialmente en los primeros meses (enero, febrero y marzo) en donde se dan altas precipitaciones en Huelva, mientras que en valencia son mas escasas. No obstante, al haber una baja tasa de ETc durante esos meses, la necesidad de riego no se verá tan afectada y por tanto los resultados en ambas provincias no van a diferir la una de la otra.

Por otra parte, en la demanda de agua por parte de los cítricos a lo largo del año, como se puede observar, el pico mas alto se registra sobre el mes de agosto en ambos casos, alcanzando una necesidad de riego de 1800 litros por árbol durante el mes utilizando la tecnología HYPROP 2, es decir, fue de 180 litros en cada riego, mientras que fue de 120 litros por árbol en cada riego en la comunidad de regantes de Huelva, distribuido en diferentes riegos a lo largo del mismo. En teoría debería haber una tendencia en forma de pico a subir desde principios de año, alcanzar su máximo y después bajar con la parada invernal. Sin embargo, en nuestro experimento, se notan algunos picos pequeños, dados principalmente por la distribución de la Pe durante el ultimo año, siendo muy abundante en el mes de noviembre, medianamente abundante en septiembre y poco en octubre, por lo que nos vimos en la necesidad de proporcionar mas riegos para el mes de octubre y por tanto generando este pico. No obstante, la tendencia a lo largo del año no se sale de un sistema real de riego que aplican ahora en Huelva.

5.0 Conclusiones

Los sistemas de determinación de las curvas de retención de humedad son herramientas que ahora se están utilizando mucho e innovando sobre las mismas. Como se ha mencionado en el marco teórico, se ha implementado muchas técnicas para la determinación de ellas, entre las que se destaca el balance hídrico y las placas a presión. No obstante, como se pudo evaluar en este proyecto, el HYPROP 2 es una nueva tecnología que también ha cogido fuerza por su rápido desarrollo y por la precisión de sus resultados. En este proyecto evidenciamos como sí se puede utilizar sin problemas para la determinación de las curvas de retención de humedad y aplicar sus resultados a un sistema de riego real, trabajando principalmente con la capacidad de campo, dado que como se mencionó, el HYPROP 2 puede determinarnos este valor de manera exacta, pero el PMP solo lo estima.

Determinando las curvas de retención de humedad mediante el HYPROP 2, así como con el equipo de presión de las placas Richards, es posible establecer un diseño agronómico de riego eficaz y fidedigno cuyos resultados no se alejan de otros diseños ya implementados por centros de investigación como el IVIA, haciéndolo viable en la praxis, para el desarrollo de modelos de riego en la agricultura.

6.0 Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Almorox-Alonzo, J., Lopez-Bermudez, F.; Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica, métodos de estimación*. (1ª ed.) Murcia: Universidad de Murcia.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54:464-465.
- Day, R.P. (1965). *Pipette method of particle size analysis*. In: *Methods of soil analysis*. Agronomy 9.ASA USA.p. 553-562.
- Doran, J.W., Zeiss, M.R. (2000) *soil health and sustainability, managing the biotic component of soil quality*. *Appl. Soil Eco.* 15, 2-11.
- Er-Raki, S. , J. C. Rodríguez, J. Garatuza-Payán , C. J. Watts, and A. Chehbouni. (2013). *Determination of crop evapotranspiration of table grapes in semi-arid of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index*. *Agric. Water Manage.* 122: 12-19
- Garcia-Coronado, Jorge. (2011). *Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque* [Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Agrícolas]. Universidad Agraria de La Habana. 124 p.
- Greacen, E. L. (ed.), (1981). *Soil Water Assessment by the Neutron Method* CSIRO. Special publication, Melbourne
- Grupo de riegos, agronomía y medio ambiente. (2013). *El uso del agua en la agricultura de regadío y la investigación pública*. Gobierno de España.
- Gurovich, L.A (1985). *Fundamentos y diseños de sistemas de riego*. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, Costa Rica.
- Lal, R., Shukla, M.K. (2004) *Principles of soil physics*. Mrcel Dekker, New York.
- Munn, Rana. (2005) *Genes and salt tolerance: ringing them together*. *New phytologist.* 167 (3): 645-660.
- Núñez, M.; Civit, B.; Muñoz, P. (2010) *Assessing potential desertification environmental impact in life cycle assessment*. 15 (1): 67-78.
- Pascual España, B.; Pascual Seva, N. (2020) *riegos de gravedad y a presión* (4ª ed.) Valencia: editorial Universitat Politècnica de València.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. (2007). *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644
- Peters, A. W. Durner (2008), *Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties*, *Journal of Hydrology*, Volume 356, Issues 1–2. Pages 147-162, ISSN 0022
- Schmutge, T. J., (1985): Remote sensing of soil moisture. In: *Hydrological Forecasting* (M. G. Anderson y T. P. Burt, eds.), John Wiley, Nueva York, págs. 101 - 124. 5. Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical methods*. Second edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

- Shokrana, Md Sami Bin, and Ehsan Ghane. (2020): "*Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2.*" MethodsX 100840
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). *Norma oficial mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.* Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. México, D.F, México.
- Takayanagi, A.; Yabe, K., Tejima, S. (1986). *Experimental studies on the measuring soil moisture tension by the use of the pressure membrane method and the centrifuging method.* Laboratory of utilization of water in agriculture, college of agriculture. Bull. Univ Osaka. Vol 39.
- Tanwar, B.S. (2003). *Saline water management for irrigation.* International commission on irrigation and drainage. New Delhi, India. 140 p.
- Teepe, R., H. Dilling and F. Beese. (2003). *Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density.* Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166(1): 111-119. Doi:10.1002/jpln.200390001.
- USDA-NRCS (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). (1997) *national engineering handbook, part 652 irrigation guide.* USDA, WA, USA.
- USDA; "*Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*". Segunda edición, 1999, págs.: 869.
- Zhang, B., Y. Liu, D. Xu, N. Zhao, B. Lei, R. D. Rosa, P. Paredes, T. A. Paço, and L. S. Pereira. (2013). *The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain.* Irrig. Sci. 31: 1303-1316. doi: 10.1007/s00271-013-0405-1