



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ecosistemas Agroforestales

Digitalización de una parcela experimental para el manejo del riego mediante sensores de bajo coste: elección del número de estaciones de medida y tecnología a utilizar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Sanidad y Producción Vegetal

AUTOR/A: Ramirez Martínez, Sergio

Tutor/a: Pascual Seva, Nuria

Cotutor/a: Moreno Ramón, Héctor

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ecosistemas Agroforestales

Digitalización de una parcela experimental para el manejo del riego mediante sensores de bajo coste: elección del número de estaciones de medida y tecnología a utilizar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Sanidad y Producción Vegetal

AUTOR/A: Ramirez Martínez, Sergio
Tutor/a: Pascual Seva, Nuria
Cotutor/a: Moreno Ramón, Héctor
CURSO ACADÉMICO:2021/2022

Valencia, septiembre de 2022

Título: Digitalización de una parcela experimental para el manejo del riego mediante sensores de bajo coste: elección del número de estaciones de medida y tecnología a utilizar.

Resumen:

La digitalización de la agricultura es una realidad en nuestros días, incluyendo el uso de sensores para el manejo sostenible del riego y la fertilización. Para no encarecer en demasía la instalación de estos sensores, muchas casas comerciales recomiendan la instalación de una sola estación de medida con la que gestionar el riego y la fertilización de toda la parcela. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que en muchos casos el suelo de las parcelas no es lo suficientemente uniforme como para manejar el riego y la fertilización de manera uniforme en toda la parcela. En el presente Trabajo Final de Máster se determinó si el manejo del riego y de la fertilización de una parcela experimental, que incluye una plantación de caqui y una de granado, ubicada en el centro de experiencias Cajamar en Paiporta, puede realizarse de manera única para cada uno de los cultivos o si, por el contrario, debe subdividirse en distintas zonas dependiendo de sus características edáficas. Por ello, se estudió la homogeneidad de la parcela por medio de muestreos en las parcelas (38 muestras totales) realizándose para cada muestra análisis de las propiedades físicas (textura, permeabilidad, densidad aparente, porosidad) y propiedades químicas (pH, CEE, M.O, cationes y aniones...), llegando a la conclusión de que ambas parcelas experimentales son homogéneas.

Además de la homogeneidad del suelo se determinó la tecnología más recomendable para la gestión del riego (sensores de medida del potencial hídrico (tensiómetros) y sensores de capacitancia (sensores FDR)) con la instalación de dos estaciones Meter por parcela (sensores FDR a 25 cm y 50 cm de profundidad) y una estación IKOS por parcela (tensiómetros a 25 cm y 50 cm de profundidad y sensor FDR a 25 cm de profundidad). Obteniéndose mejor respuesta con los sensores de humedad, dado que los tensiómetros proporcionaron lecturas fuera del rango esperable.

Palabras clave: caqui; granado; propiedades físicas y químicas del suelo; curva de retención de humedad; sensores de capacitancia; tensiómetro.

Title: Digitization of an experimental plot for irrigation management using low-cost sensors: choice of the number of measurement stations and technology to be used

Summary:

The digitalization of agriculture is a reality today, including the use of sensors for the sustainable management of irrigation and fertilization. In order to avoid making the installation of these sensors too expensive, many commercial houses recommend the installation of a single measurement station with which managing the irrigation and fertilization of the entire plot. However, experience has shown that in many cases the soil on plots is not uniform enough to handle irrigation and fertilization evenly across the plot. This Master's Final Project aims to determine if the irrigation and fertilization management of an experimental plot, which includes a persimmon plantation and a pomegranate plantation, located in the Cajamar experience center in Paiporta, can be carried out in a unique way for each one of the crops or if, on the contrary, it should be subdivided into different zones depending on its edaphic characteristics. Therefore, the homogeneity of the plot was studied by sampling the plots (38 total samples), analysing for each sample the physical properties (texture, permeability, bulk density, porosity) and chemical properties (pH, ECE, M.O, cations and anions...), reaching the conclusion that both experimental plots are homogeneous.

In addition to the homogeneity of the soil, the most recommended technology for irrigation management (water potential measurement sensors (tensiometers) and capacitance sensors (FDR

sensors)) was determined with the installation of two Meter stations per plot (FDR sensors at 25 cm and 50 cm depth) and one IKOS station per plot (tensiometers at 25 cm and 50 cm depth and FDR sensor at 25 cm depth). A better response was obtained with the moisture sensors, as the tensiometers gave readings outside the expected range.

Keywords: persimmon; pomegranate; physical and chemical properties of the soil; moisture retention curve; capacitance sensors; tensiometers

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. SENSORES DE BAJO COSTE.....	1
1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1.2. MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DE RIEGOS BASADOS EN MEDIDAS EN SUELO 1	
1.1.3. POTENCIAL HÍDRICO	2
1.1.4. TENSÍOMETROS	2
1.1.5. MÉTODOS DIELECTRICOS	2
1.1.6. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD.....	3
1.1.7. EQUIPO DE PLACAS O MEMBRANAS A PRESIÓN.....	3
1.1.8. HYPROP	3
1.2. SUELO.....	3
1.2.1. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE SUELO	4
1.2.2. FERTILIDAD DEL SUELO.....	5
1.2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	5
1.2.3.1. TEXTURA	5
1.2.3.2. POROSIDAD.....	5
1.2.3.3. DENSIDAD APARENTE.....	5
1.2.4. PROPIEDADES QUÍMICAS	6
1.2.4.1. MATERIA ORGÁNICA.....	6
1.2.4.2. PH.....	6
1.2.4.3. NITRÓGENO.....	6
1.2.4.4. POTASIO	6
1.2.4.5. CALCIO, MAGNESIO Y AZUFRE.....	6
1.2.4.6. CARBONATOS.....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	7
1.4. CULTIVO DEL CAQUI.....	7
1.5. CULTIVO DEL GRANADO.....	9
2. OBJETIVOS	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. LOCALIZACIÓN	10
3.2. TOMA DE MUESTRAS DE SUELO	11
3.3. ANÁLISIS DE SUELO	11
3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS	11
3.3.2. PROPIEDADES QUÍMICAS	12

3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
3.5.	EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y POTENCIAL	15
3.6.	CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD	16
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	17
4.1.1.	TEXTURA	17
4.1.2.	POROSIDAD	18
4.1.3.	DENSIDAD APARENTE.....	19
4.1.4.	PERMEABILIDAD	20
4.1.5.	CARBONATOS.....	20
4.1.6.	pH.....	21
4.1.7.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EXTRACTO SATURADO (CEe)	22
4.1.8.	MATERIA ORGÁNICA.....	22
4.1.9.	NITROGENO TOTAL KHJELDAL (NTK)	23
4.1.10.	POTASIO	24
4.1.11.	CATIONES DE CAMBIO.....	25
4.1.12.	CLORURO.....	27
4.1.13.	SULFATOS.....	28
4.2.	HOMOGENEIDAD DE LA PARCELA	29
4.3.	RECOMENDACIÓN DE TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO PARA EL MANEJO DEL RIEGO	29
4.3.1.	RESULTADOS CAPACIDAD DE CAMPO	29
4.3.1.1.	SENSORES DE BAJO COSTE.....	29
4.3.1.3.	HYPROP	32
4.3.2.	COMPARACIÓN SENSORES DE BAJO COSTE	33
5.	CONCLUSIONES	36
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	37

INDICE ANEXOS

Anexo I: Valores de referencia utilizados en el análisis de suelo

Anexo II: Placas de presión

Anexo III: HYPROP

INDICE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de las parcelas en centro de experiencias Cajamar en Paiporta.....	10
Figura 2: Distribución de las muestras de suelo.....	11
Figura 3 Porcentajes de las texturas obtenidas en las muestras de suelo.	18
Figura 4 Triangulo de texturas	18
Figura 5 Valores medios de porosidad en las parcelas de caqui y granado.	19
Figura 6 Valores medios de densidad aparente en las parcelas de caqui y granado.....	19
Figura 7 Valores medios del porcentaje de carbonatos en la parcela de caqui y granado.....	21
Figura 8 Valores medios de pH en la parcela de caqui y granado	21
Figura 9 Valores medios de Materia orgánica en la parcela de caqui y granado	23
Figura 10 Valores medios de NTK en la parcela de caqui y granado	24
Figura 11 Valores medios de potasio en la parcela de caqui y granado.....	24
Figura 12 Valores medios de calcio en la parcela de caqui y granado.....	25
Figura 13 Valores medios de magnesio en la parcela de caqui y granado	26
Figura 14 Valores medios de sodio en la parcela de caqui y granado.....	27
Figura 15 Valores medios de cloruro en la parcela de caqui y granado.....	28
Figura 16 Valores medios de sulfatos en la parcela de caqui y granado.....	28
Figura 17 Curva de retención de humedad media en la parcela de caqui	31
Figura 18 Curva de retención de humedad media en la parcela de granado	32
Figura 19 Evolución de la humedad volumétrica en los sensores instalados en la parcela de caqui	30
Figura 20 Evolución de la humedad volumétrica en los sensores instalados en la parcela de granado.....	30
Figura 21 Evolución de la humedad volumétrica respecto a la CC en los sensores instalados en la parcela de caqui.....	33
Figura 22 Valores de humedad y tensión empresa IKOS Caqui.....	34
Figura 23 Evolución de la humedad volumétrica respecto a la CC en los sensores instalados en la parcela de granado.....	34
Figura 24 Valores de humedad y tensión empresa IKOS Granado.....	35
Figura 25 Contenido de humedad Suelo dado por la empresa ``Agrosensor`` en Granado	35

INDICE TABLAS

Tabla 1 Coeficiente de variación (CV) de la porosidad en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	18
Tabla 2 Coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm	20
Tabla 3 Coeficiente de variación (CV) de la permeabilidad en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	20
Tabla 4 Coeficiente de variación (CV) de los carbonatos en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	20
Tabla 5 Coeficiente de variación (CV) del pH del suelo en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	21
Tabla 6 Coeficiente de variación (CV) de la C _{Ee} en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	22
Tabla 7 Coeficiente de variación (CV) de la materia orgánica en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	23
Tabla 8 Coeficiente de variación (CV) de NTK en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	23
Tabla 9 Coeficiente de variación (CV) del potasio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	24
Tabla 10 Coeficiente de variación (CV) del calcio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	25
Tabla 11 Coeficiente de variación (CV) del magnesio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	26
Tabla 12 Coeficiente de variación (CV) del sodio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	27
Tabla 14 Coeficiente de variación (CV) de cloruro en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	27
Tabla 15 Coeficiente de variación (CV) de sulfatos en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.....	28
Tabla 16 Coeficiente de variación (CV) de las presiones realizadas en las placas a presión en los cultivos de caqui y granado a la profundidad de 25 cm	31
Tabla 17 Cuadro resumen CC a la profundidad de 25 cm en las parcelas de caqui y granado...	32
Tabla 18 Cuadro resumen CC a la profundidad de 50 cm en las parcelas de caqui y granado...	32

1. INTRODUCCIÓN

1.1. SENSORES DE BAJO COSTE

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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 y en los procesos de evapotranspiración, convirtiéndose en cualquier caso en agua no reutilizable. El riego es el principal factor de producción en zonas de clima mediterráneo, donde las precipitaciones son variables y escasas y el riesgo de sequía puede tener consecuencias graves en la renta agraria. En España, por su clima árido, se dedica un 65.23% del agua disponible para regadío en comparación con la media europea la cual dedica un 69% del agua disponible (Aquastat, 2018). En estas zonas áridas el agua es un recurso limitado y es el principal factor limitante de la producción agraria. En la situación actual de cambio climático y concienciación del valor del agua como bien escaso, es necesario realizar un buen manejo del riego. Además, hay que tener en cuenta que un manejo del riego inadecuado causa pérdidas económicas y problemas medioambientales. Un exceso de riego causa lavados de fertilizantes, además de suponer un gasto elevado por la energía necesaria para bombearla. El lavado de fertilizantes puede causar la contaminación de los acuíferos, así como su salinización. Por lo tanto, un correcto manejo del riego es una herramienta esencial para mejorar la productividad, reducir costes y riesgos de contaminación.

Existen varias metodologías para realizar la programación del riego, las cuales se diferencian por la fuente de información que utilizan (Pascual y Pascual-Seva, 2020). Estas metodologías son:

- Métodos de programación de riegos basados en medidas en el suelo
- Métodos de programación de riegos basados en medidas en la planta
- Métodos de programación de riegos basados en el balance hídrico

Este trabajo se centrará en el estudio comparativo de varios métodos de programación de riegos basados en medidas en el suelo.

1.1.2. MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DE RIEGOS BASADOS EN MEDIDAS EN SUELO

Como se ha comentado anteriormente, uno de los mayores problemas del sector agrícola en el mediterráneo español es la disponibilidad del agua de riego. Por lo tanto, el agua disponible se deberá de utilizar de forma más eficiente y racional. Esta necesidad ha motivado al desarrollo de nuevas tecnologías que han permitido incrementar la disponibilidad de agua, propiciando su mejor aprovechamiento (Navarro Caballero, 2010).

Los métodos basados en el conocimiento del estado hídrico del suelo permiten establecer una tendencia de riego fijando unos niveles máximos y mínimos en función del contenido de agua en el suelo. El objetivo de cada riego es alcanzar un volumen de agua que sea fácilmente asimilable para las raíces. Se aplica un nuevo riego cuando los niveles de humedad del suelo llegan a valores que permitan un agotamiento hídrico que no comprometa la productividad del cultivo (Romero et al., 2006; Ruiz Sánchez, et al., 2010). La medida del contenido hídrico del suelo puede realizarse directa o indirectamente. El contenido hídrico del suelo se mide directamente mediante el método gravimétrico, mientras que en la actualidad la medición indirecta se realiza principalmente mediante la sonda de neutrones, la reflectometría en el dominio del tiempo (Time domain reflectometry, TDR), la reflectometría en el dominio de la frecuencia (Frequency domain reflectometry, FDR) y mediante la reflectometría en el dominio de la amplitud (Amplitude

domain reflectometry, ADR) de más reciente incorporación (Pascual y Pascual-Seva, 2020). De entre estas tecnologías se desarrollará la FDR, al ser la aplicada en este estudio.

Por otra parte, la disponibilidad real del agua en el suelo para las plantas depende del potencial hídrico.

1.1.3. POTENCIAL HÍDRICO

Además de conocer el contenido de humedad en el suelo, también es importante conocer la energía con que esa agua es retenida. El agua del suelo está sometida a la acción de una serie de factores que tienden a retenerla o a expulsarla. 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 Kilopascal (kPa)], trabajo dividido por masa o trabajo dividido por peso (Pascual y Pascual-Seva, 2020). El potencial hídrico del suelo tiene 4 componentes: potencial de presión (ψ_p), matricial (ψ_m), gravitacional (ψ_g) y osmótico (ψ_o).

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

Para determinar el potencial hídrico o alguno de sus componentes se utilizan distintos equipos, destacando los tensiómetros (miden la suma de ψ_m y ψ_g) y los sensores de matriz granular (bloques de yeso; miden la suma de ψ_m y ψ_o). A continuación, se desarrollará el primero al ser utilizado en el estudio.

1.1.4. TENSIÓMETROS

Los tensiómetros miden el potencial o tensión matricial del suelo. Esta es una medida indirecta de la humedad del suelo y es originado por las fuerzas que retienen el agua en los capilares y sobre las partículas del suelo. La unidad de potencial matricial más usual es el kPa. Cuando el suelo se seca se produce un incremento de la tensión matricial (la lectura del tensiómetro sube), mientras que cuando se humedece se produce un descenso (la lectura del tensiómetro baja), pudiéndose alcanzar valores cercanos a cero cuando el suelo se satura de agua. Un tensiómetro consiste en un tubo que termina en una punta de cerámica porosa (cápsula cerámica) (Baeza et al., 2020). El tubo se llena completamente de agua y se cierra herméticamente por la parte superior. Durante la instalación la cápsula cerámica se introduce en el suelo quedando completamente rodeada por las partículas del suelo y el espacio poroso. La cerámica comunica el agua del interior con la solución del suelo.

1.1.5. MÉTODOS DIELECTRICOS

Las sondas TDR y FDR miden la constante dieléctrica del medio, la cual es una propiedad intrínseca de éste. Esta tecnología se basa en la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio (ϵ), a través de capacitores y osciladores de frecuencia variable (Ferré y Topp, 2002). El sistema FDR calcula la humedad de un suelo mediante la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias conocida como capacitancia (Sentek Pty, 1999).

El equipo TDR consiste en dos o tres varillas de acero inoxidable paralelas que se insertan en el suelo. Mide la constante dieléctrica a partir del tiempo de recorrido de un impulso electromagnético introducido en el suelo a través de las varillas. La constante dieléctrica depende de la humedad (θ) del suelo, por lo que el equipo proporciona la θ del mismo (Pascual y Pascual-Seva, 2020).

El equipo FDR utiliza 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 pase a través del suelo están relacionados con la constante dieléctrica del suelo, que a su vez está relacionada con la Θ del suelo (a mayor frecuencia, mayor Θ) (Pascual y Pascual, 2020).

La principal ventaja de esta tecnología es la sencillez de su operación, muy bajo mantenimiento y facilidad en la manipulación de datos. Este método de medición del contenido de humedad se instala 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.

1.1.6. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

De la simple observación de las condiciones naturales, se desprende el papel del suelo como regulador de la 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 de reflejar la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión (Teepe *et al.*, 2003). Para conocer la capacidad del suelo como depósito, así como el intervalo entre riegos se necesita conocer previamente su espesor y textura, junto con la velocidad de agotamiento y en su caso, la salinidad del suelo y del agua de riego (Pascual y Pascual-Seva, 2020). Como máximo, las plantas pueden hacer uso de la humedad comprendida entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento (PM), denominada agua útil o disponible (AU/AD).

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, de ahí la importancia de realizar un correcto análisis de suelo y un estudio de la parcela en la que se establece una plantación.

1.1.7. EQUIPO DE PLACAS O MEMBRANAS A PRESIÓN

Conocidas también como placas Richards, consta de uno/dos recipientes con membrana porosa, en la que se coloca las muestras de suelo alteradas previamente saturadas. El agua retenida en el suelo al aplicar una determinada succión está en equilibrio con la tensión mátrica (ψ_m), por lo que se puede determinar la curva $\psi_m - \Theta$ tras determinarse la humedad (Θ) por gravimetría (Pascual y Pascual, 2020).

1.1.8. HYPROP

El sistema HYPROP permite obtener la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica no saturada, en muestras inalteradas de suelo; compuesto por dos mini tensiómetros de distinta longitud y una balanza de precisión. El ensayo se inicia en el momento que a muestra de suelo está saturada y empieza a perder vapor de agua por evaporación. Durante este proceso los mini tensiómetros miden cómo la succión del suelo varía con la evaporación, mientras que la báscula de precisión mide la variación de peso (Pascual y Pascual -Seva, 2020).

1.2. SUELO

El término "suelo" proviene del latín *solum* que significa base o fondo y ha sido definido de diferentes maneras; el geólogo define el suelo como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos (Chiossi, 1975). El agrónomo, define el suelo como la delgada parte superior del manto de rocas en que penetran las raíces de las plantas y de donde éstas toman el agua y las demás sustancias para su existencia. Algunos

ingenieros civiles definen el suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes (Rico y Del Castillo, 2001).

Todas estas definiciones tienen muchos puntos en común, pero la definición que más interesa es la definición del edafólogo, el cual considera el suelo como medio de cultivo y lo define como una mezcla de materiales minerales y orgánicos, agua y aire, capaz de soportar la vida vegetal (Thompson y Troeh, 1998).

El suelo proviene de la meteorización física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre él (Arias, 2001), este cubre la mayor parte de la superficie terrestre y su espesor puede variar de entre unos pocos centímetros a 2 o 3 metros, siendo insignificante comparada con la masa de la Tierra. Sin embargo, en esos pocos centímetros de suelo, los reinos vegetales y animales se encuentran con el mundo mineral y establecen con él una relación dinámica (Thompson y Troeh, 1998).

El suelo es un cuerpo natural tridimensional, que forma parte de un ecosistema y que está en equilibrio con el medio ambiente. Por ello, su estudio debe iniciarse en el campo, observando de forma detallada y precisa, tanto el suelo en su conjunto, como el medio en el que se encuentra (Moreno et al., 2000). En general, el suelo pasa de forma gradual en su límite inferior a roca dura o materiales saprofíticos (Porta et al., 2003).

Con frecuencia se considera que el suelo es un sistema abierto y dinámico, constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está formada por los componentes inorgánicos (minerales) y orgánicos (materia orgánica) del suelo. Estas partículas sólidas dejan entre sí, una serie de huecos/espacios (poros, cámaras, galerías, grietas y otros), donde se hallan las fases líquida y gaseosa. La fase líquida del suelo está constituida principalmente por agua, que puede llevar en su seno sustancias disueltas o en suspensión y la fase gaseosa está formada por aire, constituyendo la atmósfera del suelo. Asimismo, en el suelo se pueden encontrar raíces y microorganismos que ocupan estos huecos (Moreno et al., 2000; Porta et al., 2003).

Las interacciones entre las fases sólida y líquida adquieren especial relevancia al existir en la fase sólida partículas cargadas eléctricamente y de elevada superficie específica. Los procesos de adsorción e intercambio iónico son fundamentales para la actuación del suelo como depurador natural, para la vida en el suelo y en concreto para la nutrición de las plantas. Las fases líquida y gaseosa se hallan en constante cambio, tanto en cantidad como en composición. La lluvia, el riego y las filtraciones incorporan agua al sistema, la evapotranspiración constituye la principal vía de salida en condiciones en las que no haya pérdidas por percolación. El aporte de agua diluye el contenido iónico de la fase líquida y la evapotranspiración concentra la solución del suelo. La presencia de sales solubles en el agua del suelo puede llegar a ser perjudicial para las plantas, al impedir que éstas puedan absorber el agua o por el efecto tóxico de algún ion (Porta et al., 2003).

1.2.1. IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE SUELO

El análisis de suelos es una herramienta fundamental para evaluar la fertilidad del suelo, estudiar la homogeneidad de la parcela agraria, su capacidad productiva y además es la base para definir la dosis de nutrientes a aplicar. Algunas de las principales contribuciones de los análisis de suelos al manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos:

- Determinación de la disponibilidad de los nutrientes en el suelo.
- Definición de la dosis de fertilizantes a aplicar en la fertilización.
- Estimación de la dosis de enmienda, en el caso de que sea necesario realizar una corrección del suelo (ej. Aplicación de estiércol en suelo con niveles de materia orgánica bajos, aplicación de yeso en suelos sódicos, aplicación de calcita o dolomita en suelos ácidos o acidificados).

- Monitoreo de variables de fertilidad (ej. salinidad-sodicidad, mapeo de nutrientes para manejo sitio-específico, etc.).
- Determinación de la homogeneidad de las muestras de suelo estudiadas

1.2.2. FERTILIDAD DEL SUELO

La fertilidad de un suelo se define como el potencial que tiene este para suplir los elementos nutritivos en las formas, cantidades y proporciones requeridas para lograr un buen crecimiento y rendimiento de las plantas. Esa disponibilidad de elementos nutritivos por el sistema radical puede ser inmediata, constituyendo la fertilidad activa y representada en forma soluble de fácil absorción por las raíces. Otros elementos que no son de inmediata utilización por las plantas, como los que forman parte de los minerales primarios y secundarios y algunas combinaciones orgánicas, representan la fertilidad potencial de un suelo, y la producción de los cultivos depende en muchos casos de la transformación de las formas potenciales a las formas activas (Casanova, 2005).

La productividad del suelo es su capacidad para producir cultivos. Para que el suelo sea productivo es necesario que sea fértil. Sin embargo, un suelo fértil no es necesariamente productivo. Un suelo es fértil si contiene y suministra a las raíces cantidades necesarias adecuadas de nutrientes, agua y aire para que el cultivo crezca y produzca bien. Un suelo fértil tiene una estructura y profundidad adecuadas para proporcionar un ambiente favorable al desarrollo de las plantas (Graetz, 1992).

1.2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

1.2.3.1. TEXTURA

La textura del suelo se refiere al porcentaje en peso de cada una de las tres fracciones minerales, arena, limo y arcilla (Thompson y Troeh, 1988). La textura es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades (FAO, 2022).

1.2.3.2. POROSIDAD

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macroporos no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas (FAO, 2022).

1.2.3.3. DENSIDAD APARENTE

Densidad aparente se define como el peso del suelo para un volumen determinado. Es un parámetro utilizado para medir compactación. En general, cuanto mayor es la densidad aparente, menor es el espacio poroso para el movimiento del agua, crecimiento y penetración de raíces, y el desarrollo de las plántulas (USDA, 1999)

Mediante la determinación de la densidad se puede obtener la porosidad total del suelo. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenor elevado de partículas granulares como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas (FAO, 2022).

1.2.4. PROPIEDADES QUÍMICAS

1.2.4.1. MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica está formada de materiales frescos, plantas parciales y completamente descompuestas, microorganismos y humus. El humus se encuentra constituido por sustancias resultantes de la alteración (desnaturalización, desorganización y cambios en la funcionalidad) de productos sintetizados por las plantas y los microorganismos. Con uniones débiles con la fracción acción mineral. De esta manera existen materias orgánicas heredadas, es decir, biomacromoléculas que son sustancias no húmicas con características químicas reconocibles, y materias orgánicas humificadas que son sustancias húmicas o humus en sentido estricto y se refieren a materiales transformados que han perdido las características químicas de sus precursores (Porta et al., 2003).

1.2.4.2. PH

El pH de un suelo se define como la concentración de iones de hidrógeno que posee la solución de un suelo, determinando la acidez o alcalinidad de este. Cuando la concentración de H^+ es alta en la solución se dice que es ácida, cuando es baja se dice que es básica o alcalina.

Uno de los efectos más importantes del pH de los suelos está relacionado con la nutrición mineral de las plantas. La absorción de elementos nutritivos esenciales para el normal crecimiento y producción de las plantas se ve afectada a valores extremos de pH en suelos ácidos y en suelos alcalinos (Casanova, 2005).

1.2.4.3. NITRÓGENO

El nitrógeno del suelo en condiciones naturales no proviene de la degradación de la roca madre, deriva del que existe en la atmósfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación. Este elemento puede ser generalmente clasificado como inorgánico y orgánico, siendo esta última forma la predominante en el suelo. El N presente en suelos cultivables procede de materiales diversos: restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales y nitratos aportados por lluvias, así como por la fijación del nitrógeno atmosférico realizada por ciertos microorganismos (Navarro, 2013).

1.2.4.4. POTASIO

El potasio presente en los suelos aparece por meteorización de las rocas que contienen minerales potásicos. Junto a este potasio mineral hay que incluir también el procedente de la descomposición de restos vegetales y animales. El K se halla en la mayoría de los suelos en cantidades relativamente grandes. Su contenido como K_2O varía de 0.5 a 3% y depende de la textura del suelo. La fracción arcillosa es la que presenta un contenido mayor, por lo que los suelos arcillosos y limo-arcillosos son más ricos que los limo-arenosos y arenosos. (Navarro, 2013).

1.2.4.5. CALCIO, MAGNESIO Y AZUFRE

En la nutrición vegetal, el calcio magnesio y azufre desempeñan el papel de macronutrientes. Son elementos abundantes y, en general, su provisión en el suelo es suficiente para cubrir las necesidades de las plantas. Por ello, no se piensa en ellos como fertilizantes y sí como mejoradores de las propiedades del suelo, niveles altos de calcio en un suelo salino desplazan en el complejo de cambio al ion sodio, reduciendo la salinidad del suelo. (Thompson y Troeh, 1982).

1.2.4.6. CARBONATOS

La determinación de los carbonatos totales en un suelo tiene interés por su valor diagnóstico de diversas propiedades del suelo (estructura, actividad biológica, bloqueo de nutrientes, etc.). Los carbonatos tienen una acción positiva sobre la estructura del suelo y sobre la actividad microbiana, aunque un exceso de carbonatos puede ocasionar problemas en la nutrición de las plantas por antagonismo con otros elementos. Excesos de carbonatos provocan formas insolubles de Fe, Zn Mn, Cu; dando lugar a carencias.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La agricultura de precisión es una estrategia de gestión cuyo objetivo principal es mejorar la eficiencia del uso de los recursos en la producción agrícola. Así, factores como la rentabilidad e incluso la calidad pueden aumentarse al tiempo que se garantiza la sostenibilidad. Si tenemos en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas y en especial el objetivo 6 "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos" esta agricultura de precisión es imprescindible para su cumplimiento.

Para no encarecer en demasía la instalación de estos sensores, muchas casas comerciales recomiendan la instalación de una sola estación de medida con la que gestionar el riego y la fertilización de toda la parcela. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que en muchos casos el suelo de las parcelas no es lo suficientemente uniforme como para manejar el riego con un solo sensor.

En este sentido, el presente Trabajo Final de Máster pretende determinar si el manejo del riego y de la fertilización de una parcela experimental, que incluye una plantación de caqui y una de granado, puede realizarse de manera única para cada uno de los cultivos o si, por el contrario, debe subdividirse en distintas zonas dependiendo de sus características edáficas.

1.4. CULTIVO DEL CAQUI

El caqui es una planta leñosa perteneciente a la familia botánica *Ebenáceas*, género *Diospyros*. Su origen está en China, aunque este género está adaptado tanto a zonas tropicales, subtropicales, como templadas. Las variedades de caqui actualmente cultivadas en España pertenecen al género *Diospyros kaki* L. F. En Europa está localizado principalmente en la cuenca mediterránea, donde ha sido tradicionalmente un cultivo menor (IVIA, 2022). Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, para el año 2021, el cultivo del caqui en la Comunidad valenciana se ha materializado en 14752 ha, 888 ha menos que en el año 2020, en el que la superficie dedicada a este frutal era de 15640 ha (MAPA, 2022).

BOTÁNICA DEL CAQUI

El caqui es un árbol caducifolio, vigoroso, con madera de color grisáceo. Las hojas son grandes y gruesas, ovaladas, de peciolo corto y color verde oscuro brillante. Los brotes se originan de las yemas que han pasado el invierno en reposo vegetativo. Las flores se localizan en las axilas de las hojas, en la base del pedúnculo, a partir de la 2ª o 3ª hoja de la brotación del año, de color blanco cremoso. En cada árbol puede haber flores masculinas, femeninas y hermafroditas. Las variedades más cultivadas solo tienen flores femeninas, por atrofia de los estambres, por lo que se producen frutos partenocárpicos sin semillas. La brotación ocurre en la primera mitad de marzo (Mataix, 2015).

IMPORTANCIA ECONÓMICA

El caqui es un cultivo tradicional en la Comunidad Valenciana, cultivado hasta hace pocos años como árboles aislados para autoconsumo y comercializados en el ámbito local. A mediados del siglo XX aparece una nueva variedad de caqui autóctona en la Ribera del Xúquer (València), la variedad 'Rojo Brillante', que supuso la extensión del cultivo, particularmente, con la introducción de las técnicas de eliminación de la astringencia, lo que ha permitido el consumo del fruto duro ``persimon`` aumentando así su vida comercial e incrementando su demanda (Kakifruit, sf).

El éxito del caqui en la comunidad valenciana años atrás se vio incrementado como consecuencia del declive de la citricultura; una respuesta de muchos citricultores a la caída de la rentabilidad de sus cítricos tradicionales. Aunque actualmente, debido al exceso de oferta, los bajos precios y el aumento de los costes de producción, la rentabilidad de las explotaciones de caqui ha bajado considerablemente, trayendo consigo una bajada en la superficie cultivada (Vendrell, 2017).

VARIEDADES

Las variedades de caqui se dividen desde el punto de vista comercial en astringentes (Rojo Brillante, Triumph, etc.) y no astringentes (Fuyu, Jiro, etc.). La astringencia está ligada al contenido y forma de los taninos (Hernández Aranda, 1999). En las variedades astringentes los taninos van disminuyendo a medida que el fruto va madurando, pero en este punto disminuyen sus posibilidades de comercialización al hacerse muy blando, por lo que es conveniente realizar un tratamiento postcosecha para insolubilizar los taninos y comercializarlo como caqui duro (tipo Persimon) y aumentar su rentabilidad. En las variedades no astringentes, los frutos pueden consumirse duros sin alcanzar la madurez fisiológica y no necesitan este tratamiento (Malagón y Fernández-Zamudio, 2018). Como ya se ha comentado, en la Comunidad Valenciana se cultiva mayoritariamente la Rojo Brillante.

EXIGENCIAS CLIMÁTICAS

El área de cultivo del caqui es muy extensa, a pesar de estar adscrito al grupo de los frutales tropicales su adaptabilidad es mayor que la de los cítricos, llegando a producir bien en las zonas templadas de clima mediterráneo, en toda el área de cultivo del melocotonero, hasta una latitud de unos 40° (Agustí, 2004). Al ser un frutal de hoja caduca tiene unas necesidades mínimas de horas frío (HF); así denominadas porque la temperatura es igual o inferior a 7,2 °C. Las necesidades de horas frío de los cultivares o variedades no astringente es menor que las de los astringentes. El frío invernal insuficiente provoca el retraso en la caída de la hoja y, en la primavera siguiente, una falta de uniformidad en la brotación y un deficiente cuajado de los frutos, lo que repercutirá en una disminución de la futura cosecha (Malagón y Fernández-Zamudio, 2018).

EXIGENCIAS EDÁFICAS

Hay una amplia gama de terrenos donde puede cultivarse el caqui. Esta especie prefiere los suelos francos, o franco-arcillosas, profundos, bien drenados y los que tienen buen nivel de materia orgánica. El pH del suelo ideal es de 6,5 a 7. En los suelos de aluvión y en los de ribera de río, los árboles alcanzan su desarrollo más vigoroso al ser terrenos más sueltos. La salinidad del suelo y la elevada concentración de cloruros en el suelo o en el agua de riego ocasionan toxicidad en las hojas cuando la conductividad eléctrica (CE) supera 1 dS/m y la concentración de cloruros supera los 100 mg/l; así, los bordes de las hojas se necrosan y en los casos graves se llega hasta la caída de frutos (Malagón y Fernández-Zamudio, 2018).

1.5. CULTIVO DEL GRANADO

El granado es un frutal cuyo centro de origen se encuentra en Oriente Próximo (Centro IV de Vavilov). Desde aquí se difundió a diferentes zonas donde se cultiva y en las que existe gran diversidad genética como consecuencia de su propagación por semillas, que son difundidas por el hombre, por las aves y otros animales, germinando con gran facilidad (Melgarejo, 2010)

Actualmente, el granado se cultiva en toda la cuenca mediterránea, Arabia, Irán, Afganistán y EEUU (California). En España se cultivan alrededor de 2900 ha, de las que el 90 % se encuentran en las provincias de Alicante y Murcia (Agustí, 2010).

Diversos trabajos científicos han descubierto ciertos compuestos que pueden ser beneficiosos para la salud. Estos efectos beneficiosos para la salud se atribuyen a su alto contenido en compuestos bioactivos, como los polifenoles y antocianos por su gran capacidad antioxidante (Serrano, 2010). Este conocimiento ha repercutido en un aumento del consumo de la granada por parte del consumidor, y a la creación de nuevos productos derivados para satisfacer esta demanda (López y Moreno, 2015)

BOTÁNICA DEL GRANADO

El granado, *Punica granatum* L., es una planta dicotiledónea perteneciente al Orden *Mirtales*, familia *Punicaceae*.

Es un arbusto caducifolio que alcanza hasta 6 m de altura. Su raíz es superficial, nudosa, fuerte, de color rojizo y alcanza gran desarrollo. Durante su período juvenil tiende a desarrollar números tallos, que, según el área de cultivo, son eliminados hasta dejar uno o varios troncos. Las yemas del granado son de tipo determinado, vegetativas o mixtas. Las hojas son opuestas, enteras lisas, sin estípula. Las flores, solitarias o en grupos de hasta siete, se sitúan en los ramos mixtos, en posición axilar. El fruto denominado *balausta*, es una baya globosa coronada por el cáliz, carnoso y persistente (Melgarejo y Martínez-Valero, 1992).

VARIEDADES

La diversidad genética del granado es muy variada y amplia debida a su gran dispersión geográfica favorecida por el hecho de que las semillas presentan una gran facilidad de germinación y pueden ser propagadas ampliamente por aves u otros animales (López y Moreno, 2015).

En España se distinguen tradicionalmente dos grandes grupos varietales de interés comercial: Valenciana y Mollar. El grupo Mollar es el más importante, constituido por un gran número de individuos, que se caracterizan por su gran productividad. El grupo Valenciana, constituido por un gran número de individuos, se caracteriza por ser de recolección temprana (Melgarejo, 2010)

EXIGENCIAS CLIMÁTICAS

El clima más adecuado para el granado es el clima subtropical y tropical ya que la época de maduración de las granadas ocurre con las altas temperaturas. Es sensible a heladas tardías una vez ya en vegetación, pero puede resistir temperaturas inferiores a -7°C. En época de recolección del fruto, este es muy sensible a la lluvia y a la alta humedad, estas condiciones producen un rajado en el fruto (López y Moreno, 2015).

No es muy exigente en agua; resiste bien a la sequía, persistiendo su desarrollo en áreas con lluvias no superiores a los 200 mm/año, aunque para vegetar adecuadamente y producir frutos de calidad es necesario una pluviometría anual de 500-700 mm/año. (Melgarejo y Salazar, 2003).

EXIGENCIAS EDÁFICAS

El granado se adapta a un amplio rango de tipos de suelo, aunque su mejor desarrollo se da en suelos profundos, frescos y ligeramente arcillosos, tolerando los drenajes deficientes. Además, se

adapta bien a suelos con elevados contenidos en caliza activa. Su resistencia a la sequía, asfixia radical y clorosis férrica, así como a las bajas temperaturas invernales, hace que esta especie se pueda cultivar en terrenos marginales en los que es difícil adaptar las especies frutales tradicionales. Asimismo, es resistente a salinidad, tolerando aguas de 5 dS/m sin efectos negativos (Melgarejo y Martínez-Valero, 1992).

2. OBJETIVOS

- El presente Trabajo Final de Máster (TFM) tienen como objetivo principal determinar si el manejo del riego y de la fertilización de una parcela experimental, que incluye una plantación de caqui y una de granado, puede realizarse de manera única para cada uno de los cultivos o si, por el contrario, debe subdividirse en distintas zonas dependiendo de sus características edáficas. Para ello, como objetivos secundarios se pretende analizar las propiedades físicas y químicas de muestras obtenidas en distintos puntos de la parcela y con ellas, determinar la homogeneidad del suelo.
- El segundo objetivo principal del Trabajo Final de Máster es determinar la tecnología más recomendable para el manejo del riego, para lo cual se comparan los resultados obtenidos de los sensores de medida de potencial hídrico del suelo (tensiómetros) y de los sensores de medición de la constante dieléctrica (sondas FDR).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN

Los análisis de suelo realizados en este TFM se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universitat Politècnica de València en los laboratorios del Departamento de Producción Vegetal (39°28'59.7"N 0°20'36.0"W), donde se realizó el análisis de las muestras de suelo recogidas en centro de experiencias Cajamar en Paiporta (39°25'02.0"N 0°25'04.1"W), donde se realizó la toma de muestras de suelo y la instalación de los sensores de bajo coste.



Figura 1: Ubicación de las parcelas en centro de experiencias Cajamar en Paiporta.

3.2. TOMA DE MUESTRAS DE SUELO

La toma de muestras se realizó el 17 de enero de 2022, en 38 puntos diferentes de las parcelas de caqui y granado, 22 puntos de muestreo en granado y 16 puntos de muestreo en caqui, 34 muestras se realizaron a la profundidad de 25 cm y 4 muestras se realizaron a la profundidad de 50 cm. La distribución de las muestras en las parcelas de estudio se muestra en la Figura 2. La extracción se realizó con una barrena de suelo. El punto de muestreo elegido fue debajo del emisor de riego en aquellas muestras donde se iban a instalar el sensor de riego y en las que no se iba a instalar el sensor de riego la muestra se realizó en el centro de la meseta. Las muestras inalteradas de suelo fueron un total de 10 muestras, se realizaron con barrena de la marca Soil sampling ring kit - modelo C53 y con anillos de muestreo de 100 ml usadas para la permeabilidad del suelo y anillos de 250 cm³ para el sistema HYPROP, cogidos directamente sin barrena.

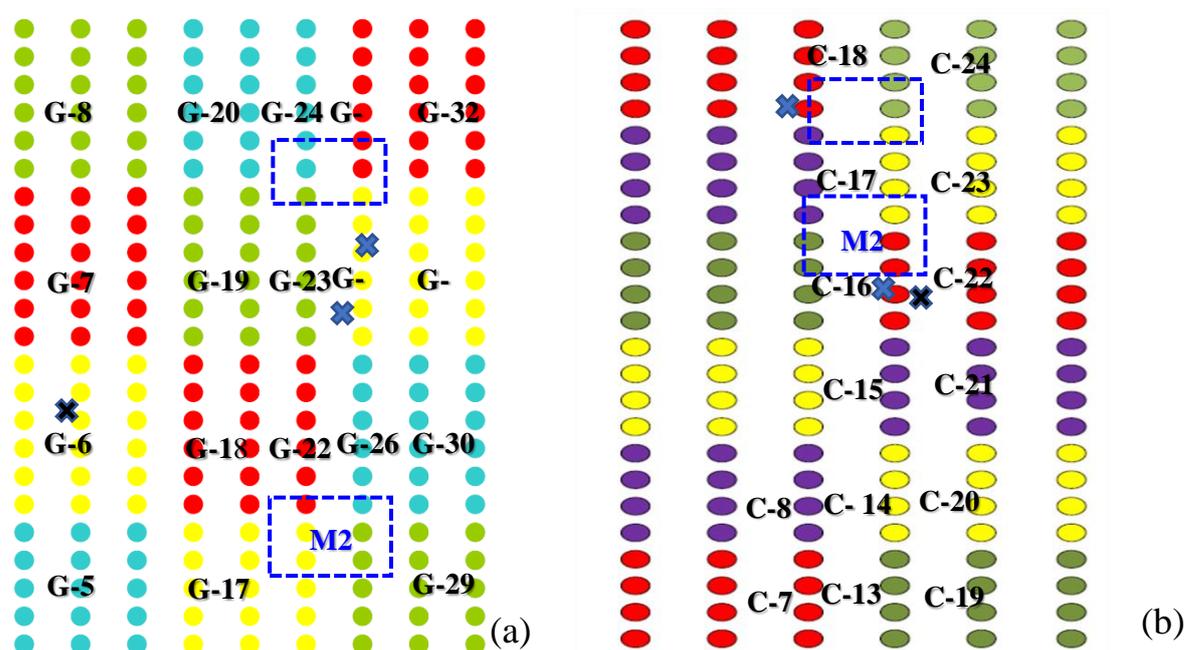


Figura 2: Distribución de las muestras de suelo, Módulos dataloger (M1 Y M2) y sensores (marcados con una X azul las estaciones Meter (25 cm y 50 cm) y la estación IKOS marcada con una X negra), para la parcela de granado (a) y la parcela de caqui (b). Los colores muestran distintos tratamientos experimentales; las zonas donde se analizará la evolución de la humedad y potencial del suelo corresponden a la zona roja 100% CC en la parcela de caqui (b) y a la zona amarilla 100% CC en la parcela de granado (a).

3.3. ANALISIS DE SUELO

Tras realizar la toma de muestras, estas se dejaron secar a temperatura ambiente por algunos días (dependiendo de la humedad ambiente, de la humedad de la muestra y de la textura). Una vez seca la muestra se realizó un tamizado de estas mediante tamizador mecánico de 2 mm, para reducir y homogeneizar las muestras a partículas finas las cuales condicionan las propiedades físicas más relevantes. Una vez tamizadas se transportó su contenido a unos recipientes de plástico, asignándole una referencia a cada muestra. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Las propiedades estudiadas fueron las siguientes:

3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS

TEXTURA

El primer análisis que se realizó fue la textura, se realizó mediante el método Bouyoucos (Bouyoucos, 1962), el cual determina la densidad de los sedimentos de diferentes líquidos con

suspensiones sólidas utilizando un hidrómetro calibrado. En este método se comenzó pesando 40 gr de muestra de suelo alterada, posteriormente se añadió 100 ml de solución *calgón* dejando reposar durante 10 minutos, pasado ese tiempo se introduce al recipiente de la batidora, añadiéndole agua destilada; se bate durante 5 minutos la muestra y se trasfiere el contenido a una probeta enrasando con agua destilada hasta los 1000 ml. Posteriormente agitamos la muestra con una varilla agitadora e introducimos el densímetro anotando el valor de este a los 30 segundos, 1 minuto, 3 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 90 minutos y más de 8 horas (Ln).

Para cada una de las lecturas tomadas (Ln), se calculó la concentración de la suspensión expresada en g/l y el porcentaje en peso de partículas:

$$\text{Concentración de la Suspensión (Lc)} = Ln - L_0$$

$$\text{Peso de partículas (\%)} = \left(\frac{L_c}{p} \right) * 100$$

Donde: Ln se corresponde con la lectura del densímetro, L₀ es la lectura de la calibración del densímetro y P' es el peso seco del suelo (g) que es equivalente a g/l, pues es la cantidad de suelo agregado en 1 litro.

POROSIDAD

La medición de la porosidad del suelo se realizó mediante picnómetro de aire (Air pycnometer according to Langer | Royal Eijkelpamp). Las muestras inalteradas de suelo en primer lugar se introdujeron durante 24 horas a 105 °C en estufa (Estufa desecación 80 L SELECTA) con el objetivo de eliminar el agua del espacio poroso. Posteriormente con las muestras a temperatura ambiente se pesó el anillo y el suelo en una balanza y se colocó en la campana de vacío del porómetro, anotando el nivel alcanzado por el mercurio. Finalmente se realizó la medición de las dimensiones del anillo.

$$V_p = V_{\text{anillo}} - V_s \quad \text{Siendo: } V_p = \text{Volumen de poros}$$

$$V_T = V_p + V_s \quad V_s = \text{Volumen sólidos} = (V_{\text{suelo}} + \text{anillo}) - V_{\text{anillo}} \quad V_t = \text{Volumen total}$$

DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{P_{ss}}{V_s}$$

Donde P_{ss} se corresponde con el peso de suelo seco y V_s se corresponde con el volumen de sólidos ((V_{suelo} + anillo) – Vanillo).

3.3.2. PROPIEDADES QUÍMICAS

MATERIA ORGÁNICA

La medición de la materia orgánica del suelo se realizó mediante el método de calcinación propuesto por Schulte y Hopkins en 1996, en este método se pesaron 3 g de suelo depositándolo en una cápsula de cerámica, se secaron durante 24 horas en estufa a 105 °C para retirar la humedad de la muestra y se pesó en balanza de precisión (P₁₀₅); posteriormente se introdujo en la mufla (Herotec modelo n12-PR/400 serie 8B) a 450 °C para calcinar la materia orgánica y se volvió a pesar en balanza (P₄₅₀). El cálculo se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{Fracción Mineral (\%)} = \left(\frac{P_{105} - P_{450}}{P_{105}} \right) * 100$$

$$\text{Fracción orgánica (\%)} = 100 - \text{Fracción mineral}$$

CARBONATOS

Se determinó mediante el calcímetro de Bernard, expresando el resultado final en porcentaje en peso de caliza en el suelo.

$$\%Caliza = 100 * \frac{L}{L'} * \frac{P'}{P}$$

Donde L se corresponde con la lectura observada en el calcímetro, L' es la lectura observada en el calcímetro para el CO₃Ca, P es el peso seco de la muestra y P' es 0,2 gr, que corresponde al peso de CO₃Ca.

NITRÓGENO

El contenido de nitrógeno se realizó mediante el método Kjeldahl, este método se basa en una volumetría ácido-base. En este método la muestra se descompone en caliente por medio del ácido sulfúrico, en presencia de un agente catalizador en el equipo (Destilador kjeldahl “pro-nitro m” semi-automático). El tratamiento transforma el nitrógeno de la muestra en amonio. La adición en el digestor (Unidad de digestión “Bloc-Digest” 12 micro) de NaOH libera el NH₃, que es arrastrado hasta un frasco colector por destilación en corriente de vapor. Posteriormente se valora con H₂SO₄ el contenido del frasco colector.

$$N \text{ Total (\%)} = \frac{(a - b) * N * 0,014}{P} * 100$$

Donde a se corresponde con los ml de ácido sulfúrico 0,1 N requerido para valorar la muestra, b se corresponde con los ml de ácido sulfúrico 0,1 N requerido para valorar el blanco, P es el peso de la muestra analizada y N es la normalidad del ácido sulfúrico.

PASTA SATURADA

Con este método conseguimos extraer las sales solubles del suelo en condiciones de saturación, esta metodología trata de reproducir las condiciones de saturación de un suelo en las que se produce una disolución de las sales de la fase sólida que pasan a una solución extraída mediante aplicación de vacío. Se pesaron 200 g de todas las muestras de suelo, se llevaron a saturación y se dejaron reposar durante 20 horas cubiertas por un film transparente para que no perdieran humedad. A las 24 horas se traspasó el contenido de la pasta a un recipiente conectado a una bomba extractora, consiguiendo extraer la solución.

pH PASTA SATURADA Y CE PASTA SATURADA

Una vez realizada la pasta saturada y extraída la solución se procede a la medición del pH y de la conductividad eléctrica de la misma. La medición del pH se realizó mediante un pHmetro de laboratorio (micropH 2000 CRISON) previamente calibrado y la medición de la conductividad eléctrica se realizó por medio de un conductímetro (Crison modelo Crison CM2202).

ANIONES Y CATIONES PASTA SATURADA

SODIO Y POTASIO

La medición del sodio y del potasio se realizó mediante un espectrofotómetro de llama (Fotómetro de llama 420 Sherwood | Grupo Didacta). La muestra se aspira en una llama, que recibe energía y genera esta especie excitada, volviendo a la parte del estado fundamental y libera de la energía recibida en forma de radiación a longitudes de onda específicas para cada elemento químico (Kasalab, 2018).

Para el cálculo del sodio y del potasio es necesario la realización de una recta de calibrado y la obtención de la ecuación de la recta, para ello se introdujo en el fotómetro de llama diversas concentraciones de sodio y potasio, anotando su valor. Una vez realizada la recta de calibración se procedió a las mediciones de las muestras.

$$\text{Concentración Potasio y Sodio } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right) = mx + n$$

Siendo m y n valores obtenidos en la recta de regresión y x la lectura de K⁺ y de Na⁺ en el fotómetro.

CALCIO

El método seguido para el cálculo del calcio se basa en la capacidad de los iones calcio en formar complejos quelatos con la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en un medio a pH 12, este medio a pH 12 se consigue con el objetivo de que los iones magnesio precipiten en modo hidróxido y no intervengan, así pues, el ion calcio en presencia de murexida forma un complejo de color rosa que vira a malva cuando el calcio es copado por EDTA (UNE 77013:1989).

$$\text{Concentración de calcio } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right) = 4 * V1$$

V1= Volumen de EDTA empleado en la valoración del Calcio.

MAGNESIO

El método utilizado para el cálculo de la dureza de la solución extracto ofrece de modo indirecto la concentración de magnesio de una muestra de suelo, así pues el cálculo se basa en la capacidad de los iones calcio y magnesio de formar un complejo quelato con la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en una solución acuosa a pH 10, con el indicador negro de eriocromo el magnesio forma un complejo color vino que tras valorar con EDTA pasa a color azul al ocupar los iones magnesio el EDTA, el volumen de EDTA utilizado en esta valoración menos el volumen de EDTA utilizado en la valoración del calcio proporcionan la cantidad de magnesio presente en la muestra (Norma UNE 77040).

$$\text{Concentración de Magnésio } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right) = 4 * (V2 - V1)$$

V1= Volumen de EDTA empleado en la valoración del Calcio

V2= Volumen de EDTA empleado en la valoración de la dureza (suma Ca+ Mg)

CARBONATOS Y BICARBONATOS

El método utilizado para el cálculo de los carbonatos y bicarbonatos del suelo se ha realizado mediante valoraciones químicas, en la cual la muestra en presencia de indicadores ácido-base nos indica el volumen(mL) necesario de ácido clorhídrico para neutralizar los iones carbonatos y bicarbonatos de la muestra.

$$\text{Concentración bicarbonato } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right) = \frac{(V2 - V1) \times 0,98 \times 20}{V'}$$

V1= Volumen de HCl 0,02 N usado en la valoración de CO₃

V2= Volumen de HCl 0,02 N usado en la valoración de HCO₃

V'= Valor en ml de la muestra problema

SULFATOS

El método empleado ha sido el método turbidimétrico, este método se basa en que los iones sulfato de una muestra precipitan en medio ácido clorhídrico como sulfato de bario al añadir cloruro de bario a la solución, dicho precipitado puede ser medido mediante su absorbancia con un espectrofotómetro (PG Instruments LTd modelo T70+ UV/VIS Spectofotometer).

Para el cálculo de la concentración de sulfato es necesario la realización de una recta de calibrado y la obtención de la ecuación de la recta, para ello se introdujo en el fotómetro de llama diversas concentraciones de sodio y potasio, anotando su valor. Una vez realizada la recta de calibración se procedió a las mediciones de las muestras.

$$\text{Concentración sulfato } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) = mx + n$$

Siendo m y n valores obtenidos en la recta de regresión y x la lectura del sulfato en el espectrofotómetro fotómetro.

CLORO

El método utilizado para la determinación de cloro ha sido el método de Mohr, se basa en la valoración de una solución de agua con nitrato de plata. Al añadir a una muestra, con iones cloruro, dicromato y nitrato de plata, los iones de plata reaccionan con los del cloruro hasta que hay iones de cloro libres, cuando estos ya están copados, la plata reacciona con los iones cromato dando lugar a un precipitado color rojo.

$$\text{Concentración bicarbonato } \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) = \frac{1000 * N * V'}{V}$$

Siendo V el volumen de muestra, V' los ml de AgNO₃ usados en la valoración y N la normalidad del AgNO₃.

3.4. ANALISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos se utilizó el programa STATGRAPHICS | Data Analysis Solutions, con él se pudo comprobar si había diferencias significativas entre las muestras obtenidas a 25 cm y las muestras obtenidas a 50 cm.

Para la homogeneidad de las muestras dentro de cada parcela se ha utilizado el coeficiente de variación que tiene la siguiente expresión:

$$CV(\%) = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Siendo S la desviación estándar y X la media de todas las muestras de la parcela.

Esta medida de dispersión fue propuesta por Karl Pearson (1895) para comparar la variabilidad o dispersión entre varias distribuciones de frecuencias. El coeficiente de variación toma valores entre 0 y 1. Si el coeficiente es próximo al 0, significa que existe poca variabilidad en los datos y es una muestra muy compacta. En cambio, si tienden a 1 es una muestra muy dispersa y la media pierde confiabilidad. De hecho, cuando el coeficiente de variación supera el 30% (0,3) se dice que la media es poco representativa.

3.5. EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y POTENCIAL

Para la realización del estudio comparativo de sensores de bajo coste se utilizaron tensiómetros (Ikos, Ikostech, Almería, España) y sensores capacitivos del tipo FDR diferentes, ECH₂O EC-5 (METER Group, Munich, Alemania) e Ikos (Ikostech, Almería, España) . Las sondas y tensiómetros se instalaron a diferentes profundidades (25 cm y 50 cm) repartidas por la parcela de caqui y granado (figura 2).

Cada estación de medición de Ikos está formada por dos tensiómetros (una a cada una de las profundidades indicadas) y un sensor FDR instalado a 25 cm de profundidad que están conectados a un datalogger que envía los datos registrados al servidor de la empresa, donde están disponibles (<https://app.ikostech.es/>; Ikostech, Almería, España). En cuanto a los sensores ECH₂O EC-5, se

conectaron a dataloggers Em-50, y los datos se descargaron mediante el programa informático ECH₂O Utility (METER Group, Munich, Alemania). En todos los casos el registro de datos se realizó cada 15 minutos.

La instalación de las estaciones Ikos (tensiómetros, sensores FDR y datalogger), se realizó por parte de técnicos de la empresa Ikos. Para la instalación de los tensiómetros se utilizó una barrena de diámetro ligeramente superior al de los tensiómetros, para asegurar un buen contacto con el suelo alrededor de cada tensiómetro se relleno con el mismo suelo extraído para realizar el orificio, saturado con agua. Para la instalación de los sensores FDR, de ambas casas comerciales, se realizaron unas pequeñas zanjas para alterar lo menos posible el perfil del suelo. Los sensores FDR y tensiómetros instalados a una profundidad de 25 cm, corresponden a la profundidad con mayor concentración, y actividad radical. Los sensores y tensiómetros instalados a una profundidad de 50 cm darán información sobre la posible pérdida de agua por percolación, dado que las raíces de caqui y granado se desarrollan por encima de esta profundidad. En el caso de las estaciones IKOS se instalaron 4 estaciones completas, dos por cada cultivo, una de ellas registra la información del tratamiento control (riego sin restricciones, aportando el 100% de las necesidades de agua de riego) mientras que la otra estación registra la información del tratamiento de riego deficitario sostenido (regar al 50% y 70% de las necesidades de agua de riego del granado y caqui, respectivamente). En el caso de los sensores ECH₂O EC-5, se instalaron también 4 estaciones, con 5 sensores por estación. En este caso, para cada cultivo se registra la información tanto de los tratamientos control y deficitario sostenido, como de dos tratamientos de riego deficitario controlado.

Los datos de las sondas fueron introducidos en una tabla Excel donde se crearon gráficas para observar las fluctuaciones de humedad de los diferentes sensores, relacionando el contenido volumétrico de agua en el suelo (%VWC) con una variable temporal.

3.6. CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

Se siguieron dos procedimientos para la realización de las curvas de retención de humedad, mediante placas de presión y mediante HYPROP. Por una parte, se utilizó un equipo de placas de presión (Soilmoisture Equipment Corp modelo pressure plate extractors), realizándose medidas a la presión de 0,1 bar, 0,33 bar, 1 bar, 3 bar, y 15 bar. Para cada muestra se realizaron 3 repeticiones. En primer lugar, se pesaron 20 g de suelo seco y se dispusieron en los moldes de la placa Richard depositándose sobre la base membranosa a la cual se le inyectó agua para humedecer la muestra y saturarla de agua. Una vez la muestra es saturada se introduce en las ollas a presión, a la presión requerida. Transcurrido 1 día para las muestras de 0,1 bar, 0,33 bar, 1 bar y 3 bar se retiraban de la olla las membranas y se procedía al pesado en húmedo de las muestras en balanza de precisión, las muestras de 15 bar se retiraban de la olla a los 3 días puesto que necesitan más tiempo para garantizar que la presión se haya ejercido correctamente. Una vez anotado el peso en húmedo se procede a la introducción en estufa de secado a 105 °C por 24 horas. Trascorridas las 24 horas se pesan las muestras en balanza de precisión y se anota el peso.

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 representó la curva de retención de humedad, poniendo especial interés en la capacidad de campo (0,1 Bar) y punto de marchitez permanente (15 Bares).

Por otro lado, se realizó las curvas de retención de humedad mediante un equipo HYPROP. En primer lugar antes de iniciar las lecturas con HYPROP es necesaria la realización de la desgasificación, proceso muy importante dentro de la calibración del sistema, esta desgasificación impide que la presión se vea afectada por vapor de aire, contrarrestando la presión ejercida por el agua. Esta desgasificación consiste en introducir el agua destilada desoxigenada (llevándola a ebullición en el horno microondas) en el equipo HYPROP (METER Group, AG, Munich, Alemania). Posteriormente con una bomba de vacío que trabaja a una presión de 0,8 kPa se conectan los tensiómetros y la base y se procede a la extracción de las partículas de oxígeno que todavía permanecen. Una vez pasadas 24 horas, tanto los tensiómetros como la base se encuentran listos para calibrar mediante el programa informático HYPROP VIEW (METER Group, AG, Munich, Alemania).

Las muestras inalteradas de suelo se tomaron a dos profundidades distintas, a 25 cm y a 50 cm, con el anillo antes indicado que mantuvo las características estructurales. Posterior a esto, se dejaron las muestras humedeciéndose por capilaridad hasta la saturación de estas. Una vez saturada se procede a la introducción de los tensiómetros y a la calibración de la balanza. Una vez calibrada la balanza se deposita la muestra de suelo sobre la balanza y se conecta mediante un cable al ordenador y al programa HYPROP VIEW y se inicia el ensayo.

Los programas informáticos utilizados para este dispositivo HYPROP han sido el HYPROP VIEW y el HYPROP FIT (METER Group, Munich, Alemania). El primero nos da información constante (cada minuto) de la presión a la que es sometida la muestra y las pérdidas de agua. El segundo programa analiza la información recogida por HYPROP FIT y la relaciona teniendo en cuenta el peso seco de la muestra. Finalmente obtenemos las curvas de retención y comportamiento hidráulico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

4.1.1. TEXTURA

La textura de un suelo indica su fertilidad y capacidad de retención hídrica potenciales (Sharma et al., 2015). Las texturas obtenidas en los ensayos realizados son mostradas en las figuras . La textura predominante en ambos cultivos es la textura franca; esta textura se caracteriza por tener un equilibrio entre las partículas de arena, limo y arcilla. Son suelos con una capacidad de retención de agua media-alta y con características intermedias, siendo los más apropiados para la mayoría de los cultivos.

Los contenidos medios de arena, limo y arcilla han sido respectivamente, 44,1%-30,5%-25,1% para caqui y 44,3%-35,7%-20% para granado, ambas texturas media corresponden a un suelo franco. En la figura 3 se presenta el porcentaje de cada una de las texturas, obtenido con las muestras de suelo a 25 cm de profundidad para cada uno de los cultivos. Se puede observar una gran homogeneidad en la parcela de granado y en cuanto a la parcela de caqui, si tenemos en cuenta la similitud de las texturas franca, franco arcilloso y franco arcillo arenoso, figura 4, también hablaríamos de homogeneidad ya que los puntos están muy cercanos en el triángulo de texturas, aunque están clasificados como texturas diferentes.

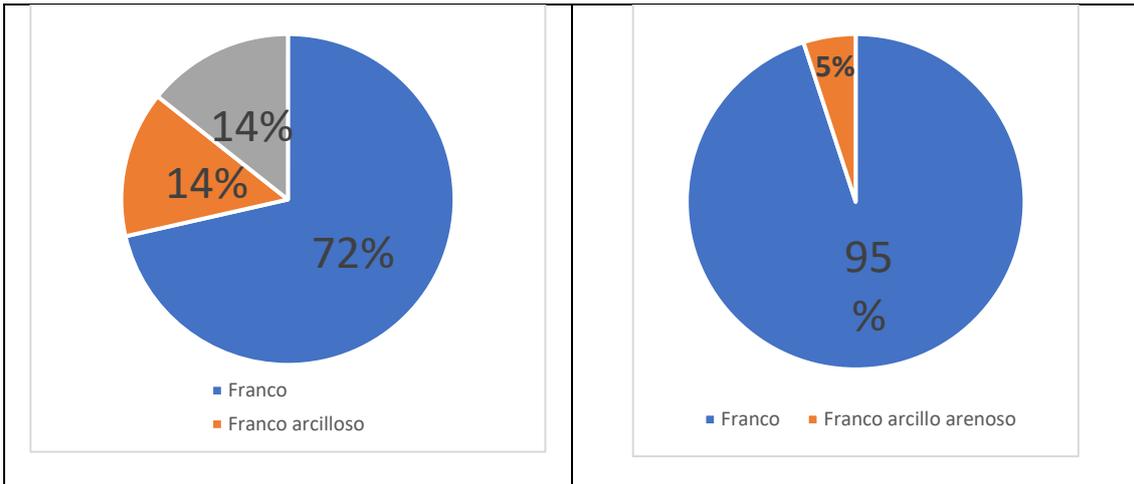


Figura 3 Porcentajes de las texturas obtenidas en las muestras de suelo a 25 cm de profundidad obtenidas en la parcela de cultivo de caqui (izquierda) y granado (derecha).

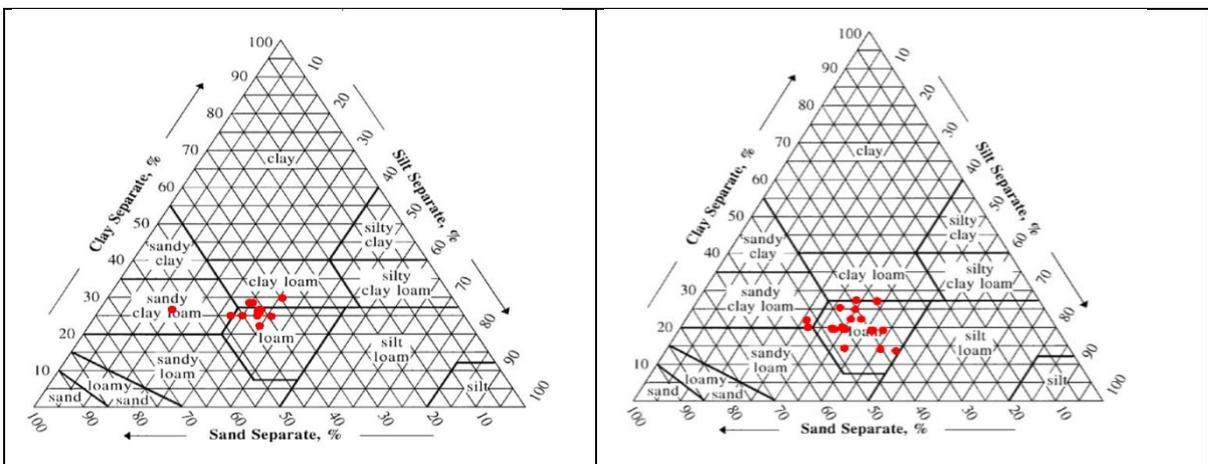


Figura 4 Triangulo de texturas en la parcela de caqui (izquierda) y granado (derecha). Cada punto corresponde a un punto de muestreo.

4.1.2.POROSIDAD

Los valores de porosidad obtenidos se muestran en la figura 5, en la parcela de caqui los valores oscilan entre 31% y 52% siendo el valor medio de 40,2% y en la parcela de granado se han obtenidos valores que oscilan entre 39% y 49%, siendo el valor medio de 43,4%. Los valores de desviación estándar (S) y coeficiente de variación (CV) se muestran en la tabla 1; los resultados obtenidos se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%. En el caso de granado a la profundidad de 50 cm el coeficiente de variación es 0% ya que las dos muestras evaluadas nos han dado el mismo resultado de porosidad.

Tabla 1 Coeficiente de variación (CV) de la porosidad en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	40,19	7,15	17,79
Caqui 50 cm	35,75	8,84	24,72
Granado 25 cm	43,40	4,56	10,51
Granado 50 cm	43,00	0,00	0,00

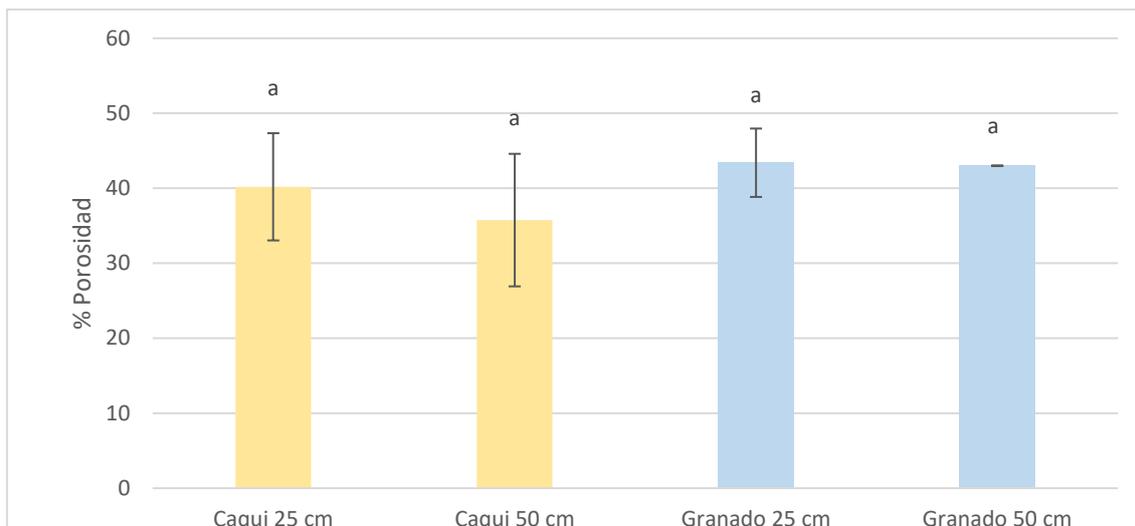


Figura 5 Valores medios de porosidad en las parcelas de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras verticales corresponden a la desviación estándar. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.3.DENSIDAD APARENTE

Los valores de densidad aparente obtenidos en la parcela de caqui oscilan entre 1,42 y 1,85 g/cm³ siendo el valor medio 1,64 g/cm³. En la parcela de granado se han obtenido valores que oscilan entre 1,42 y 1,75 g/cm³, siendo el valor medio de 1,56 g/cm³. Valores obtenidos a la profundidad de 25 cm. Los valores de densidad aparente obtenidos se sitúan en rango no ideal para el crecimiento de las raíces tanto en la parcela de caqui como de granado (valor ideal <1,4 gr/cm³), esto podría tener consecuencias negativas en los cultivos ya que probablemente se esté produciendo una compactación del suelo. Los valores S y CV se muestran en la tabla 2, los resultados obtenidos se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor al 30 %.

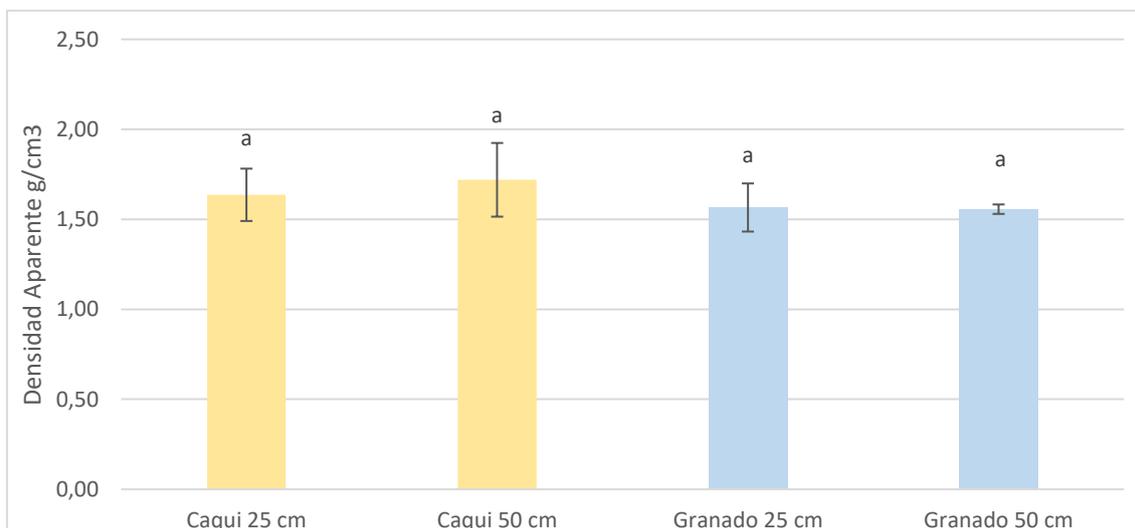


Figura 6 Valores medios de densidad aparente en las parcelas de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

Tabla 2 Coeficiente de variación (CV) de la densidad aparente en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Medias	S	CV (%)
Caqui 25 cm	1,64	0,15	8,89
Caqui 50 cm	1,72	0,20	11,91
Granado 25 cm	1,57	0,13	8,54
Granado 50 cm	1,56	0,03	1,69

4.1.4. PERMEABILIDAD

Los valores de permeabilidad obtenidos en la parcela de caqui oscilan entre 0,009 y 0,053 cm/día, siendo el valor medio de 0,03 cm/día. Para la parcela de granado los valores obtenidos oscilan entre 0,023 y 0,081 cm/día, siendo el valor medio de 0,04 cm/día. En ambos casos la clase de permeabilidad de los suelos según la FAO se considera Muy Lenta. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 3, los resultados obtenidos se pueden considerar heterogéneos ya que el CV es muy superior al 30% en ambas parcelas, aunque son homogéneos en su manejo, puesto que ninguna muestra da resultados óptimos de permeabilidad. A la profundidad de 50 cm sólo se disponía de 1 muestra por lo que es imposible ver la homogeneidad del valor.

Tabla 3 Coeficiente de variación (CV) de la permeabilidad en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Medias	S	CV (%)
Caqui 25 cm	0,03	0,02	77,18
Caqui 50 cm	0,02	-	-
Granado 25 cm	0,04	0,03	71,46
Granado 50 cm	0,08	-	-

Esta permeabilidad muy lenta puede ser debida a la alta densidad aparente que nos encontramos en el suelo y fruto probablemente de una compactación del suelo. Será muy importante corregir esa compactación para evitar posibles daños al cultivo.

4.1.5. CARBONATOS

Los valores medios obtenidos de carbonatos totales se muestran en la figura 7, para la parcela de caqui ha sido del 12,76%, un valor normal (Yanez, 1989) y en el caso de la parcela de granado se ha obtenido un valor medio de 23,47%, medianamente calizo (Yanez, 1989). Los valores de S y CV se muestran en la tabla 4. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%.

Tabla 4 Coeficiente de variación (CV) de los carbonatos en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	12,76	1,39	10,91
Caqui 50 cm	10,81	2,88	26,63
Granado 25 cm	23,47	1,57	6,71
Granado 50 cm	25,90	3,10	11,95

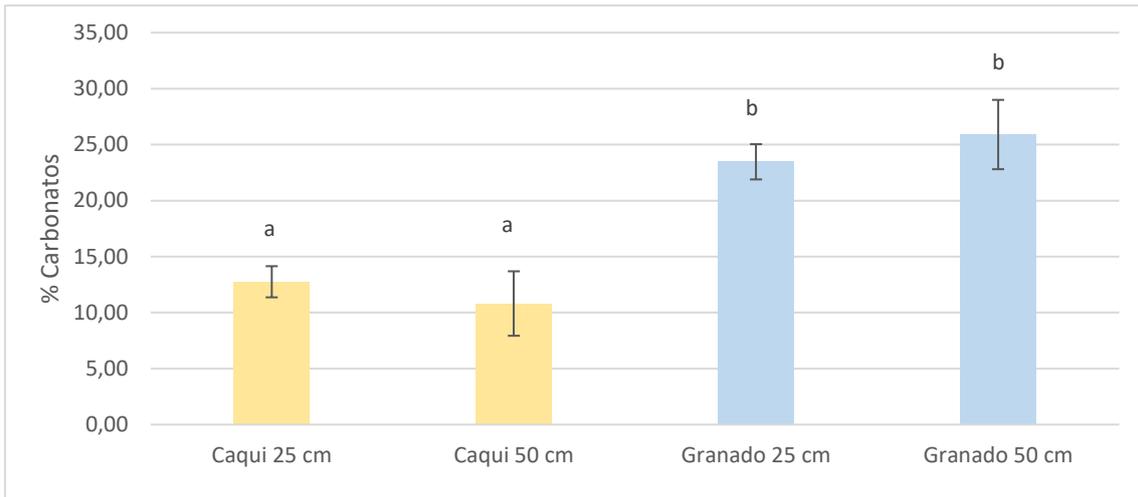


Figura 7 Valores medios del porcentaje de carbonatos en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.6.pH

La mayoría de los suelos estudiados han tenido valores de pH entre 7,8 y 8,4, clasificándose como suelos básicos (Porta et al., 2003). Los resultados medios obtenidos en las parcelas se muestran en la figura 8. El valor medio de la parcela de caqui se sitúa en 8,18 y en la parcela de granado se sitúa en 8,16. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 5. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%.

Tabla 5 Coeficiente de variación (CV) del pH del suelo en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	8,18	0,32	3,96
Caqui 50 cm	8,02	0,55	6,88
Granado 25 cm	8,16	0,13	1,55
Granado 50 cm	8,105	0,13	1,66

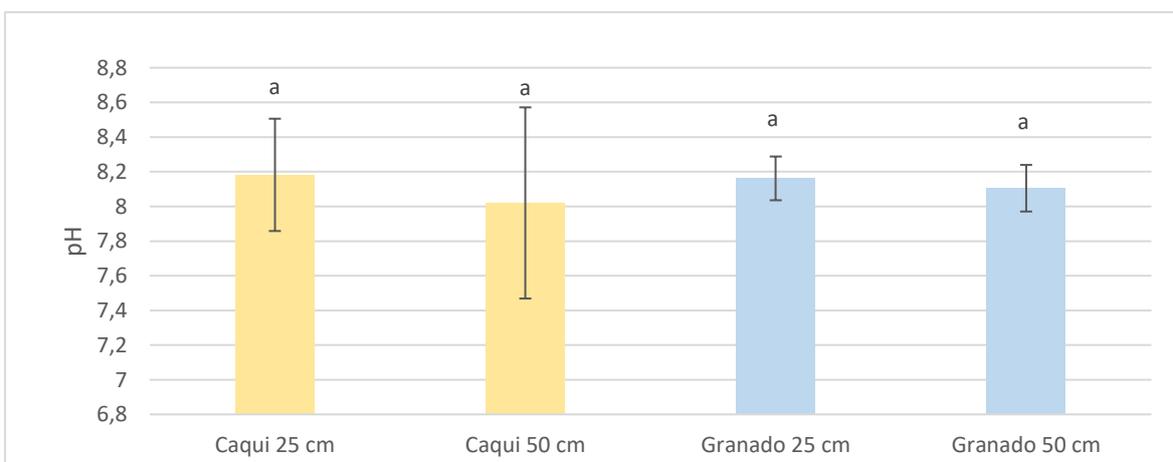


Figura 8 Valores medios de pH en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.7. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EXTRACTO SATURADO (CEe)

Los valores medios obtenidos de conductividad eléctrica del extracto saturado se muestran en la figura 9; en la parcela de caqui a la profundidad de 25 cm se ha obtenido un valor medio de CEe de 1,55 dS/m, no salino (Yanez, 1989) y en el caso de la parcela de granado se ha obtenido un valor medio de CEe de 1,89 dS/m, no salino (Yanez, 1989). Las muestras a 50 cm en la parcela de caqui muestra un valor medio de 5,14 dS/m, salino (Yanez, 1989) y la parcela de granado muestra un valor medio de 5,59 dS/m, salino (Yanez, 1989), mostrando ambas parcelas diferencias significativas con la profundidad de 25 cm. Este aumento de la salinidad a lo largo del perfil del suelo puede ser debido al lavado de sales por el agua de riego y a la acumulación de esas sales a la profundidad de 50 cm. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 6. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%.

Tabla 6 Coeficiente de variación (CV) de la CEe en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	1,55	0,39	25,06
Caqui 50 cm	5,14	1,21	23,54
Granado 25 cm	1,89	0,42	22,22
Granado 50 cm	5,59	1,41	25,30

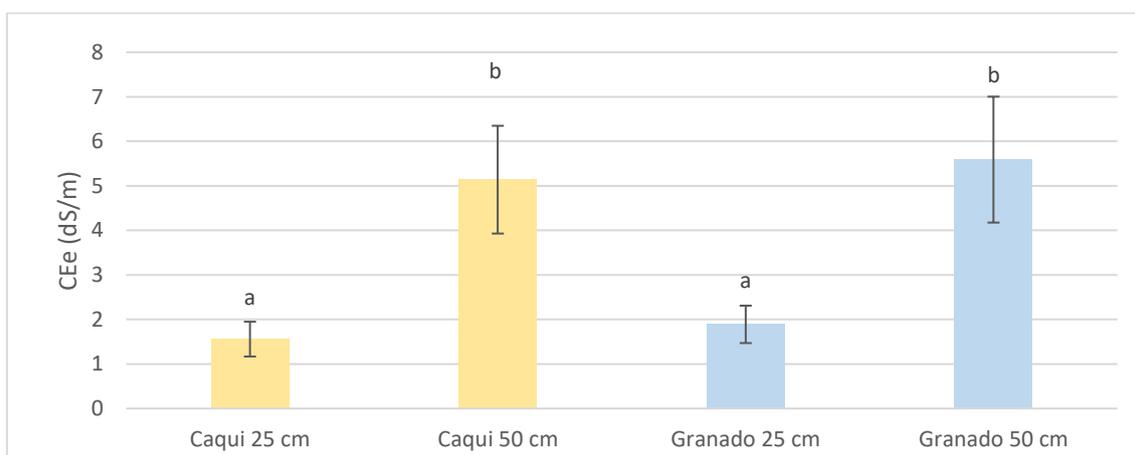


Figura 9 Valores medios de CEe en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.8. MATERIA ORGÁNICA

Los valores medios obtenidos de materia orgánica se muestran en la figura 10, en la parcela de caqui el valor medio de las muestras es de 3,04% y 3,11% en la parcela de granado. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 7. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%. Si interpretamos el contenido de materia orgánica del suelo de ambos valores de acuerdo con la textura, ambas parcelas con textura media, nos encontramos con valores de materia orgánica elevados.

En la zona mediterránea son comunes los suelos cultivados con niveles pobres en materia orgánica debido a las condiciones climáticas y a la intensificación de los cultivos. La incorporación de fertilizantes orgánicos como estiércol o distintos abonos verdes han demostrado ser una práctica útil para aumentar el contenido de materia orgánica (Marathe et al., 2017). Estos valores elevados de materia orgánica le van a causar un efecto positivo sobre las propiedades físicas del suelo

mejorando la permeabilidad y la capacidad de retención hídrica, así como disminuir la densidad aparente y la erosión del suelo (García – Serrano, 2010).

Tabla 7 Coeficiente de variación (CV) de la materia orgánica en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	3,04	0,43	14,19
Caqui 50 cm	2,88	0,35	12,13
Granado 25 cm	3,11	0,41	13,10
Granado 50 cm	2,81	0,05	1,67

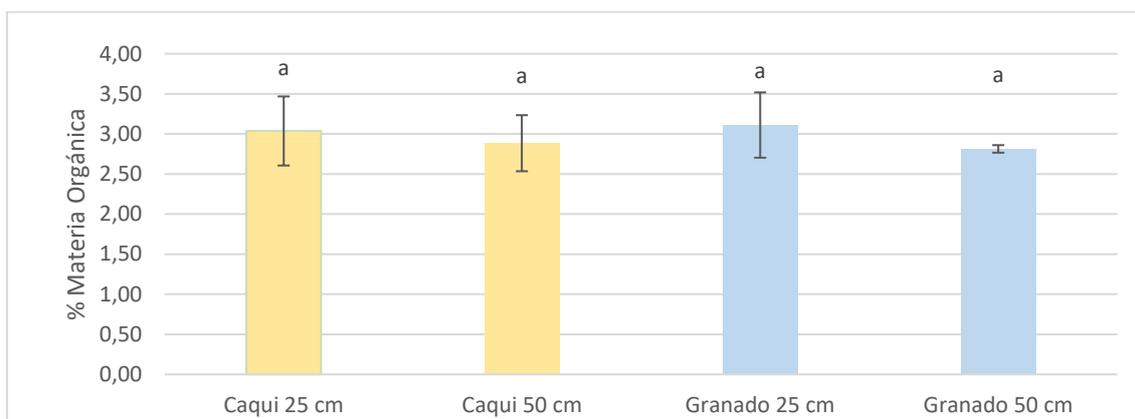


Figura 9 Valores medios de Materia orgánica en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.9. NITROGENO TOTAL KHJELDAL (NTK)

Los valores medios de NTK se muestran en la figura 12. Los valores oscilan entre 0,072% y 0,11% en la parcela de caqui, situándose el valor medio en 0,092%. Este valor corresponde a un nivel bajo de este nutriente en suelos para uso agrícola (Cobertera, 1993). En la parcela de granado los valores han oscilado entre 0,065% y 0,10%, con un valor medio de 0,08%. Al igual que la parcela de caqui nos encontramos con un valor de nitrógeno en suelo bajo. Existen diferencias significativas en la parcela de caqui entre la concentración de NTK a la profundidad de 25 cm y 50 cm, disminuyendo con la profundidad, para la parcela de granado no existen diferencias significativas. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 8. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar homogéneos ya que el CV es menor del 30%.

Tabla 8 Coeficiente de variación (CV) de NTK en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	0,09	0,02	20,08
Caqui 50 cm	0,07	0,00	0,32
Granado 25 cm	0,08	0,01	17,98
Granado 50 cm	0,07	0,01	9,58

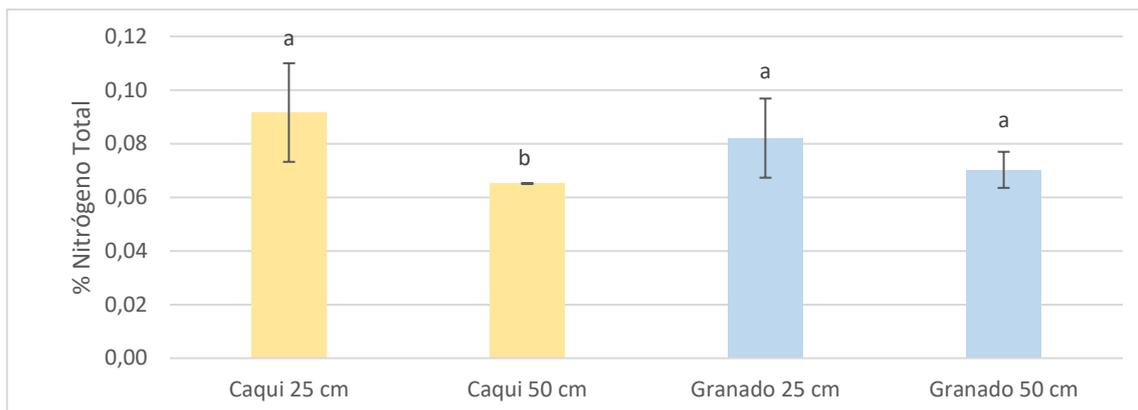


Figura 10 Valores medios de NTK en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

Cerca del 95-98% del nitrógeno en el suelo se halla contenido en la materia orgánica, presentándose como proteínas, aminoácidos, etc. El resto se halla en forma mineral como resultado de la mineralización de la materia orgánica. El ritmo de absorción de nitrógeno por las plantas es superior al ritmo de liberación del nitrógeno por la acción de descomposición de la materia orgánica (Thompson y Troeh, 1982). Este podría ser el motivo por cual el contenido de nitrógeno en el suelo es relativamente bajo.

4.1.10. POTASIO

Los valores medios de potasio se muestran en la figura 12 a una profundidad de 25 cm ha sido de 2,32 meq/l para la parcela de caqui clasificándose como normal (2-5 meq/l) y de 0,78 meq/l en la parcela de granado, clasificándose como bajo (< 1 meq/l). Los valores de S y CV se muestran en la tabla 9. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar heterogéneos ya que el CV es mayor del 30%.

Tabla 9 Coeficiente de variación (CV) del potasio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	2,32	1,37	59,05
Caqui 50 cm	1,44	0,43	29,61
Granado 25 cm	0,78	0,28	35,90
Granado 50 cm	0,76	0,16	20,73

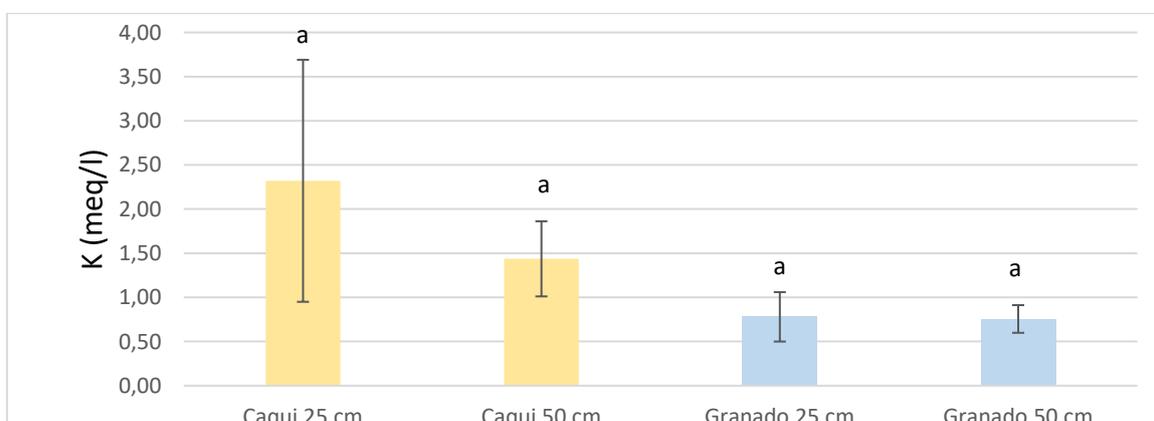


Figura 11 Valores medios de potasio en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

El potasio es el tercer nutriente que suele limitar el crecimiento de las plantas y las plantas lo absorben con gran rapidez (Thompson y Troeh, 1982), por ello será conveniente realizar abonados de corrección en la parcela de granado y posteriores abonados de mantenimiento en ambas parcelas para dotar a las plantas con la cantidad necesaria de potasio. La presencia de alto contenido de materia orgánica como es el caso de estas parcelas puede solubilizar el K mediante la producción de ácidos orgánicos durante el proceso de descomposición (Marathe et al., 2018).

4.1.11. CATIONES DE CAMBIO

Los cationes de cambio más importantes que encontramos en el suelo son el Ca^{2+} , el Mg^{2+} y el Na^+ . Los valores obtenidos en las parcelas estudiadas han sido los siguiente:

Los valores medios de calcio se muestran en la figura. 12, para la parcela de caqui el valor medio ha sido de 5,69 meq/l (rango normal) y 14,25 meq/l (rango normal) para la parcela de granado. A la profundidad de 50 cm nos encontramos con valores de calcio de 23 meq/l (rango alto) en la parcela de caqui y 13,2 meq/l (rango normal) en la parcela de granado. Existen diferencias significativas entre la concentración de Ca^{2+} y la profundidad en la parcela de caqui; esto es debido a que el calcio, igual que otros nutrientes, se agota parcialmente en la zona que rodea a las raíces en crecimiento, este efecto parece resultar del agotamiento del agua del suelo en esa zona radical (Thompson y Troeh, 1982). Los valores de S y CV se muestran en la tabla 9. Los resultados en ambas parcelas se pueden considerar heterogéneos ya que el CV es mayor del 30%.

Tabla 10 Coeficiente de variación (CV) del calcio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	5,69	2,04	35,96
Caqui 50 cm	32,00	16,90	52,81
Granado 25 cm	14,26	9,14	64,12
Granado 50 cm	18,25	8,13	44,55

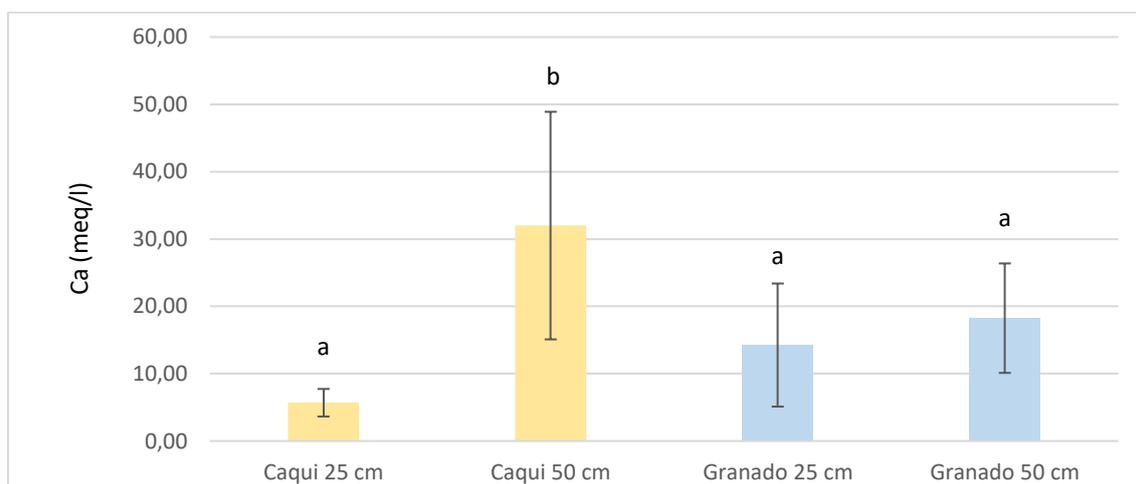


Figura 12 Valores medios de calcio en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

El siguiente catión estudiado ha sido el magnesio; los datos medios obtenidos se muestran en la figura 13, a una profundidad de 25 cm el valor medio ha sido de 5,23 meq/l (normal) para la parcela de caqui y de 17,44 meq/l (alto) para la parcela de granado. A la profundidad de 50 cm los valores medios han sido de 15 meq/l (alto) para la parcela de caqui y de 13 meq/l (alto) para la parcela de granado. Existen diferencias significativas entre la concentración de Mg^{2+} y la profundidad en la parcela de caqui; Este elemento se encuentra en el suelo acompañando al calcio,

aunque en menor proporción y al igual que él, este se agota en la zona radical donde la actividad de las raíces en crecimiento es mayor (Thompson y Troeh, 1982) es por ello por lo que existen diferencias significativas entre la profundidad de 25 cm y la de 50 cm. Los valores de S y CV se muestran en la tabla 11. Los resultados se consideran homogéneos en la parcela de caqui (CV<30%) y heterogéneo en la parcela de granado (CV>30%).

Tabla 11 Coeficiente de variación (CV) del magnesio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	5,26	1,36	25,94
Caqui 50 cm	15,00	4,24	28,28
Granado 25 cm	17,44	12,79	73,34
Granado 50 cm	16,50	8,90	53,94

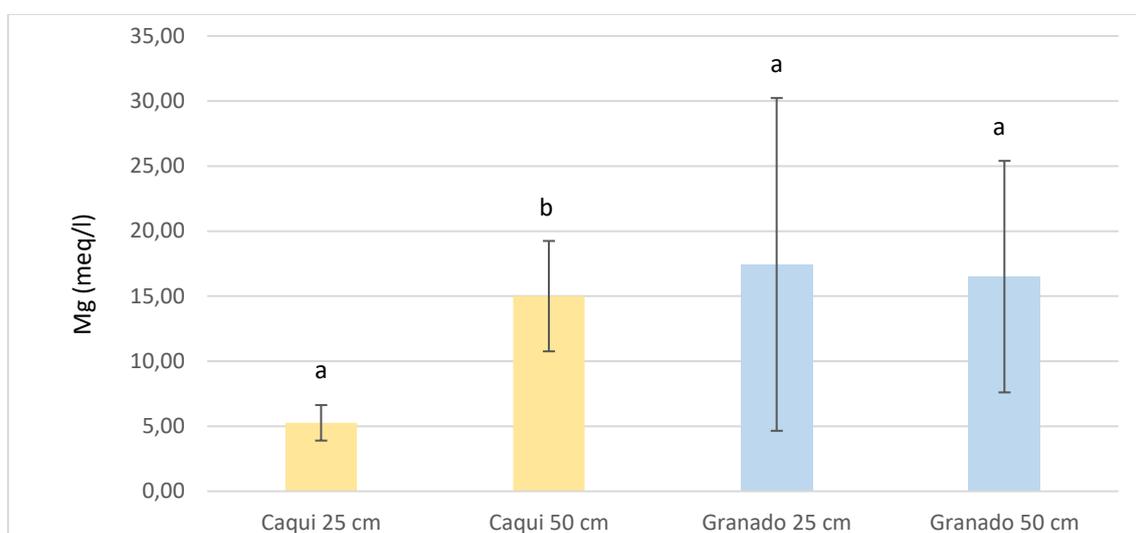


Figura 13 Valores medios de magnesio en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

En cuanto al catión sodio, los datos medios obtenidos se muestran en la figura 14, a una profundidad de 25 cm ha sido de 6,40 meq/l (normal-alto) en la parcela de caqui y 11,49 meq/l (normal-alto) en la parcela de granado. A una profundidad de 50 cm los valores medios obtenidos han sido 14,20 meq/l (normal en la parcela de caqui y 28,55 meq/l (alto) en la parcela de granado. Existen diferencias significativas entre la concentración de Na⁺ y la profundidad de muestreo obteniendo una concentración mayor en profundidad, esto puede ser debido a que se está produciendo un lavado del sodio por el agua de riego. Altos niveles de sodio pueden influir negativamente en la estructura y permeabilidad del suelo, así como en el correcto desarrollo vegetal (Horneck y col., 2011). En estas parcelas nos encontramos con suelos ligeramente salinos que no son sódicos, por lo que pueden restaurarse con cierta facilidad si aseguramos un buen drenaje y efectuando riegos de lavado.

Los valores de S y CV se muestran en la tabla 12. Los resultados se consideran homogéneos en la parcela de caqui a la profundidad de 25 cm (CV<30%) pero heterogéneos a la profundidad de 50 cm, en la parcela de granado los resultados indican que a la profundidad de 25 cm la parcela es heterogénea (CV>30%) y a la profundidad de 50 cm los resultados son homogéneos.

Tabla 12 Coeficiente de variación (CV) del sodio en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	6,40	1,29	20,12
Caqui 50 cm	14,20	12,73	89,66
Granado 25 cm	11,49	8,21	71,42
Granado 50 cm	28,55	4,29	15,01

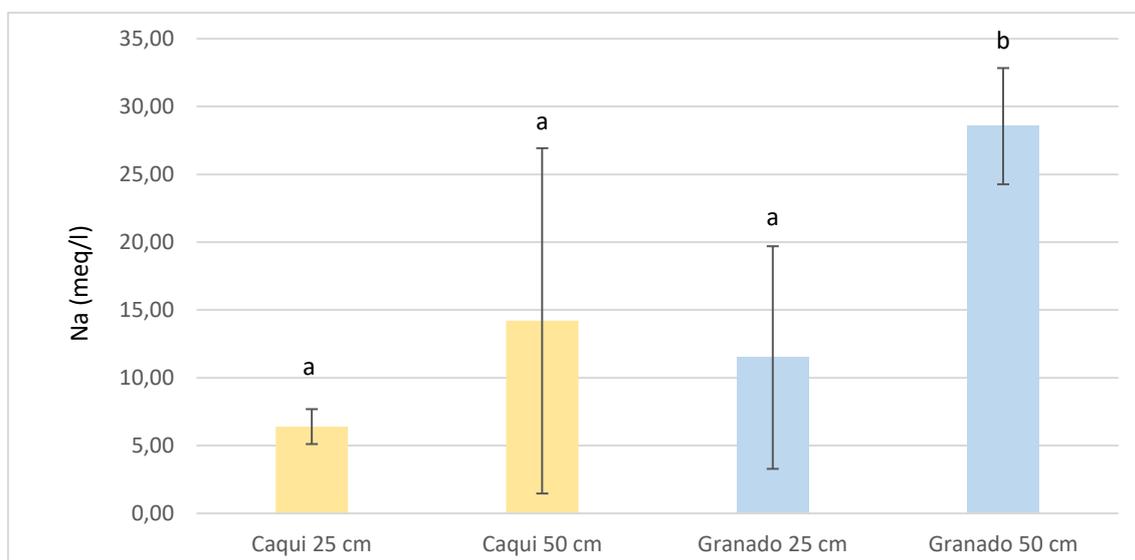


Figura 14 Valores medios de sodio en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.12. CLORURO

Los valores de cloruro medios obtenidos en los puntos de muestreo se muestran en la figura 15, en la parcela de caqui el valor medio ha sido de 9,23 meq/l (normal) y 18,46 meq/l (normal-alto) en la parcela de granado. A la profundidad de 50 cm nos encontramos con valores medios de 27,5 meq/l (alto) en la parcela de caqui y 32,5 meq/l (alto) en la parcela de granado. Existiendo en ambas parcelas diferencias significativas entre la concentración de Cl⁻ y la profundidad de muestreo. Los cloruros son compuestos muy solubles, por esta razón se lava del suelo con facilidad y se concentra en mayor proporción a mayor profundidad (Thompson y Troeh, 1982). A la profundidad de 25 cm, donde se concentran la mayoría de las raíces no debería de ser un problema, a menos que se deje regar y el agua se evapore de la superficie produciendo un ascenso de las sales concentrándose en la superficie hasta formar costras blancas en los periodos secos.

Los valores de S y CV se muestran en la tabla 13. Los resultados se consideran heterogéneos en ambas parcelas (CV > 30%) a excepción de la parcela de granado a la profundidad de 50 cm.

Tabla 13 Coeficiente de variación (CV) de cloruro en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	9,23	2,89	31,36
Caqui 50 cm	33,00	18,38	55,71
Granado 25 cm	18,46	8,69	47,11
Granado 50 cm	32,50	4,10	12,62

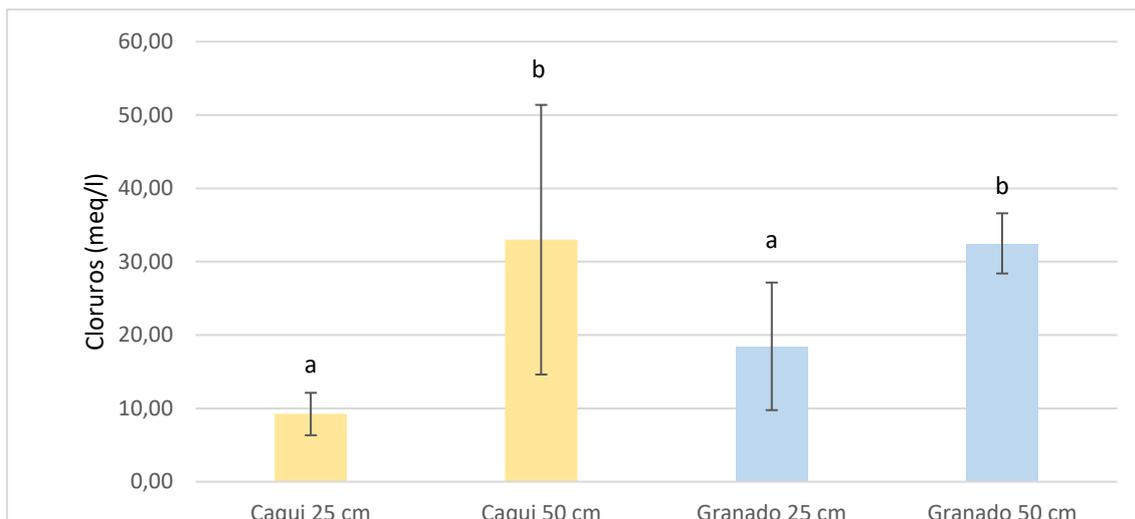


Figura 15 Valores medios de cloruro en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.1.13. SULFATOS

Los valores medios de sulfatos obtenidos se muestran en la figura 16, en la parcela de caqui se ha obtenido un valor medio de 2,49 meq/l (bajo) y en la parcela de granado 6,08 meq/l (bajo). A la profundidad de 50 cm nos encontramos con valores medios de 6,69 meq/l (bajo) en la parcela de caqui y 6,08 meq/l (normal-alto) en la parcela de granado.

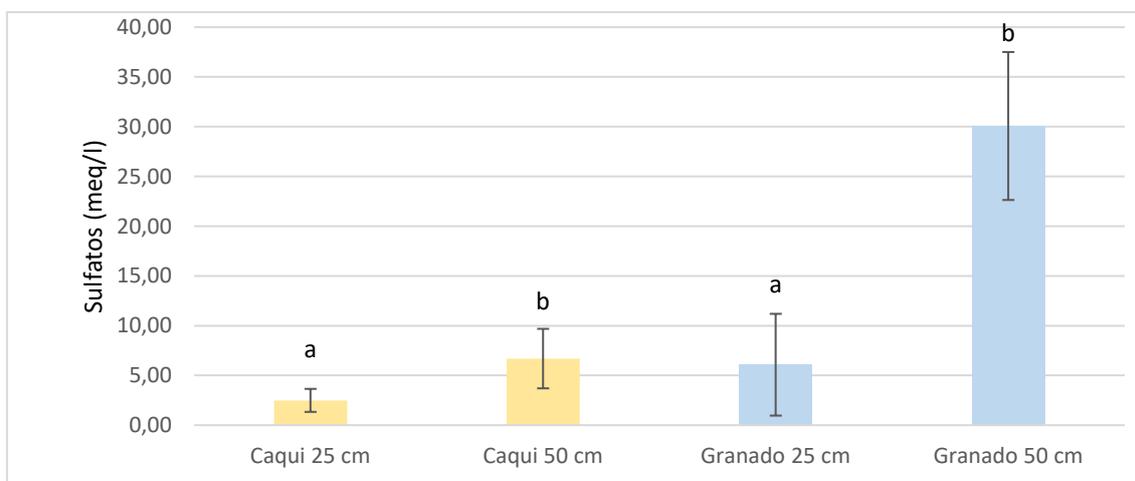


Figura 16 Valores medios de sulfatos en la parcela de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

Los valores de S y CV se muestran en la tabla 14. Los resultados se consideran heterogéneos en ambas parcelas (CV > 30%) a excepción de la parcela de granado a la profundidad de 50 cm.

Tabla 14 Coeficiente de variación (CV) de sulfatos en el cultivo de caqui y granado a la profundidad de 25 cm y 50 cm.

	Media	S	CV (%)
Caqui 25 cm	2,49	1,16	46,39
Caqui 50 cm	6,69	2,99	44,66
Granado 25 cm	6,08	5,12	84,16
Granado 50 cm	30,07	7,43	24,72

4.2. HOMOGENEIDAD DE LA PARCELA

Una vez mostrados todos los resultados obtenidos en el análisis de suelo se puede estudiar cómo de homogéneas son las parcelas. Los factores que afectan a la retención de agua son textura, materia orgánica y estructura (densidad aparente, porosidad, C_{Ee}, permeabilidad...) (Pascual y Pascual-Seva, 2020). El estudio de estos factores ha indicado que la parcela de caqui es homogénea por lo que se puede hacer un único manejo del riego en la parcela al igual que en la parcela de granado.

En cuanto a las propiedades químicas estos resultados han sido más heterogéneos, la explicación de esta heterogeneidad ha sido el punto de muestreo. En cada parcela hay dos zonas de muestreo, un punto es en la zona del bulbo húmedo (lugar de instalación de los sensores) y otra zona es el centro de la meseta. Los resultados obtenidos en el bulbo húmedo son claramente mayores a los obtenidos en el centro de la meseta, como es normal en el bulbo encontramos mayor cantidad de cationes y aniones fruto de la fertilización que se realiza, por eso se produce tanta variabilidad. A la vista de estos resultados, para ajustar un plan de abonado en cada cultivo, se recomendaría tomar de nuevo las muestras dentro del bulbo húmedo en todos los casos.

4.3. RECOMENDACIÓN DE TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO PARA EL MANEJO DEL RIEGO

4.3.1. RESULTADOS CAPACIDAD DE CAMPO

Para el manejo del riego es fundamental conocer los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) en cada uno de los suelos. En el presente TFM se han determinado a partir de los resultados obtenidos de las curvas de retención de humedad, que a su vez se han obtenido mediante la utilización de las Placas de presión y mediante los equipos Hyprop. Además, se ha determinado a partir del registro de datos de los sensores de humedad. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

4.3.1.1. SENSORES DE BAJO COSTE

En la figura 19 se muestra la evolución del contenido volumétrico de agua del suelo en la parcela de caqui a la profundidad de 25 cm y a la profundidad de 50 cm, desde el 1 de febrero al 1 de agosto mediante los sensores ECH2O EC-. En ellas además se muestra los valores determinados de CC para cada uno de los sensores. Por la propia definición del PM, mediante la utilización de sensores de humedad, no es factible determinar este valor, ya que conllevaría la marchitez irreversible del cultivo. La CC obtenida mediante sensores de bajo coste para la parcela de caqui en el tratamiento al 100% de la CC ha sido de 35% en el primer sensor y 27,55% en el segundo sensor, siendo la media de ambas repeticiones 31,27%. La CC en los sensores instalados a 50 cm se sitúa en un valor medio de 30,5% valor similar al de la profundidad de 25 cm puesto que tienen textura similar. Se observa, un menor contenido volumétrico a la profundidad de 50 cm en comparación con la profundidad de 25 cm, indicando que no se está perdiendo agua en profundidad.

En la figura 20, se muestra la evolución del contenido volumétrico de agua del suelo en la parcela de granado a la profundidad de 25 cm y a la profundidad de 50 cm, desde el 1 de febrero al 1 de agosto. En ellas además se muestra los valores determinados de capacidad de campo para cada uno de los sensores. Para la parcela de granado la capacidad de campo se sitúa en valores de 26,5% y 24,58% , siendo el valor medio de 25,5%. La CC media en los sensores instalados a 50 cm se sitúa en 24 %.

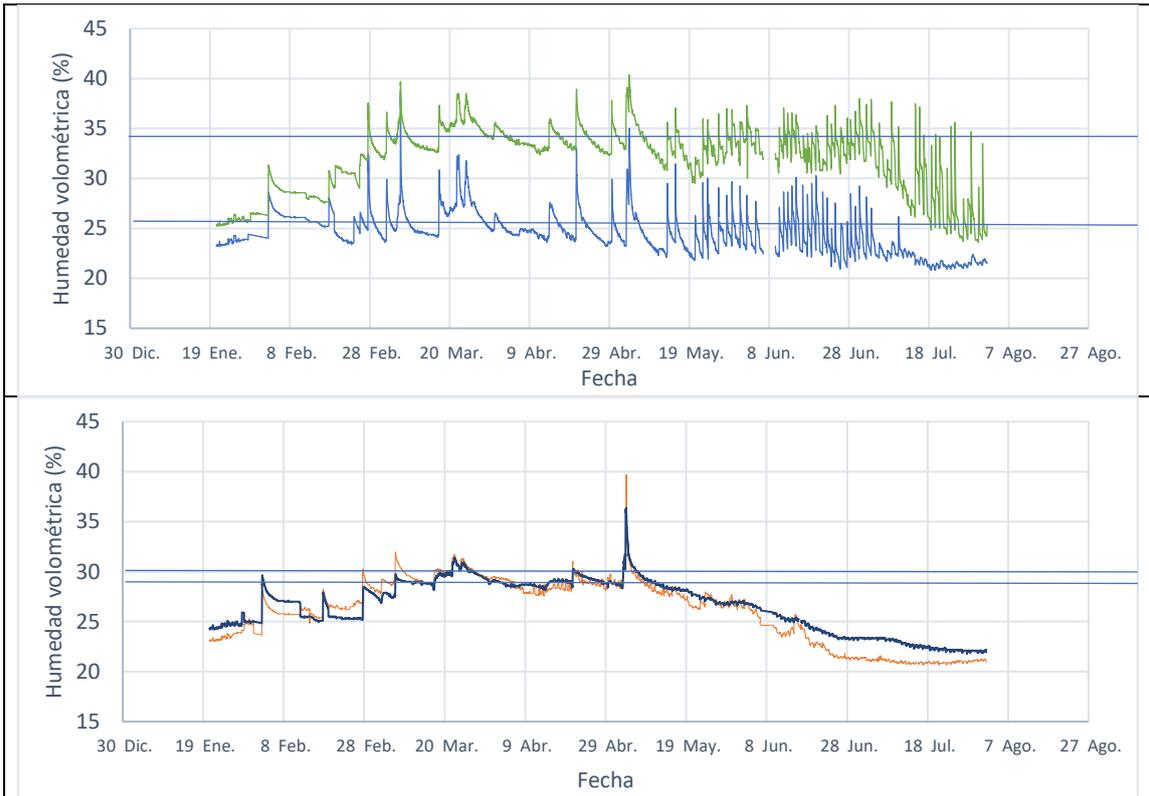


Figura 17 Evolución de la humedad volumétrica en los sensores instalados en la parcela de caqui a 25 cm de profundidad (arriba) y a 50 cm de profundidad (abajo)

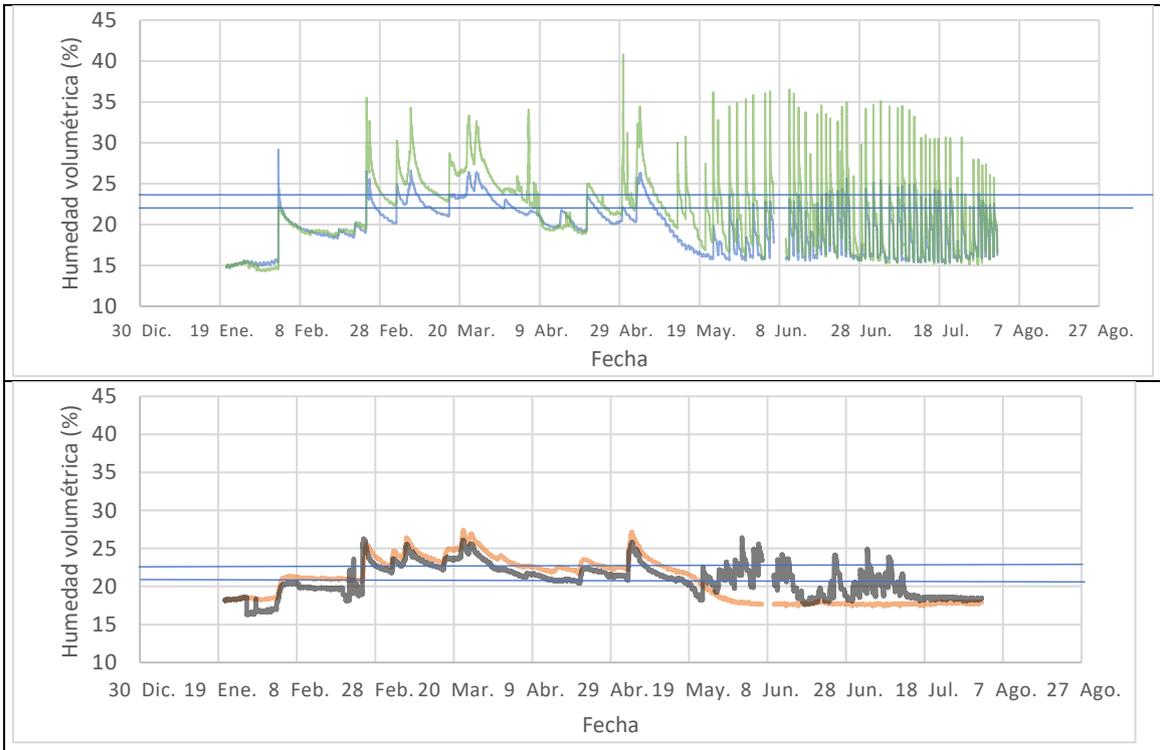


Figura 18 Evolución de la humedad volumétrica en los sensores instalados en la parcela de granado a 25 cm de profundidad (arriba) y a 50 cm de profundidad (abajo)

Si los comparamos con los datos dados por la empresa IKOS (figura 22) la CC en la parcela de caqui se situaría en torno a 29,3% y en la parcela de granado se situaría en un valor de 25,5%. Valores muy próximos en ambos casos.

4.3.1.2. PLACAS DE PRESIÓN

Los valores de CC obtenidos mediante la Placa de presión o Placa Richard's se corresponden a la presión de 0,1 bar, presión a la que se alcanza la CC en los suelos francos, las gráficas obtenidas en todas las muestras están incluidas en el anexo II. Los valores medios obtenidos en la parcela de caqui se muestran en la figura 17, el valor medio ha sido de 22,57% (valor a 25 cm profundidad) y de 26,32% para la parcela de granado (figura 18), ambos valores a una profundidad de 25 cm. A la profundidad de 50 cm los valores de CC se sitúan en 23,28% para caqui y 26,63% para granado, valores similares ya que las texturas son similares en ambas profundidades; a la profundidad de 50 cm en la parcela de caqui la porosidad es menor en comparación con la porosidad a 25 cm por ello la CC se sitúa un poco por encima. En la parcela de granado los valores de porosidad son homogéneos, así como los de densidad aparente por ello los valores de CC no varían en profundidad.

El punto de marchitez permanente (PM), se alcanza a la presión de 15 bar para la parcela de caqui el valor de PM medio se sitúa en 11,88% y en la parcela de granado se sitúa en 9,84%. El agua útil (AU) es la diferencia entre la CC y PM, para la parcela de caqui el AU se sitúa en valores de 10,69% y en la parcela de granado se sitúa en un valor de 16,49%.

Los resultados de homogeneidad se muestran en la tabla 15, se observa como todos los valores de CV son menores del 30% por lo que se pueden considerar como homogéneos.

Tabla 15 Coeficiente de variación (CV) de las presiones realizadas en las placas a presión en los cultivos de caqui y granado a la profundidad de 25 cm

CAQUI				GRANADO			
Presión	Media	Desviación	CV(%)	Presión	Media	Desviación	CV
0,1	22,57	2,62	11,59	0,1	26,33	4,09	15,55
0,33	18,57	1,01	5,46	0,33	19,23	1,77	9,21
1	15,25	1,86	12,18	1	14,98	0,79	5,29
3	13,92	1,53	10,96	3	11,70	0,90	7,69
15	11,88	1,53	12,87	15	9,84	1,16	11,81

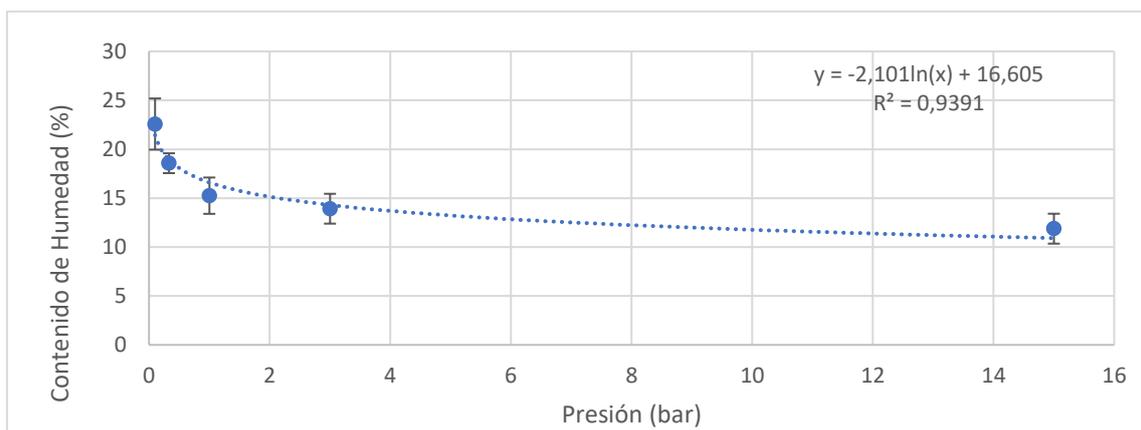


Figura 19 Curva de retención de humedad media a la profundidad de 25 cm en la parcela de caqui. La línea de puntos corresponde a la línea de tendencia y la ecuación corresponde al modelo logístico aplicado a los valores medios. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

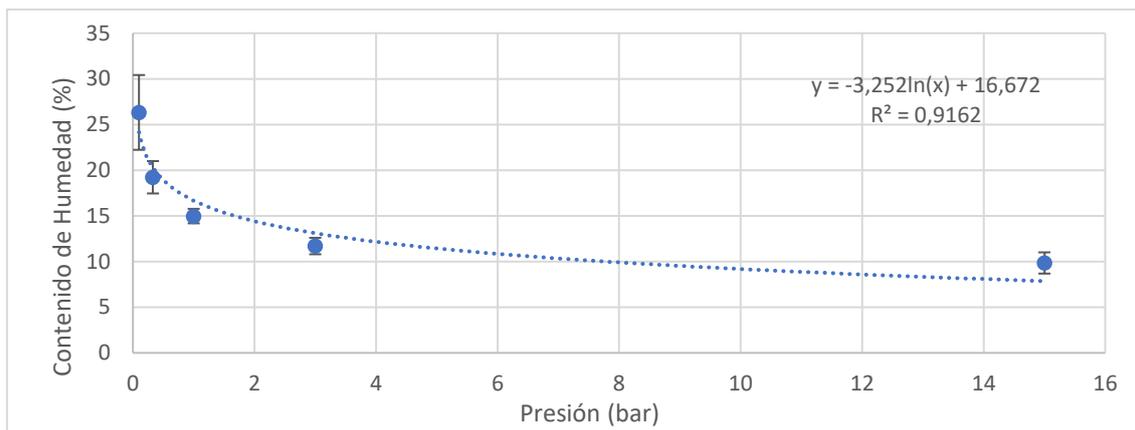


Figura 20 Curva de retención de humedad media a la profundidad de 25 cm en la parcela de granado. La línea de puntos corresponde a la línea de tendencia y la ecuación corresponde al modelo logístico aplicado a los valores medios. Las barras de error corresponden a la desviación estándar de las muestras.

4.3.1.3. HYPROP

Los datos obtenidos en el HYPROP son los siguientes. La figura A3 del anexo III corresponde a la referencia 12377, punto de muestreo donde se encuentra el sensor instalado en la parcela de caqui. Del HYPROP obtenemos una gráfica donde nos muestra valores de contenido de humedad en % en función del potencial de matriz (pF), valor negativo de la tensión, este valor de pF es el logaritmo decimal de una columna de agua. Si determinamos la CC de la muestra en 0,33 Bar (330 hPa) y le aplicamos el logaritmo decimal, obtenemos un valor de pF de -2,5, obteniendo un valor de contenido de humedad del 31%.

Para la parcela de caqui la referencia utilizada ha sido la 12397, figura A9 del anexo III, punto de muestreo donde encontramos instalado los sensores. En este caso si seguimos el mismo procedimiento descrito en la parcela de caqui obtenemos un valor de CC del 24,5 %.

CUADRO RESUMEN DATOS DE CAPACIDAD DE CAMPO

Tabla 16 Cuadro resumen CC a la profundidad de 25 cm en las parcelas de caqui y granado

	EC-5 25 cm	IKOS	PLACA25 cm	HYPROP
Caqui	31,27%	29,3%	22,45%	31%
Granado	25,5%	25,5%	24,53%	24,5%

Tabla 17 Cuadro resumen CC a la profundidad de 50 cm en las parcelas de caqui y granado

	EC-5 50 cm	PLACA 50 cm
Caqui	30,5 %	23,28 %
Granado	24 %	27,74 %

A la vista de los resultados presentados en las tablas 16 y 17, se observa que, en la parcela de caqui, el valor de la CC obtenido, tanto a 25 como a 50 cm de profundidad, está en torno al 30% cuando se determina a partir del registro de datos de humedad o mediante muestra inalterada con el sistema HYPROP; en cambio este valor desciende al 23% al utilizar muestras alteradas en las Placas de presión. En el cultivo del granado, los valores obtenidos a 25 cm indican que la CC corresponde a un contenido de humedad del suelo del 25%. Mayor variabilidad se observa a 50cm de profundidad, presentando un rango entre 24% Y 28%.

4.3.2.COMPARACIÓN SENSORES DE BAJO COSTE

Como se puede observar en las figuras 19 y 20, dos sensores situados en suelos en condiciones equivalentes pueden mostrar resultados ligeramente diferentes (mayores o menores valores). Para poder comparar ambos sensores, como repeticiones que son, es necesario transformar las gráficas de retención de humedad en gráficas de humedad respecto de la capacidad de campo determinada anteriormente dado que al estar utilizando la calibración de fábrica.

La figura 21 corresponde a la evolución de la humedad volumétrica respecto a la CC en la parcela de caqui a una profundidad de 25 cm, cada línea corresponde a un sensor diferente, los riegos de media en el sensor azul nos indica que estamos regando en valores de entre 80 y 85% de la CC, descendiendo ligeramente en la última fase analizada. En el sensor verde nos situamos en valores entre 87 y 90%, aunque a partir del 8 de julio muestra una tendencia a la baja situándose en valores de entre 70 y 75% de la CC. Estos sensores se utilizan para comparar los valores que nos dan la empresa contratada cuyos sensores sí se utilizan para la determinación de la frecuencia y dosis de riego. En base a estos resultados sería conveniente revisar la instalación del sensor mostrado en línea azul y de los emisores situados cerca de él dado que el incremento de humedad registrado en cada riego parece mínimo, lo que lleva a pensar que el agua de riego no está alcanzando al sensor. Esto puede ser debido a la situación del emisor con relación al sensor, o por algún problema en el emisor (emisor cercano al sensor esté obstruido o que haya escorrentía de la lámina de agua al encontrarse los árboles sobre mesetas tal y como se registra en el sensor representado en verde). Los sensores de humedad pueden ayudar a detectar problemas en el sistema de riego. El hecho de tener dos, o más, repeticiones nos permite comparar el comportamiento de los datos registrados y detectar estos problemas. En la figura se observa además que entre 6 y 9 de junio hubo un problema con el sistema, no registrándose los datos de humedad correspondientes.

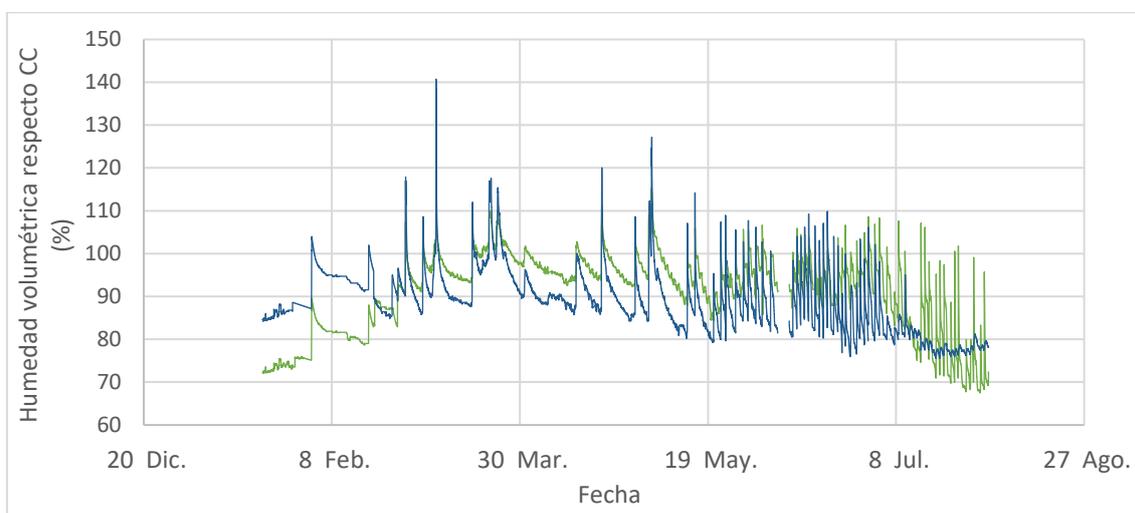


Figura 21 Evolución de la humedad volumétrica respecto a la CC en los sensores instalados en la parcela de caqui a 25 cm de profundidad

En la figura 22 observamos las gráficas dadas por la empresa IKOS para la misma parcela de caqui. En estas gráficas obtenemos valores de humedad y los valores de tensión registrados por los tensiómetros. Los valores de humedad respecto a la capacidad de campo se sitúan en valores próximos al 94% de la CC. Resultado superior a los obtenidos con los sensores ECH2O EC-5 para verificar los datos. Posiblemente se trate del tipo de sensor utilizado, con menores variaciones que los ECH2O EC-5. Los valores de tensión dados por esta empresa hasta el mes de mayo se sitúan en valores normales de CC, valores entre 0,1 y 0,33 Bar. Hay que remarcar que la primavera del año 2022 ha sido muy lluviosa en la zona, por lo que apenas se realizaron riegos, a partir del mes de mayo, ya con el riego normal, el valor de la tensión aumentó hasta los 0,8 Bar, muy lejos

del correspondiente a la CC. Por lo que sería conveniente revisar los tensiómetros ya que no parecen funcionar correctamente. Dado que los sensores de humedad instalados dentro de la misma estación muestran valores acordes a los registrados mediante los sensores ECH2O EC-5. No ha sido posible la obtención de los datos de los tensiómetros (aunque se han solicitado en repetidas ocasiones a la empresa), por lo que se hace imposible la comparación de estos valores con los obtenidos en los sensores de capacitancia. La disponibilidad de datos es un factor que se debe tener en cuenta a la hora de contratar un servicio para el manejo de riego en una explotación. En algunos casos, los datos registrados por las estaciones quedan registrados en la misma parcela mediante un datalogger, de donde se deben descargar presencialmente mediante un equipo propio. En otros casos, los datos son enviados telemáticamente a servidores de empresas externas que gestionan la información y que muestran de manera gráfica los valores registrados. Esto que puede ser una ventaja para productores y técnicos, por la facilidad de manejo de datos, puede no ser suficiente en el caso de los investigadores.



Figura 22 Valores de humedad y tensión empresa IKOS Caqui

Para poder transformar los valores de tensión dados por los tensiómetros a contenido volumétrico de agua en el suelo bastaría con introducir el valor de x correspondiente a la presión en bar en la ecuación de la recta ($y = -2,101\ln(x) + 16,605$) de la figura 17. Aunque la idea inicial era poder comparar los valores de humedad registrados por los dos tipos de sensores (de bajo coste) y los obtenidos matemáticamente al introducir los datos de tensión en la expresión anterior, no ha sido posible al no haber conseguido los datos de los tensiómetros.

Para la parcela de granado se ha obtenido los siguientes resultados; en la figura 23 podemos observar los valores de humedad respecto al porcentaje de CC; se comienza a regar cuando la humedad del suelo llega al 60% de la CC. Estos datos corresponden con los sensores ECH2O EC-5. Se puede observar, como en el caso del caqui, el fallo del sistema entre el 6 y el 9 de junio. Los registros de ambos sensores instalados a 25 cm de profundidad son más similares entre sí.

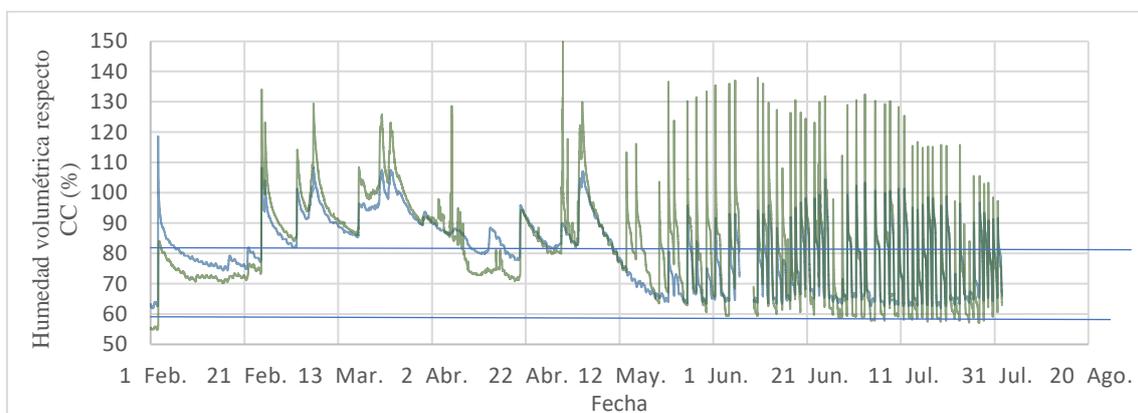


Figura 23 Evolución de la humedad volumétrica respecto a la CC en los sensores instalados en la parcela de granado a 25 cm de profundidad

Si comparamos estos resultados con los obtenidos por la empresa IKOS, figura 24, se observa como los valores de humedad respecto al porcentaje de CC son mayores que los sensores de la ECH2O EC-5, obteniendo valores del 78% de la CC. La diferencia de valores dado que el ECH2O EC-5, parece ser un sensor mucho más sensible que los instalados por IKOS, de ahí que exista esa diferencia en cuanto a los valores de humedad registrados. Como en el caso de caqui, los valores registrados por los tensiómetros durante la época de riego son exageradamente altos, en comparación con los valores de humedad registrados en la misma estación, lo que lleva a pensar, que sus medidas no son fiables.



Figura 24 Valores de humedad y tensión empresa IKOS Granado

En el caso del granado el control del riego se maneja con un tercer equipo de sensores, de la empresa Agrosensor, figura 25. De esta empresa tampoco se ha podido obtener los datos brutos de humedad. Esta empresa nos presenta los datos con unas unidades de humedad en el suelo no definidas, según comunicación personal de la empresa, se corresponden al agua acumulada en la franja del suelo correspondiente, aunque parece no ser exactamente estas unidades.

La tendencia desde finales de mayo a una profundidad de 50 y 60 cm está bastante estable, aunque baja ligeramente, lo que nos indica que no hay drenaje. La mayoría de los riegos alcanzan la profundidad de 40 cm. El riego se maneja en función del contenido de humedad a 10 y 20 cm, a esta profundidad la humedad aproximada es de 56 y 67 respectivamente. Se riega al 90 % de la CC, por lo tanto, sería 62 y 74 respectivamente.



Figura 25 Contenido de humedad Suelo dado por la empresa "Agrosensor" en Granado

Para el granado se ha seguido el mismo procedimiento que en caqui, para poder transformar los valores de tensión dados por los tensiómetros a contenido volumétrico de agua en el suelo bastaría con introducir el valor de x correspondiente a la presión en bar en la ecuación de la recta ($y = -3,252\ln(x) + 16,672$) de la figura 28.

5. CONCLUSIONES

De manera general, se puede concluir que ambas parcelas experimentales, según los datos expuestos, son homogéneas en cuanto a textura, materia orgánica y estructura (densidad aparente, porosidad, CEE, permeabilidad...). Desde el punto de vista de gestión del riego los parámetros importantes se muestran homogéneos por lo que la recomendación es gestionar de manera única cada una de ellas. Sin embargo, las parcelas parecen heterogéneas en cuanto a parámetros químicos (cationes y aniones), pero estos resultados parecen estar afectados por problemas de muestro. Para poder determinar si un único plan de fertilización sería suficiente para cultivo, sería necesario repetir los análisis poniendo especial énfasis en la toma de muestras.

Por otro lado, la recomendación sobre qué tecnología utilizar, la mejor respuesta se ha obtenido con los sensores de humedad, dado que los tensiómetros proporcionan lecturas fuera del rango esperable. Como se ha comentado, al tratarse de parcelas homogéneas se podrá gestionar las parcelas experimentales con una sola estación, aunque se recomienda instalar dos, o más sensores para detectar posibles problemas con la instalación de los sensores y/o de la instalación de riego.

Por otra parte, a la hora de instalar una estación de este tipo debemos conocer de manera clara, los datos que nos proporcionará la empresa gestora de la tecnología, pudiendo ser este un factor de decisión a la hora de elegir entre las distintas empresas que se encuentran hoy en día en el mercado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agustí, M. (2010). Fruticultura (2ª edición). Mundi- Prensa. Madrid. 507 pp.
- AQUASTAT (2022). FAO's Information System on Water and Agriculture <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexfra.stm>. (Consulta julio 2022)
- Badía, D. y Martí, C. (1999). Suelos del Pirineo Central. I.N.I.A.; U.Z. ; C.P.N.A.; I.E.A. Huesca. 190 pp.
- Baeza Cano R., Cánovas Fernández G., Alonso López F y Contreras París J.I.(2022) Uso de Tensiómetros Manuales y Electrónicos para la Gestión del Riego. Almería. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2020. 1-17 p. Formato digital (e-book) - (Agricultura y Medio Ambiente)
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54:464-465
- Caqui en la Comunidad Valenciana | GIP Caqui (IVIA). (s. f.). IVIA. Recuperado 1 de junio de 2022, de [http://gipcaqui.ivia.es/citricultura-valenciana#:~:text=El%20caqui%20\(Diospyros%20kaki%20Thunberg,sido%20tradicionalmente%20un%20cultivo%20menor](http://gipcaqui.ivia.es/citricultura-valenciana#:~:text=El%20caqui%20(Diospyros%20kaki%20Thunberg,sido%20tradicionalmente%20un%20cultivo%20menor).
- Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del suelo (Segunda ed.). Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. 393 páginas
- Chioffi, N. (1975). Geología aplicada a la ingeniería. Sao Paulo: Gremio Politécnico.
- CSR Servicios. (2006), Tabla de interpretación de extracto de la pasta saturada del suelo. Recuperado 5 de agosto de 2022, de http://www.csrsestados.com/CONSULTORIA_AGRICOLA/DESCARGAS/TABLA_INTERPRETACION_EPS_SUELO_CSR.pdf
- D.O.P. Kaki Ribera del Xúquer. (s. f.). Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Recuperado 15 de junio de 2022, de https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/calidad-diferenciada/dop-igp/frutas/DOP_Kaki.aspx
- Denominació d'origen Kaki Ribera del Xúquer – Historia. (s. f.). KAKIFRUIT. Recuperado 15 de junio de 2022, de <https://kakifruit.com/quienes-somos/historia/>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA) (1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Recuperado 20 junio de 2022, de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051284.pdf
- Duchaufour, Ph. (1987). Manual de Edafología. Ed. Masson. Barcelona. 214 pp.
- Eyherabide, M., Saíenz-Rozas, H., Barbieri, P. y Echeverría, H. (2014). Comparación de Métodos para Determinar Carbono Orgánico en Suelo. *Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 32(1): p 13- 19.
- FAO. (s.f.). Inicio | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAOHome. <https://www.fao.org/home/es>
- FAO. (s.f). Permeabilidad del suelo. Recuperado 4 de agosto de 2022, de https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- Ferré, P.A y Topp, G.C. 2002. “Time domain reflectometry”. In: Dana, J.H. & Topp, G. C. (Eds), *Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods*, p. 434-446. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- García-Serrano, P., Lucena, J., Ruano, S. y Nogales, M., (2010). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España, Parte I: El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España, 120 pp.
- Gaucher, G (1981). Les facteurs de la pédogénèse. Tome II. 30 pp.

- Gómez, A. C. y Marco, O. V. (1976). El caqui. Ministerio de Agricultura, Publicaciones de Extensión Agraria.
- Grupo de riegos, agronomía y medio ambiente. (2013). El uso del agua en la agricultura de regadío y la investigación pública. Gobierno de España.
- Hernández Aranda, B. (1999). El cultivo del caqui en la comunidad valenciana. Generalitat Valenciana Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado 20 junio de 2022 ,
¿<https://agroambient.gva.es/documents/163228750/167772283/El+cultivo+del+kaki+en+la+Comunidad+Valenciana.pdf/b7cb3c4c-b38a-44f1-94d7ab80b8244b9b?t=1422957370582#:~:text=En%20estos%20momentos%20el%20caqui,pero%20con%20una%20menor%20presencia>
- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. McGraw-Hill. New York. 281 pp.
- López, M.Y. Moreno, A. (2015). El granado: variedades, técnicas de cultivo y usos. Madrid. Mundi-Prensa.
- Malagón J., & Zamudio, M. A. F. (2018). El caqui en el mediterráneo español: aspectos botánicos, características agronómicas y costes de implantar el cultivo. *Agrícola vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*, (414), 347-352.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (1989). El suelo y los fertilizantes. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 283 pp.
- Mataix-Gato, E. (2015). La poda del caqui. *El cultivo del caqui*, 103-122.
- Melgarejo, P., y Salazar, D. M. (2004). Tratado de Fruticultura Para Zonas Aridas y Semiaridas - Volumen II. Mundiprensa.
- Melgarejo, P., y Valero, R. M. (1992). El granado. Mundi-Prensa.
- Melgarejo, P.2010. Conferencia general: el granado, su problemática y usos. En: I Jornadas Nacionales sobre el granado (recurso electrónico). Elche. SPE3.
- Moreno Caselles, J.; Moral Herrero, R.; Pérez Murcia, M. D. y Pérez Espinosa, A. (2000). Fundamentos de Edafología y Climatología. Editor Universidad Miguel Hernández. España. 395 pp.
- Moreno, H. [Universitat Politècnica de València-U. (2011, 29 septiembre). Determinación de Calcio en aguas. © UPV [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ogcF-YHYurM>
- Moreno, H. [Universitat Politècnica de València-U. (2011, 29 septiembre). Determinación de Magnesio en aguas. © UPV [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=JuaMNw_nHDo
- Moreno, H. [Universitat Politècnica de València-U. (2011, 29 septiembre). Determinación de Sulfatos en aguas. © UPV [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=sHiEjdoSFUA>
- Moreno, H. [Universitat Politècnica de València-U. (2016, 28 enero). Determinación en aguas de Carbonatos y Bicarbonatos. © UPV [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=e0RXip8UwWQ>
- Moreno, H. [Universitat Politècnica de València-U. (2016, 28 enero). Determinación en aguas de Cloro. © UPV [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=SYnTdobfVAI>
- Navarro Caballero, M.T. (2020). Reutilización de aguas regeneradas: aspectos tecnológicos y jurídicos. Ed. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Murcia.
- Pascual España, B.; Pascual Seva, N. (2020) riegos de gravedad y a presión (4ª ed.) Valencia: editorial Universitat Politècnica de València.
- Porta Casanellas, J.; López-Acevedo Reguerín, M. y Roquero de Laburu, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 929 pp.
- Rico Rodríguez, A., y Del Castillo, H. (2001). La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas (Vol. 1). México: Limusa.
- Romero, P., Navarro, J.M., Pérez-Pérez, J.g., García-Sánchez, F., Gómez-Gómez, A., Porttas, I., Martínez, V., Botía, P. (2006). Déficit irrigation and rootstock: their effects on

- wáter relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of Clemenules mandarin, *Tree Ohysiology*, nº 26, pp. 1537 -1548.
- Rotativo, E. (2016, 30 diciembre). El caqui se reivindica en la Comunitat Valenciana. El Rotativo. Recuperado 16 de junio de 2022, de <https://medios.uchceu.es/elrotativo/2016/12/30/el-caqui-se-reivindica-en-la-comunitat-valenciana/#:%7E:text=Los%20asi%C3%A1ticos%20lo%20descubrieron%20en,es%20un%20fruto%20m%C3%A1s%20importante.>
 - San Bautista, A (2022); “Fitotecnia general: Fertilización de suelos y plantas (PDF)”. Universidad Politécnica de Valencia (UPV).
 - Sentek. 1999. Diviner 2000. Guía del usuario. Versión 1.0
 - Suministros de Laboratorio Kasalab S.A.S. (2018, 26 marzo). Fotometro De Llama, Análisis De Sodio Potasio Calcio Y Litio, Espectroscopia Atomica. Kasalab. Recuperado 14 de julio de 2022, de <https://www.kasalab.com/producto/fotometro-de-llama/>
 - 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.
 - Thompson, L. M. y Troeh, F. R. (1982). Los suelos y su fertilidad. 4ª Edición. Ed. Reverté. Barcelona. 649 pp.
 - USDA; “Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys”. Segunda edición, 1999, págs.: 869. Disponible en: <http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/>
 - Vendrell Verdú, M. (2017, abril). El “milagro” del caqui en Valencia. Un caso de innovación abierta y colaborativa de liderazgo cooperativo. Universidad Politécnica de Valencia.
 - White, R. E. (2000). Principles and practice of soil science. The soil science. The soils a natural resource. Blackwell Science. 348 pp.

ANEXO I VALORES DE REFERENCIA UTILIZADOS EN LOS ANALISIS DE SUELO

Tabla A 1 Valores de referencia Materia Orgánica según el tipo textura de suelo

Apreciación	Tasa de materia orgánica según el tipo de suelo		
	Suelo ligero	Suelo medio	Suelo pesado
Débil	< 0,8	< 1,2	< 2
Normal	1,2 – 1,5	1,8 – 2,3	2,5 – 3,0
Elevado	>2	>3	>3,5

Fuente: San Bautista, (2022)

Tabla A 2 Valores referencia Extracto Pasta Saturada del suelo

ELEMENTO	BAJO	NORMAL	ALTO
Calcio (meq/l)	<5	>5	>20
Magnesio (meq/l)	<2,5	>2,5	>10
Sodio (meq/l)		<7	>15
Potasio (meq/l)	>1	>2	>5
Nitratos (meq/l)	>2	>8	>8
Cloruro (meq/l)	<5	<15	>25
Sulfatos (meq/l)	<10	<30	>30
Bicarbonatos (meq/l)	<0,1	<5	>5

Fuente: csr servicios, (2006)

Tabla A 3 Valores de referencia Densidad Aparente según textura de suelo

Textura de suelo	Densidad aparente ideal para el crecimiento de las raíces (gr/cm ³)	Densidad aparente que afecta al crecimiento de raíces (gr/cm ³)
Arenoso, Franco arenoso	<1,6	>1,8
Franco arenoso, Franco	<1,4	>1,8
Franco arcillo arenoso, Franco arcilloso	<1,4	>1,75
Limoso, franco limoso	<1,4	>1,75
Franco arcillo limoso	<1,4	>1,65
Arcillo arenoso, arcillo limoso, franco arcilloso	<1,1	>1,58
Arcilloso	<1,1	>1,47

Fuente: USDA, (2015)

Tabla A 4 Clases de permeabilidad de los suelos

Clases de permeabilidad de los suelos	índice de permeabilidad	
	cm/hora	cm/día
Muy lenta	<0.13	<3,0
Lenta	0,13-0,3	3-12
Moderadamente lenta	0,5-2,0	12-48
Moderada	2,0-6,3	48-151
Moderadamente rápida	6,3-12,7	151-305
Rápida	12,7-25	305-600
Muy rápida	>25	>600

Fuente: FAO, (s.f)

Tabla A 5 Valores de referencia CEe

CEe (dS/m)	Clasificación
2	No salino
2-4	Ligeramente salino
4-8	Salino
8-1,6	Muy salino

Fuente: Yanez (1989)

Tabla A 6 Valores de referencia Carbonatos

Carbonatos (%)	Clasificación
0%-5%	Muy bajo
5%-10%	Bajo
10%-20%	Normal
20%-40%	Alto
>40%	Muy alto

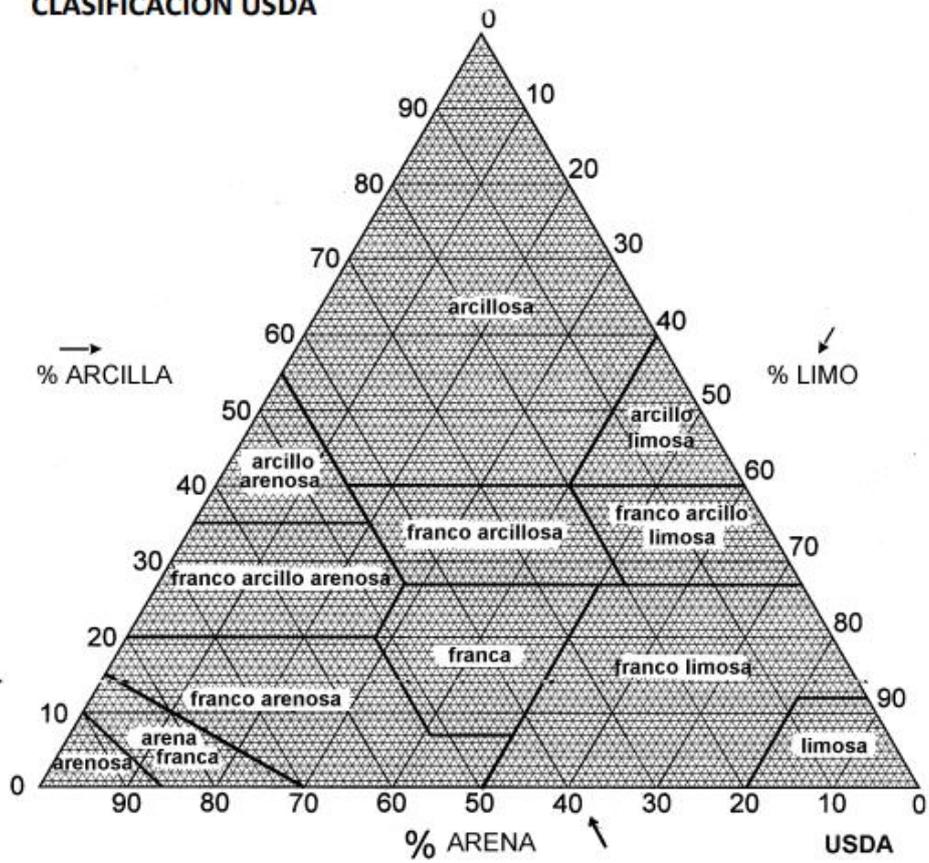
Fuente: Yanez (1989)

Tabla A 7 Valores de referencia pH suelo

Valor pH	Clasificación
<5	Fuertemente ácido
5-6	Francamente ácido
6-6,6	Ligeramente ácido
6,6-7,3	Neutro
7,3-7,7	Ligeramente básico
>7,7	Básico

Fuente: Yanez (1989)

CLASIFICACIÓN USDA



Tamaño de partículas en mm	
< 0'002	Arcilla
0'002 - 0'05	Limo
0'05 - 2.0	Arena

Figura A 1 Triangulo de texturas clasificación USDA

DIAGRAMA SEMILOGARÍTMICO

UD. Suelos -UPV

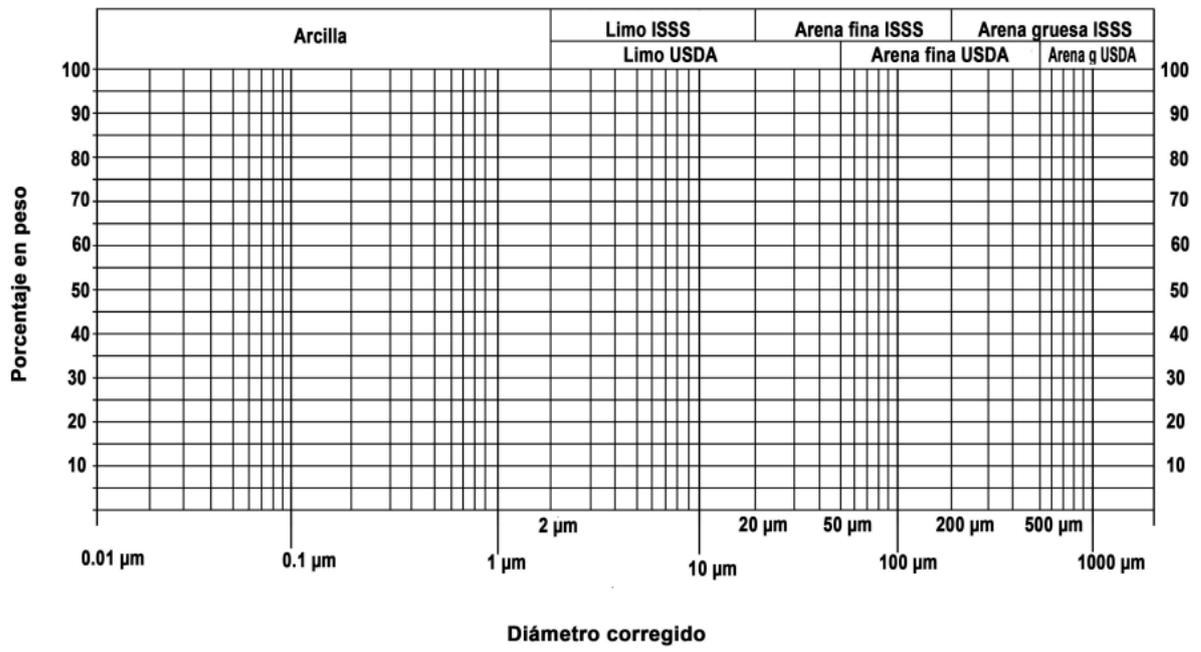
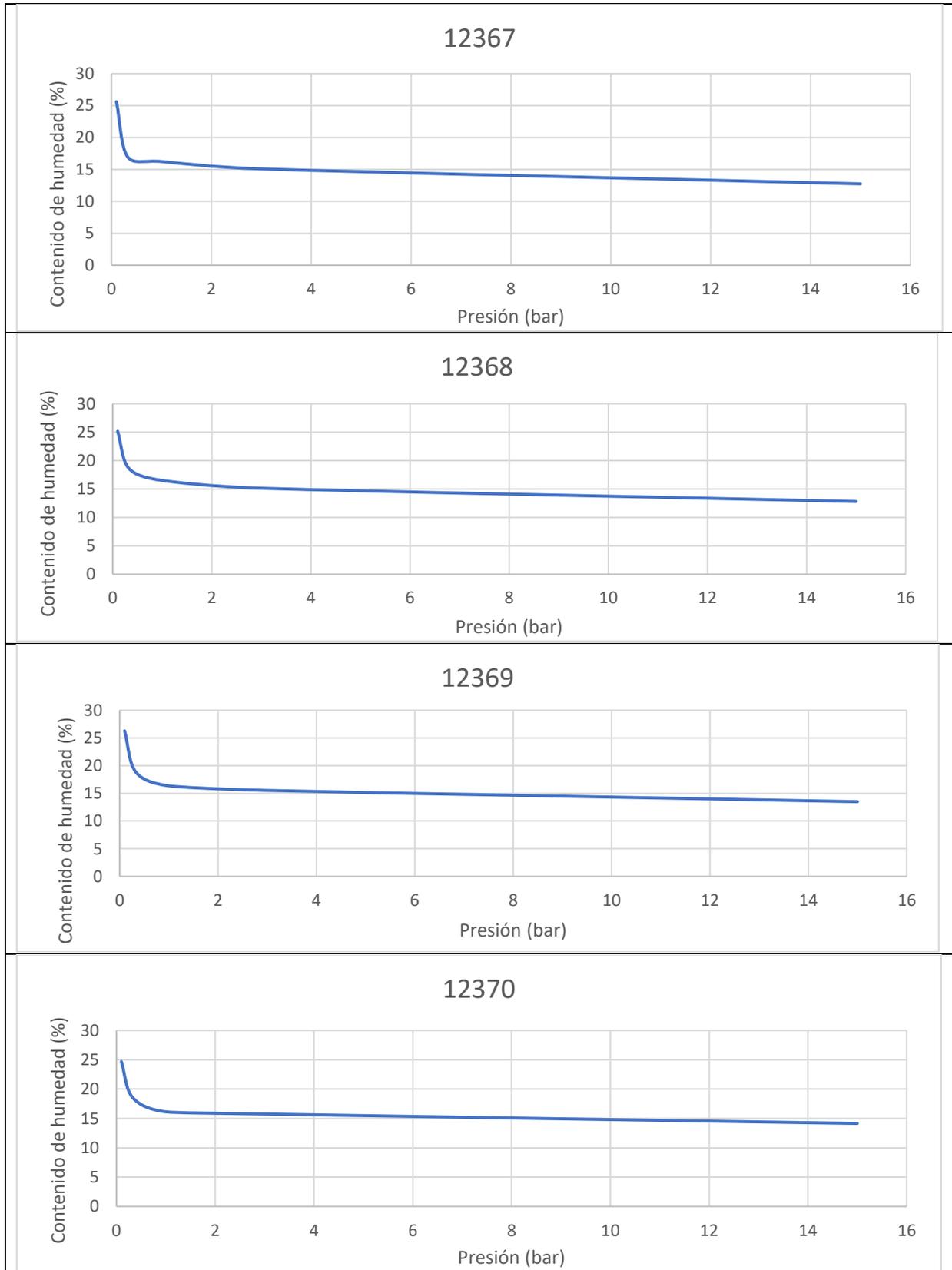
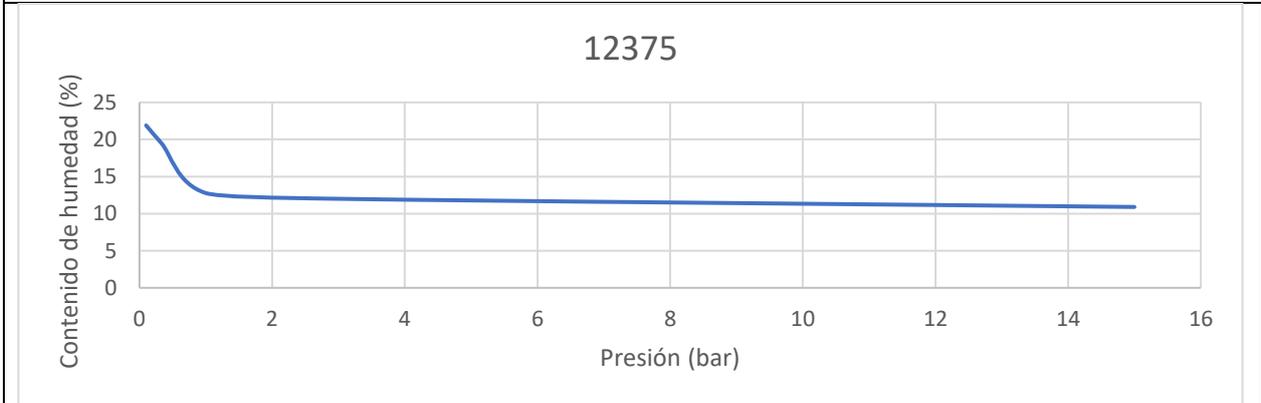
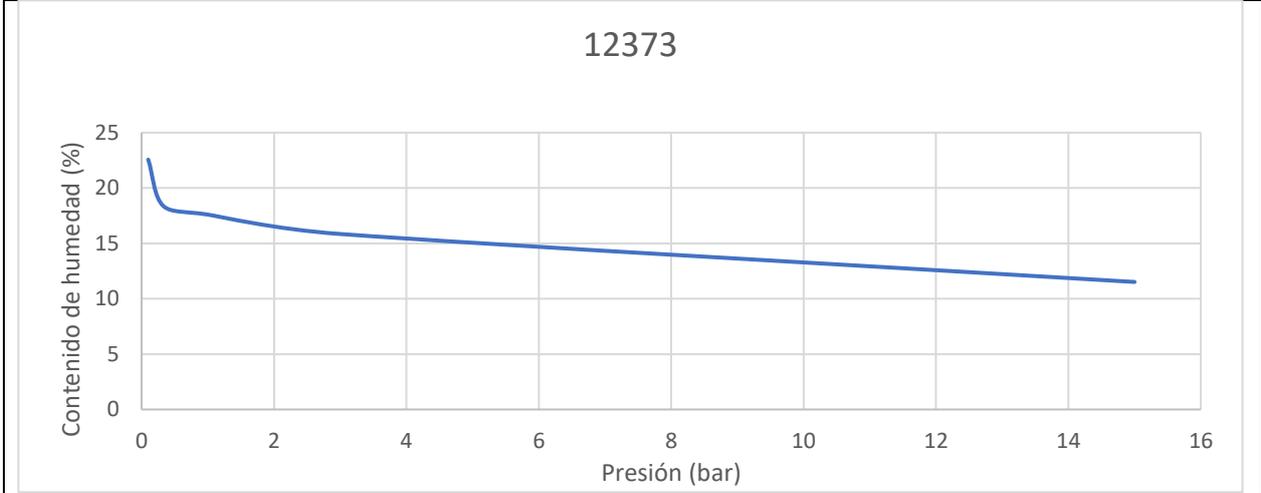
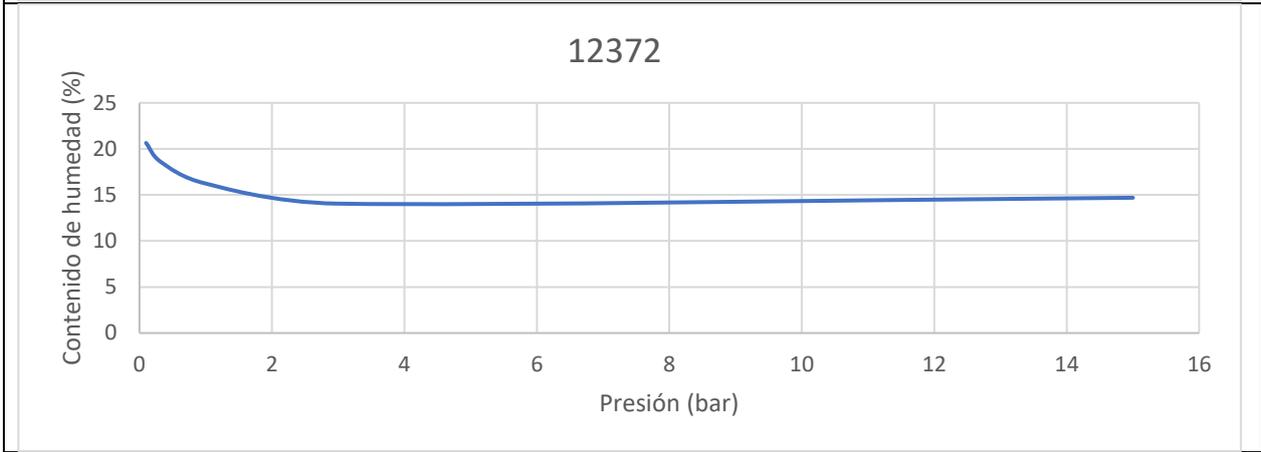
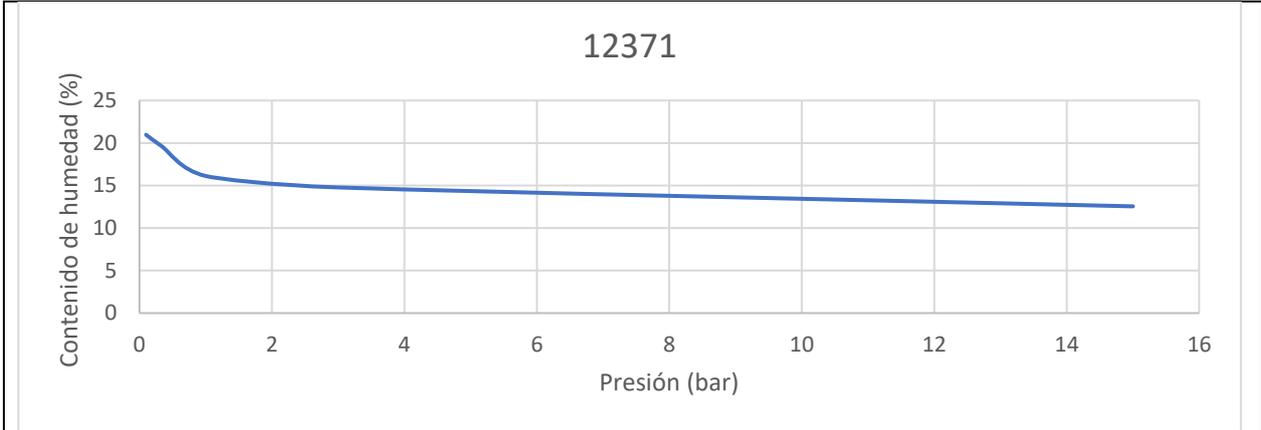
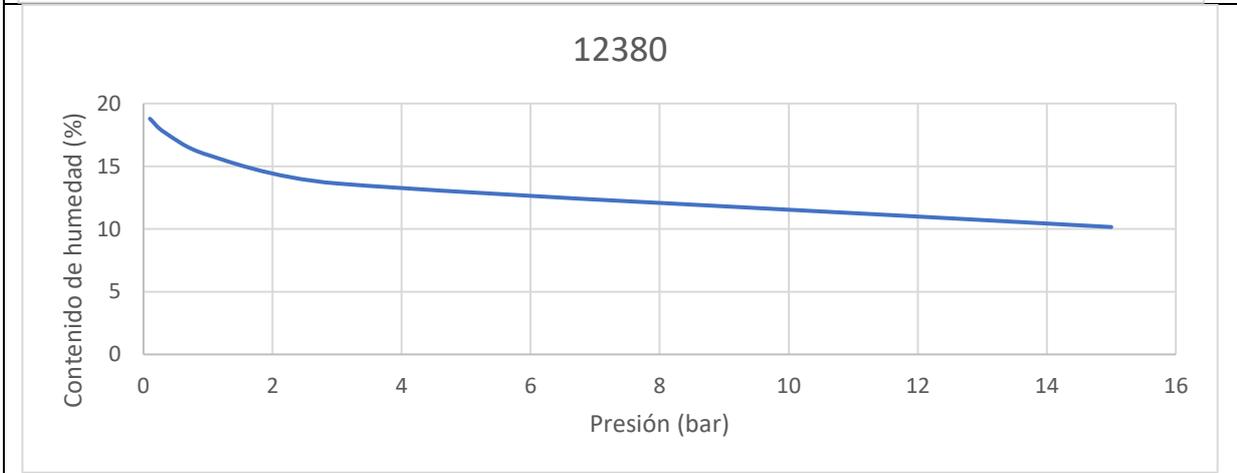
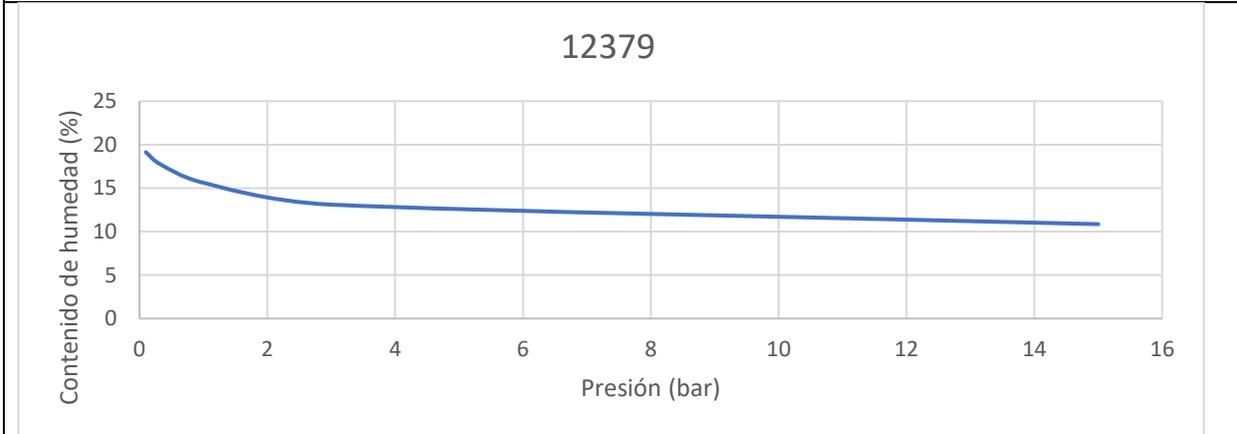
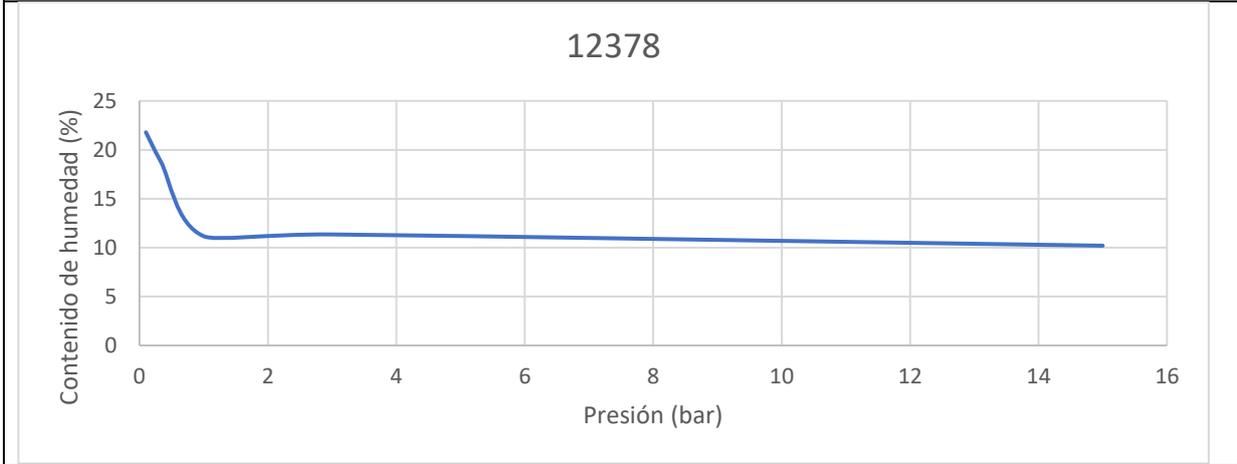
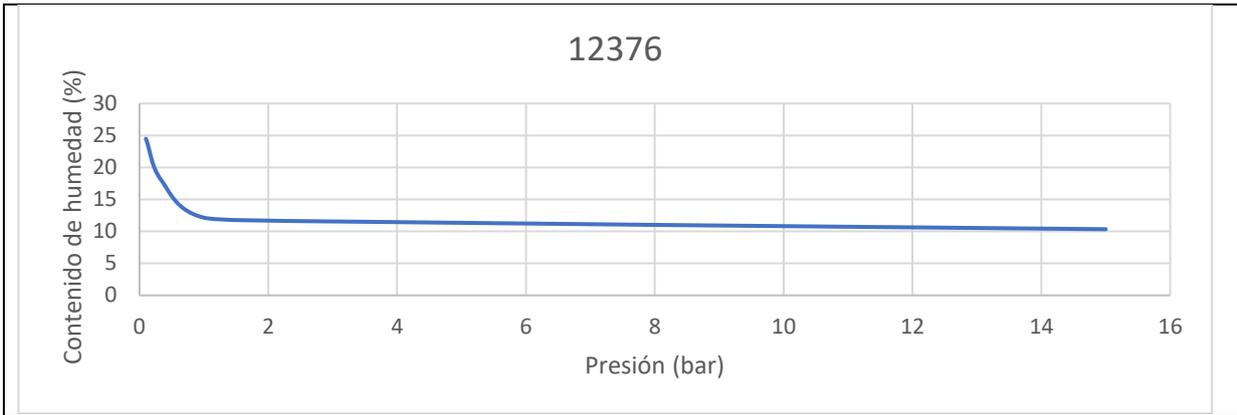


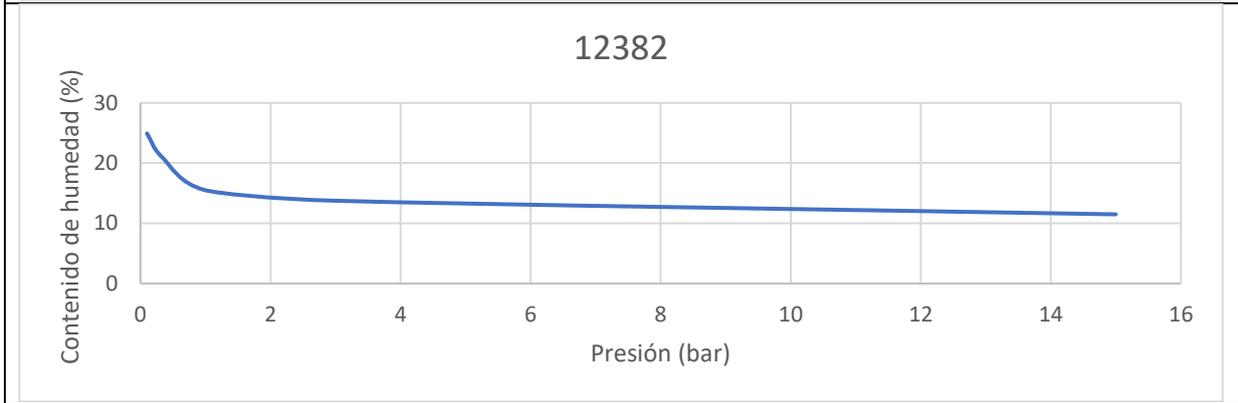
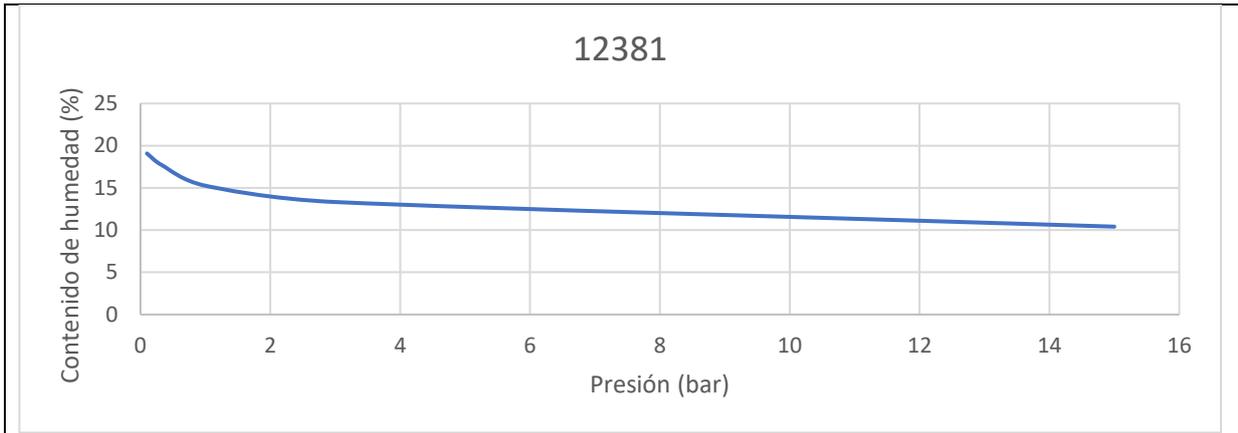
Figura A 2 Diagrama semilogarítmico UD suelos UPV

ANEXO II: PLACAS DE PRESIÓN
Curvas de retención de humedad parcela caqui según referencia de laboratorio
(Profundidad 25 cm)

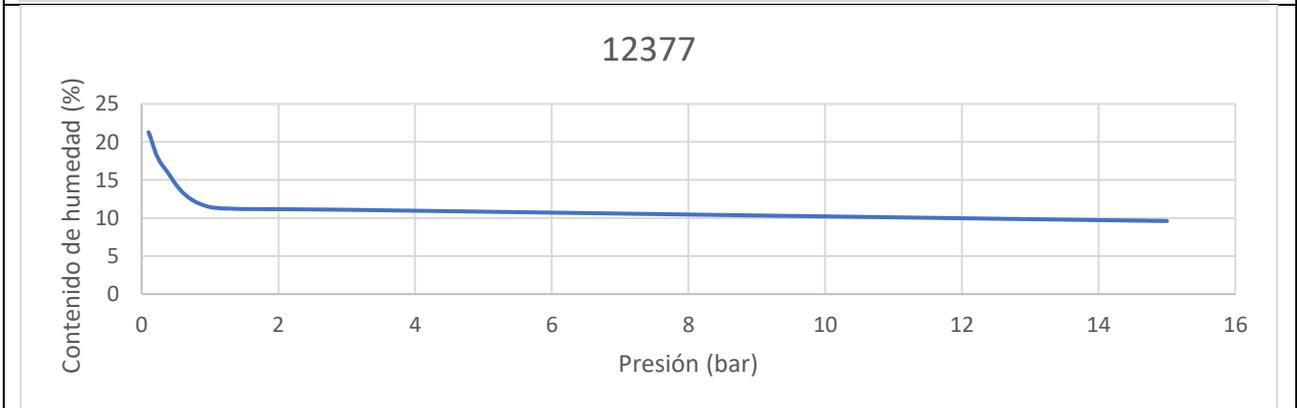
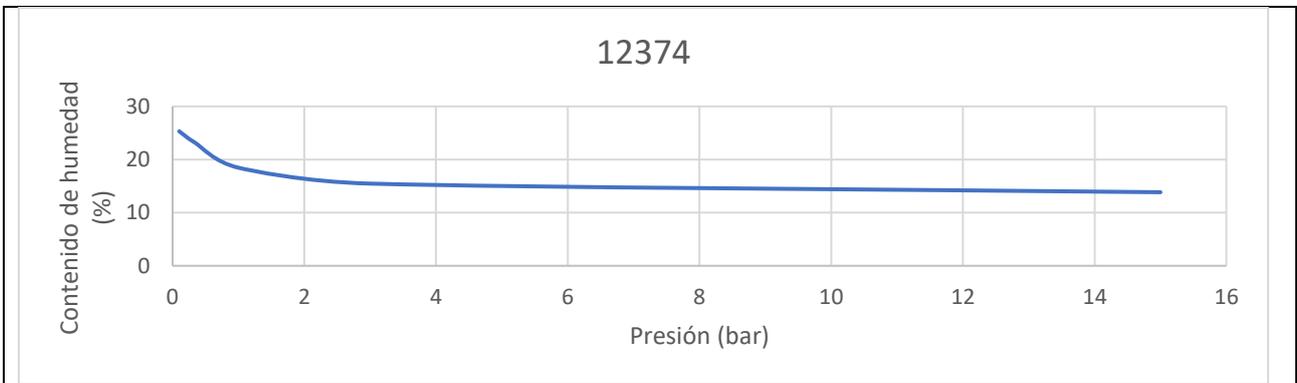




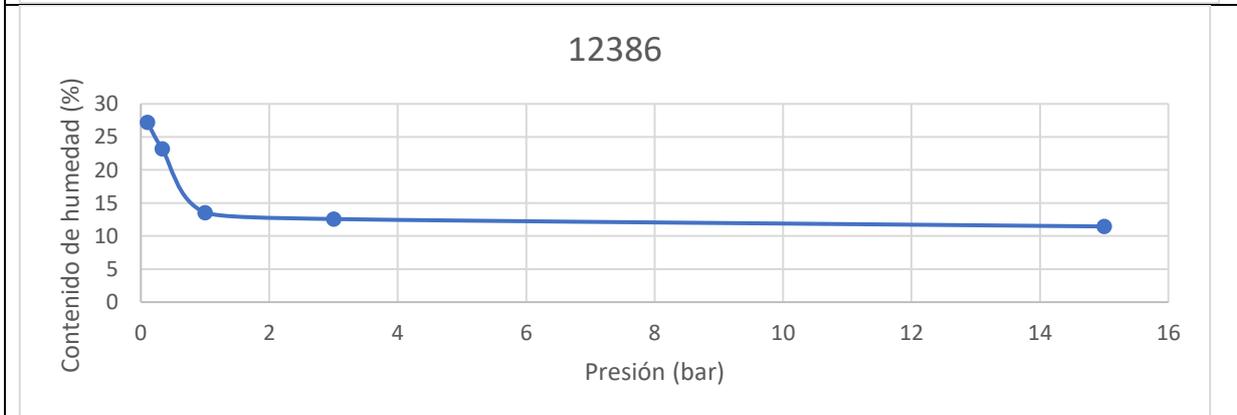
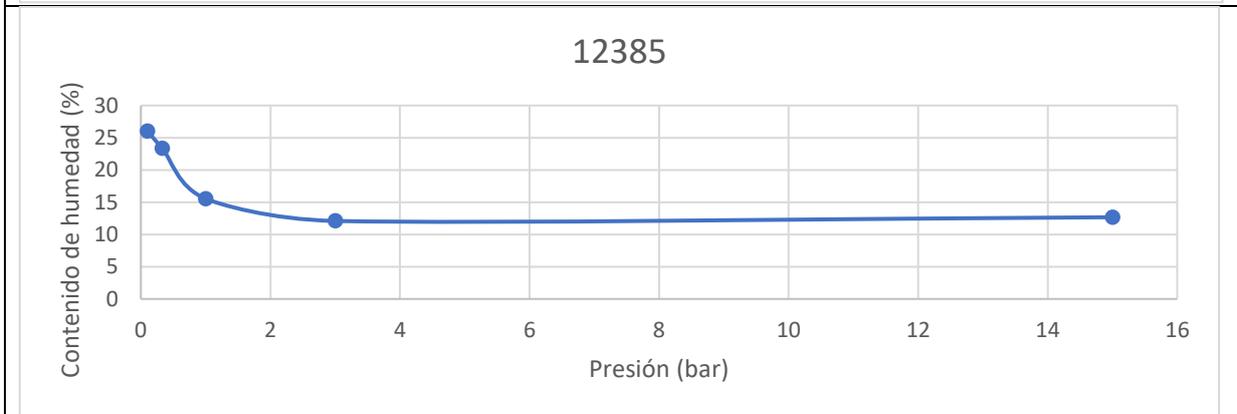
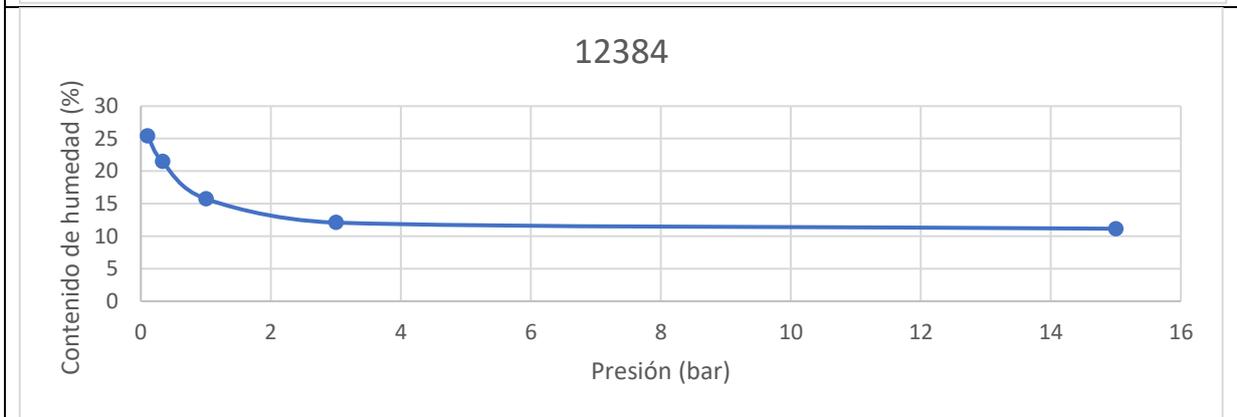
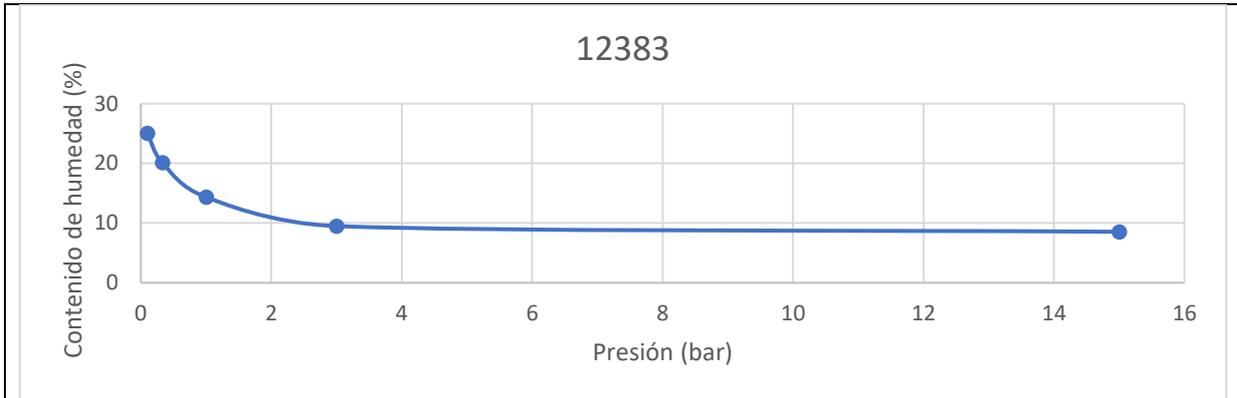


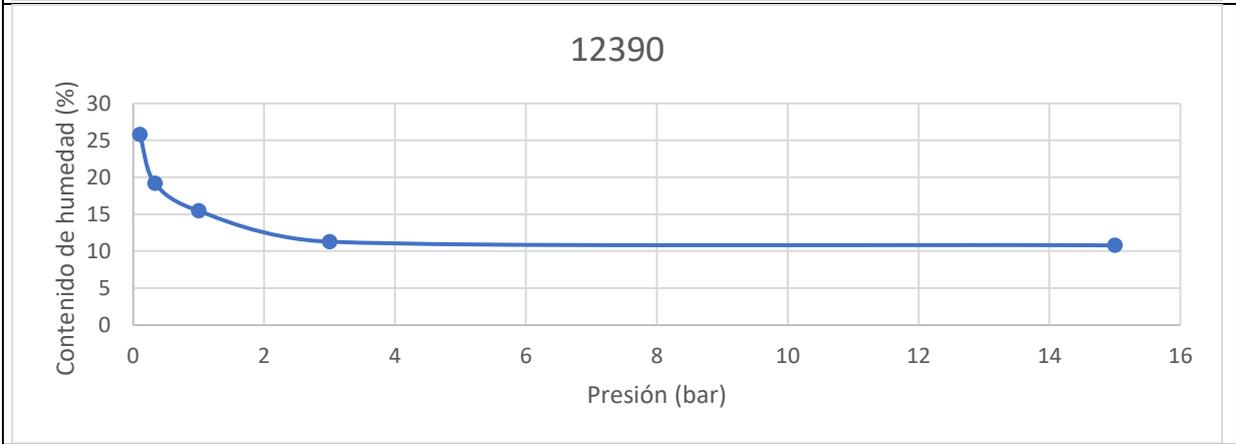
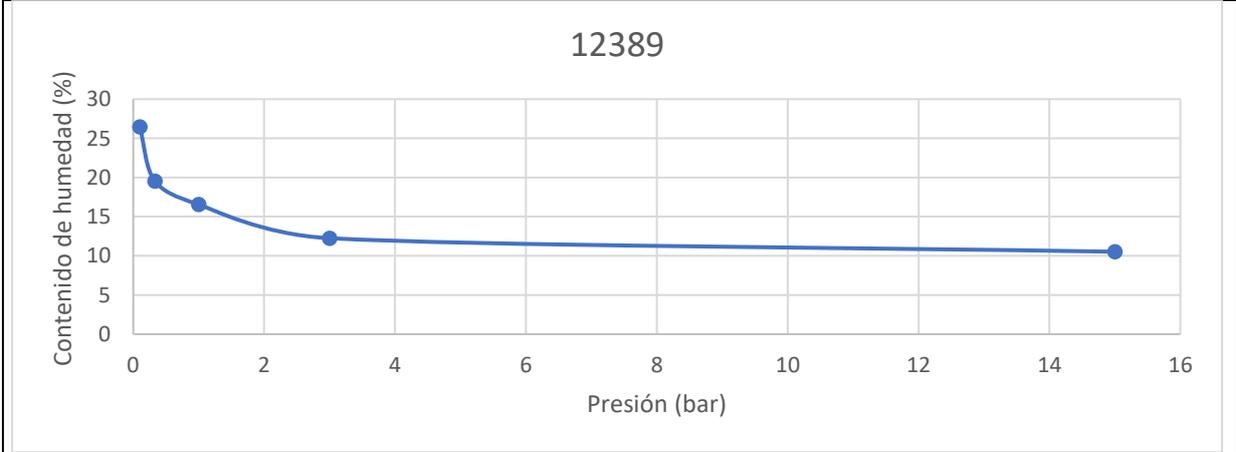
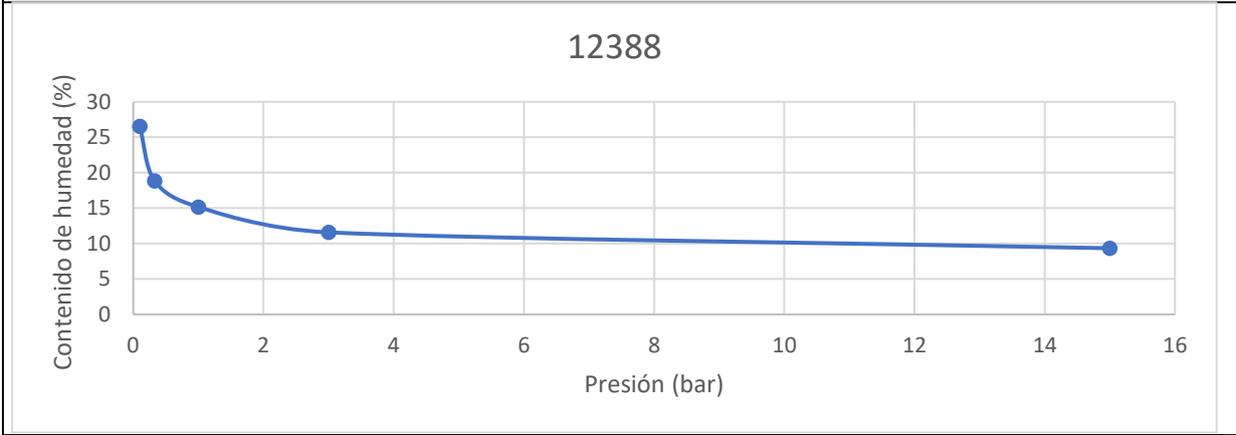
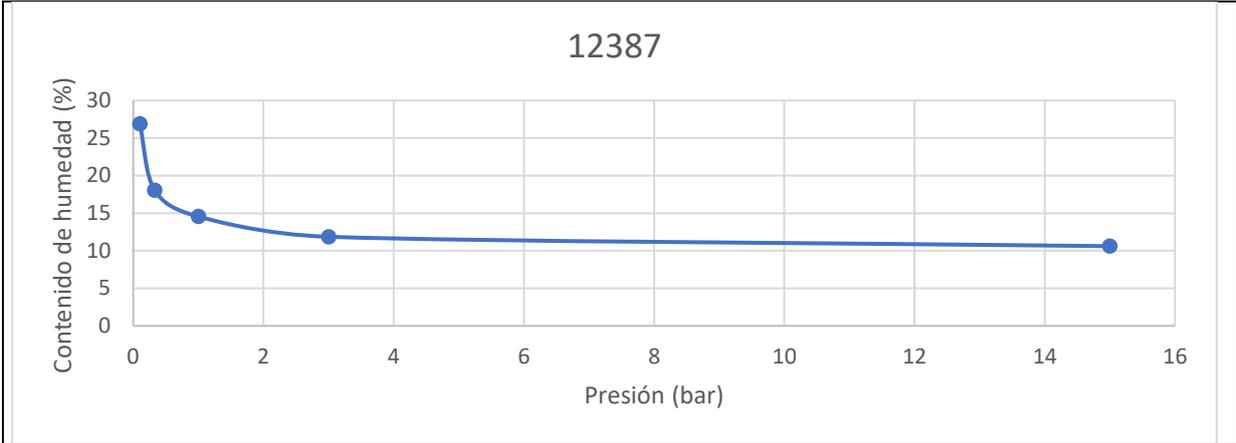


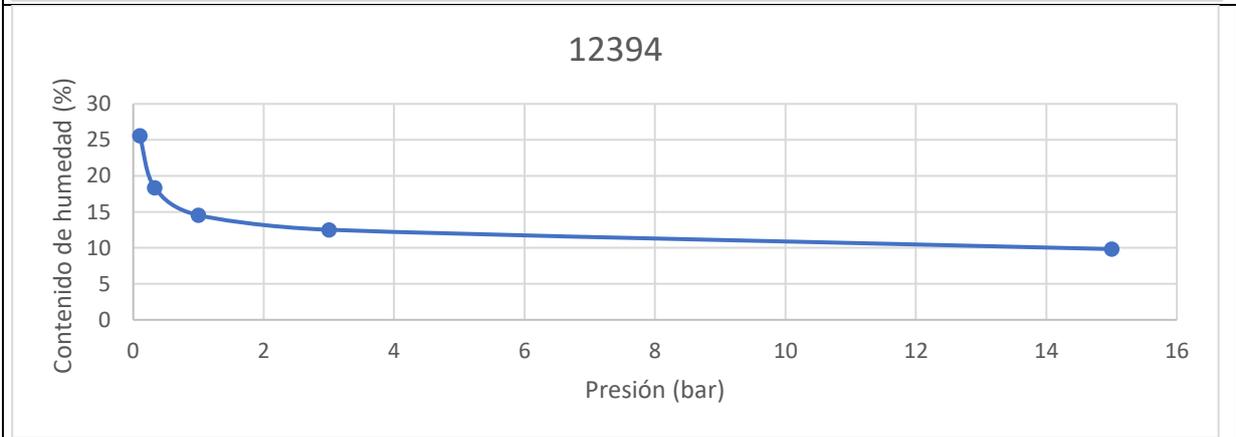
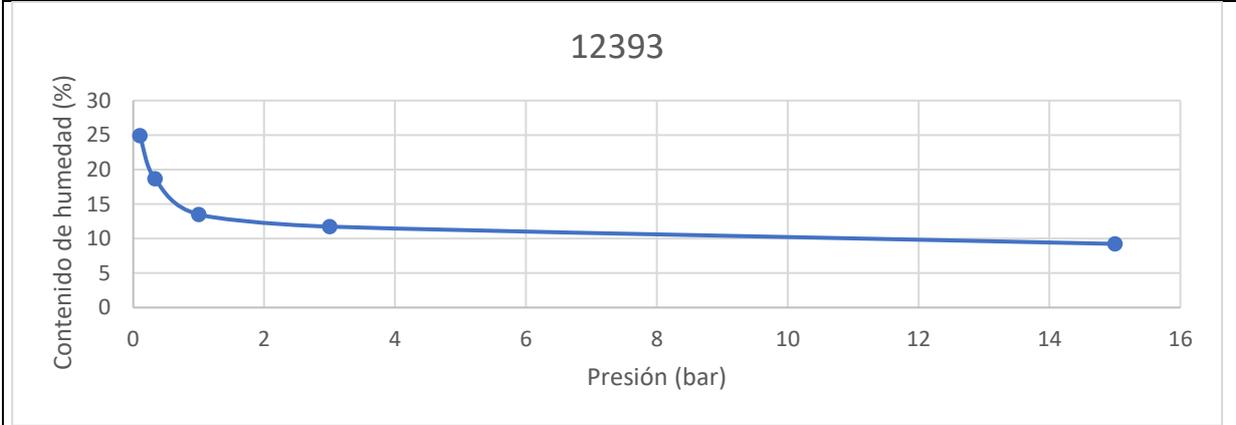
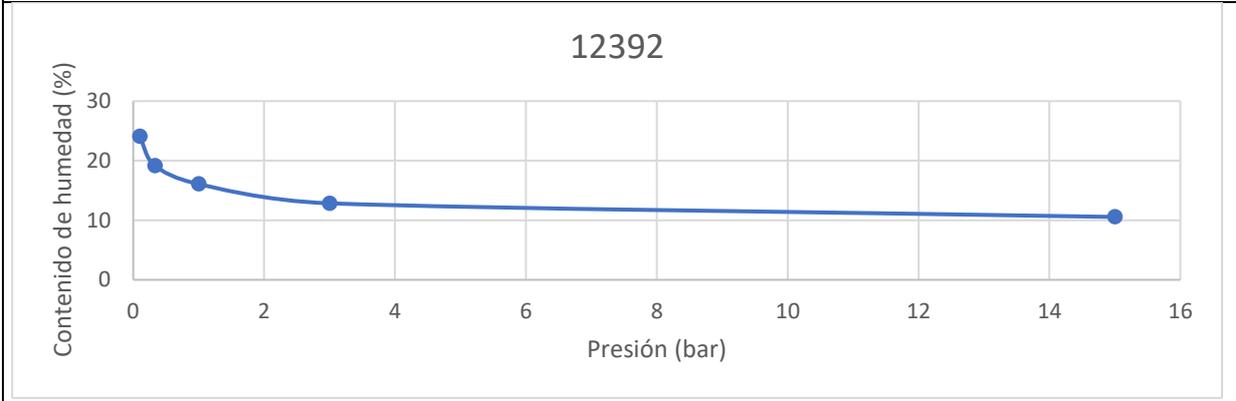
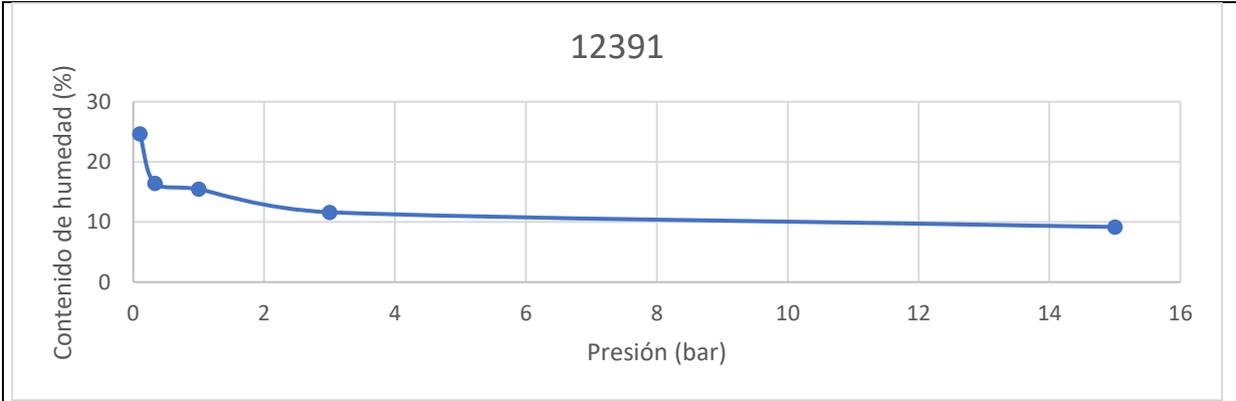
**Curvas de retención de humedad parcela caqui según referencia de laboratorio
(Profundidad 50 cm)**

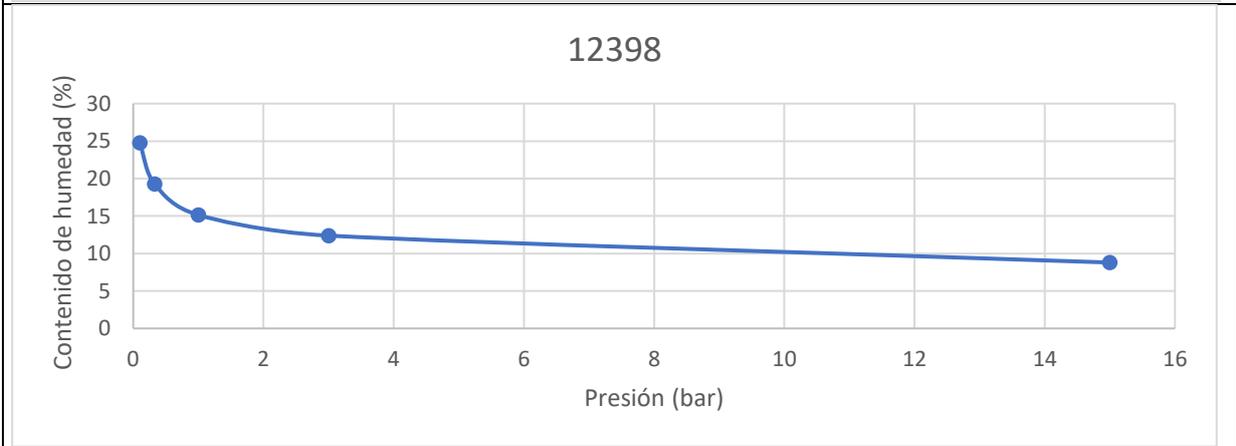
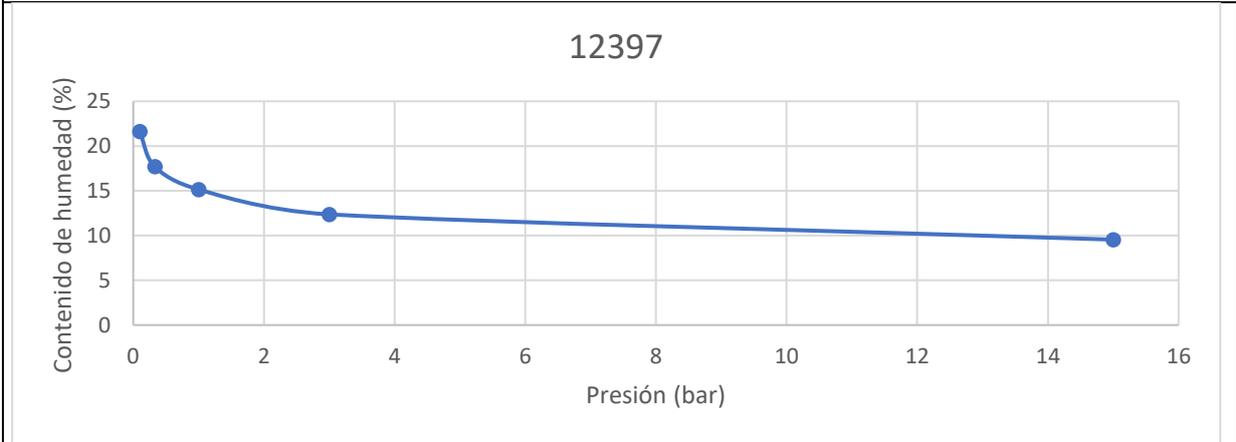
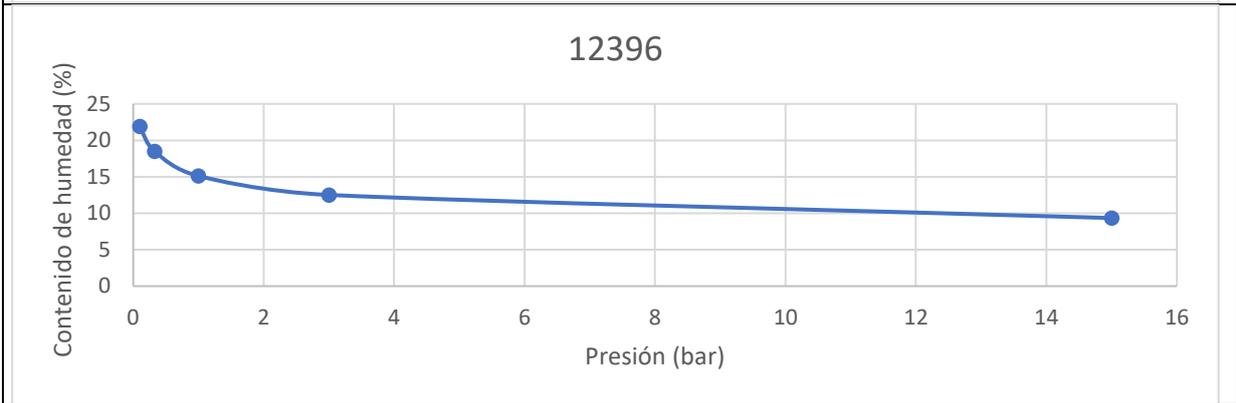
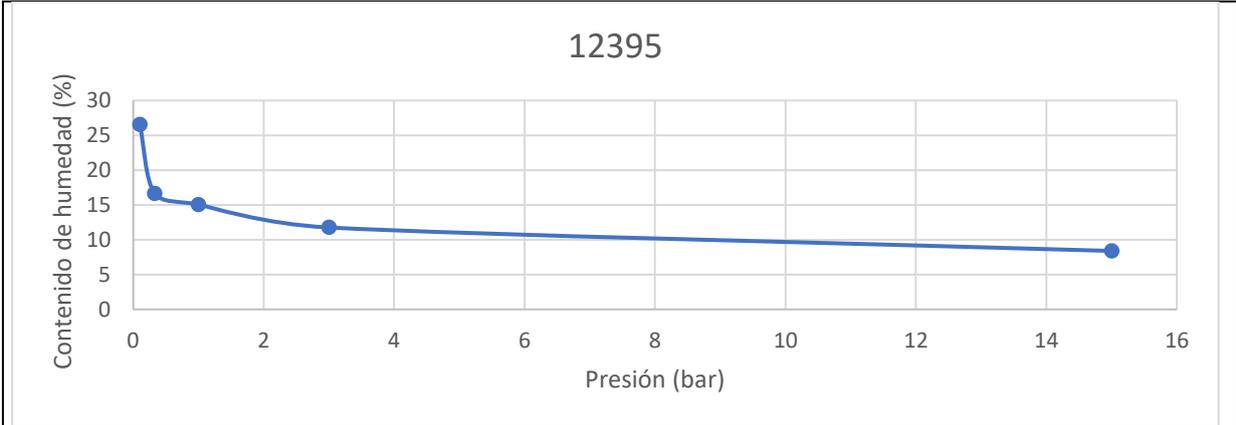


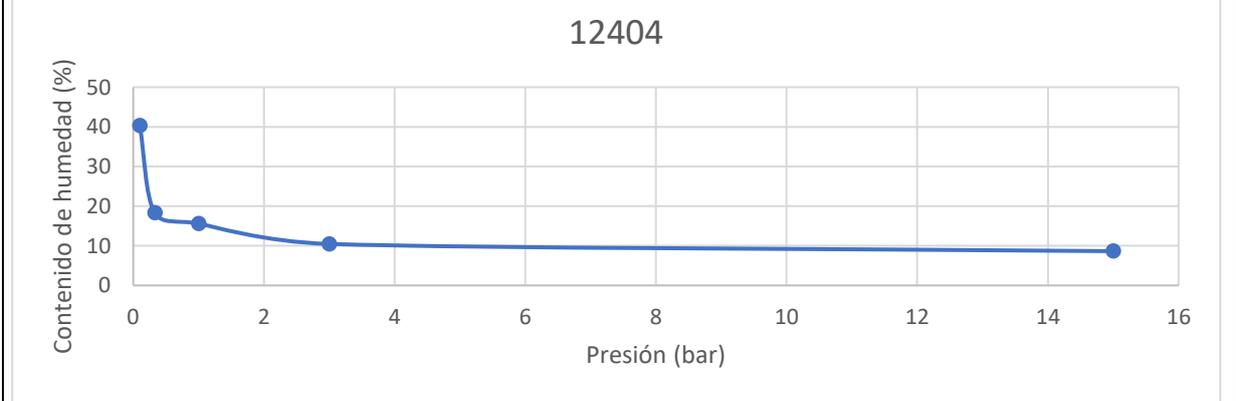
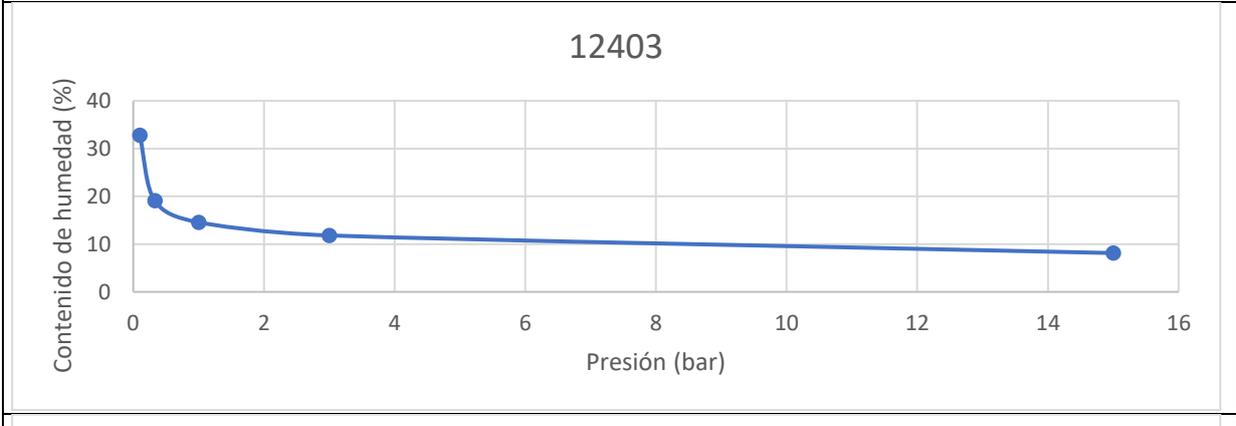
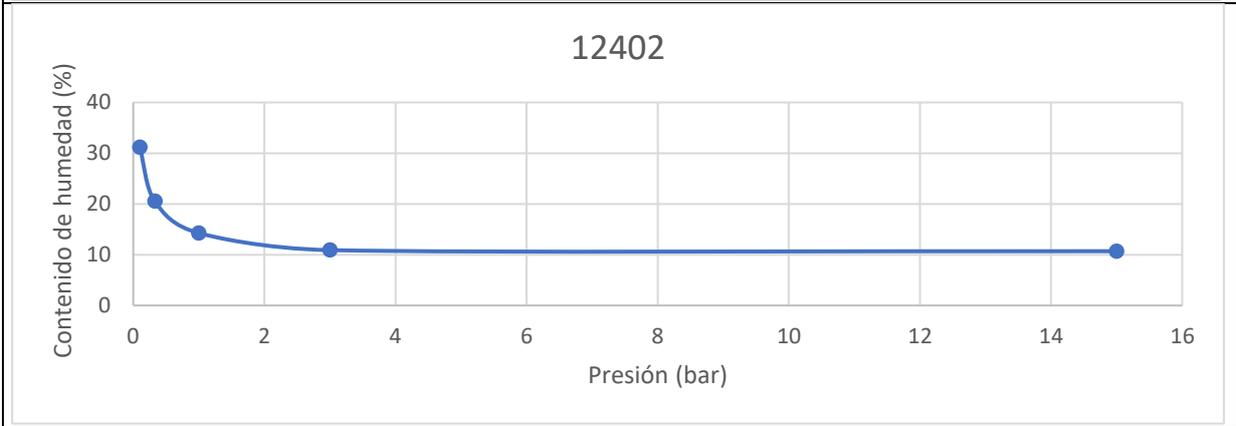
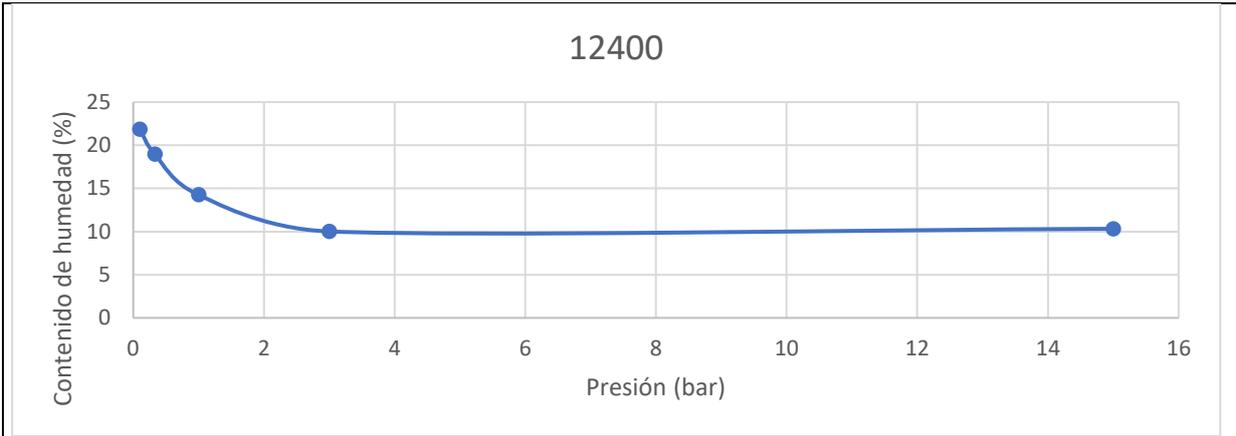
Curvas de retención de humedad parcela granado según referencia de laboratorio
(Profundidad 25 cm)





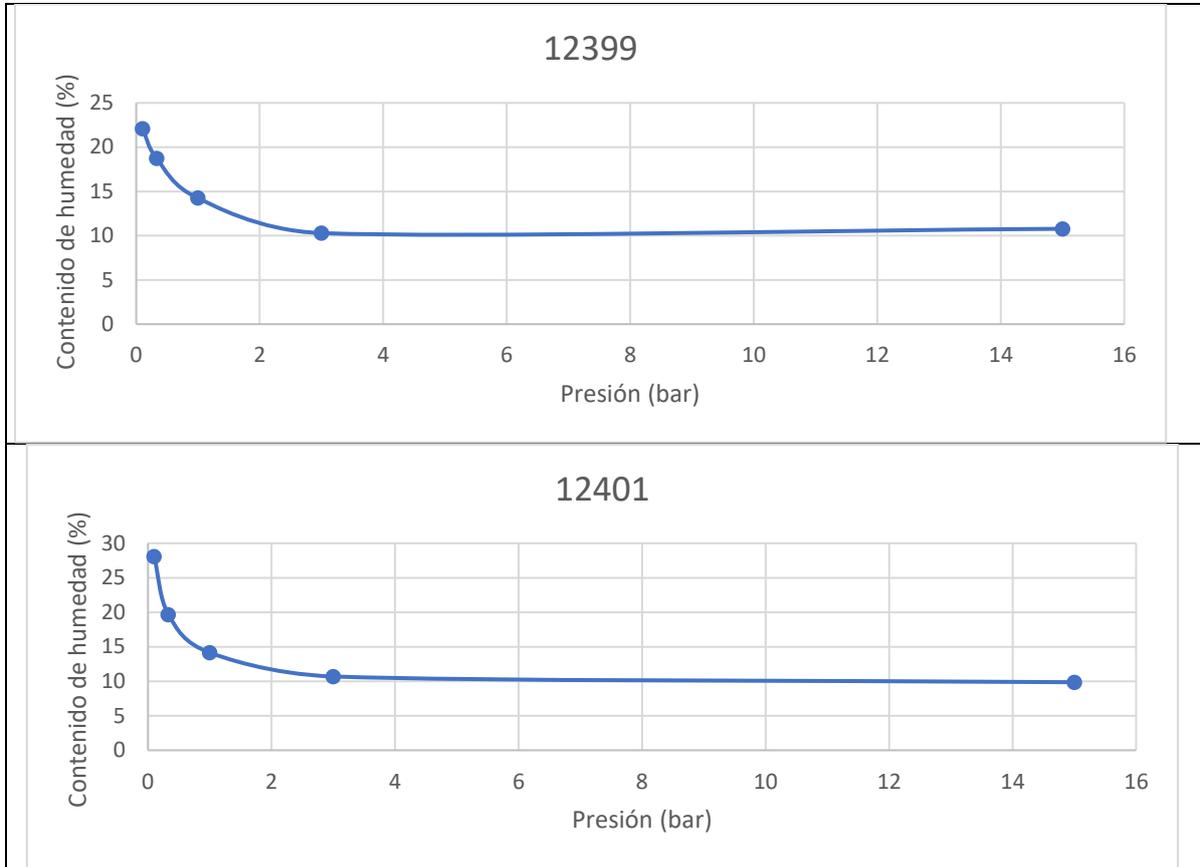






Curvas de retención de humedad parcela granado según referencia de laboratorio

(Profundidad 50 cm)



ANEXO III: HYPROP

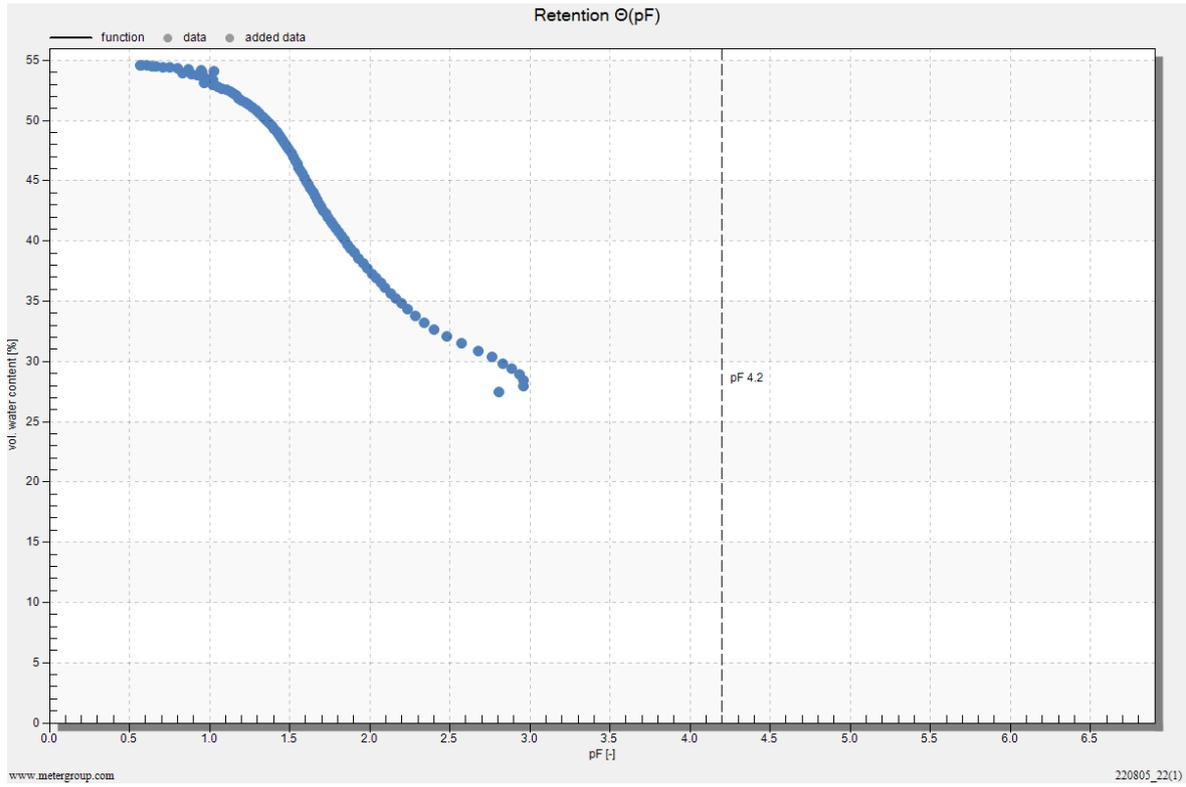


Figura A 3 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12375 caqui

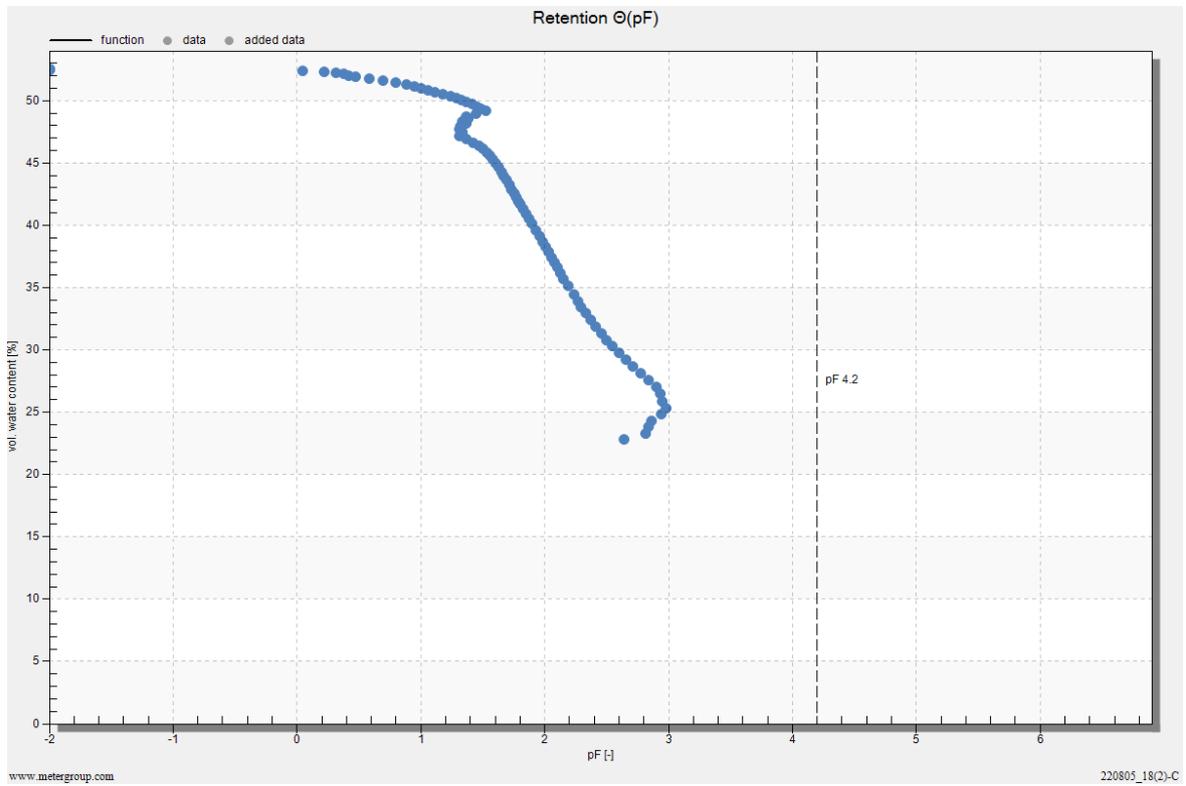


Figura A 4 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12376 caqui

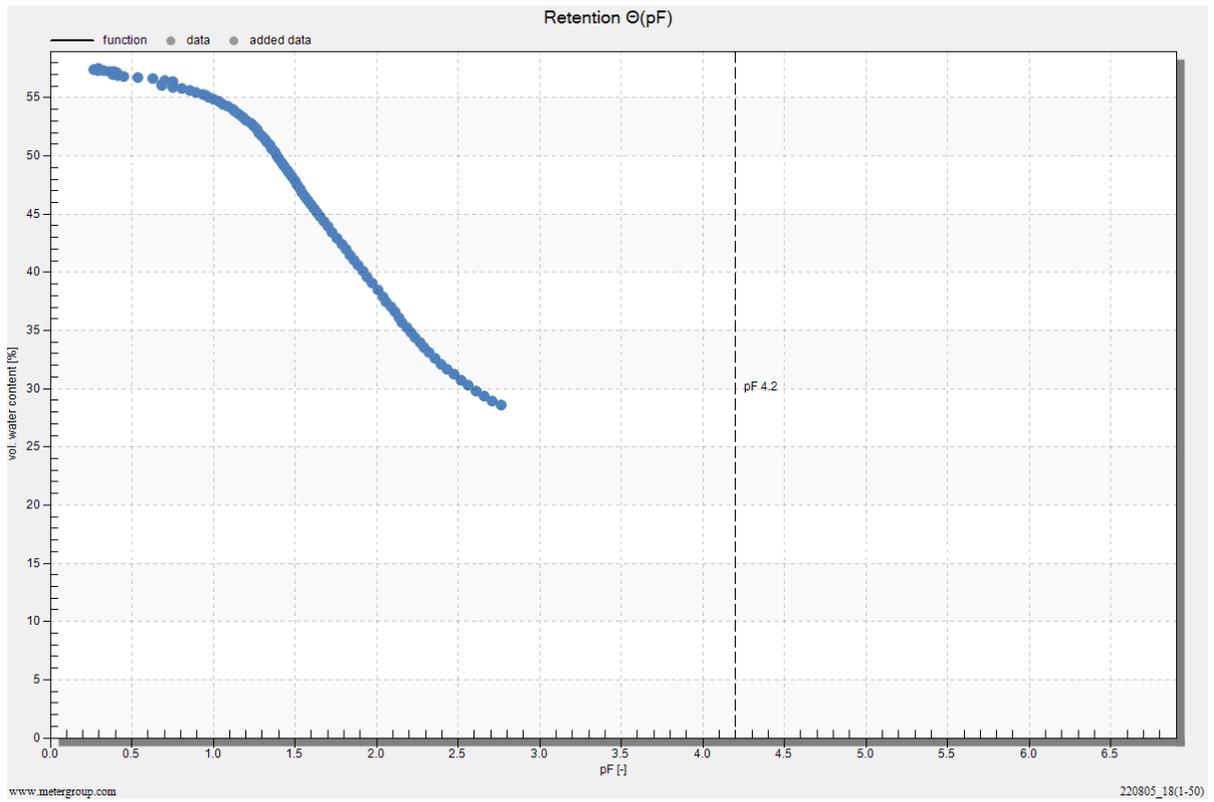


Figura A 5 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12377 caqui

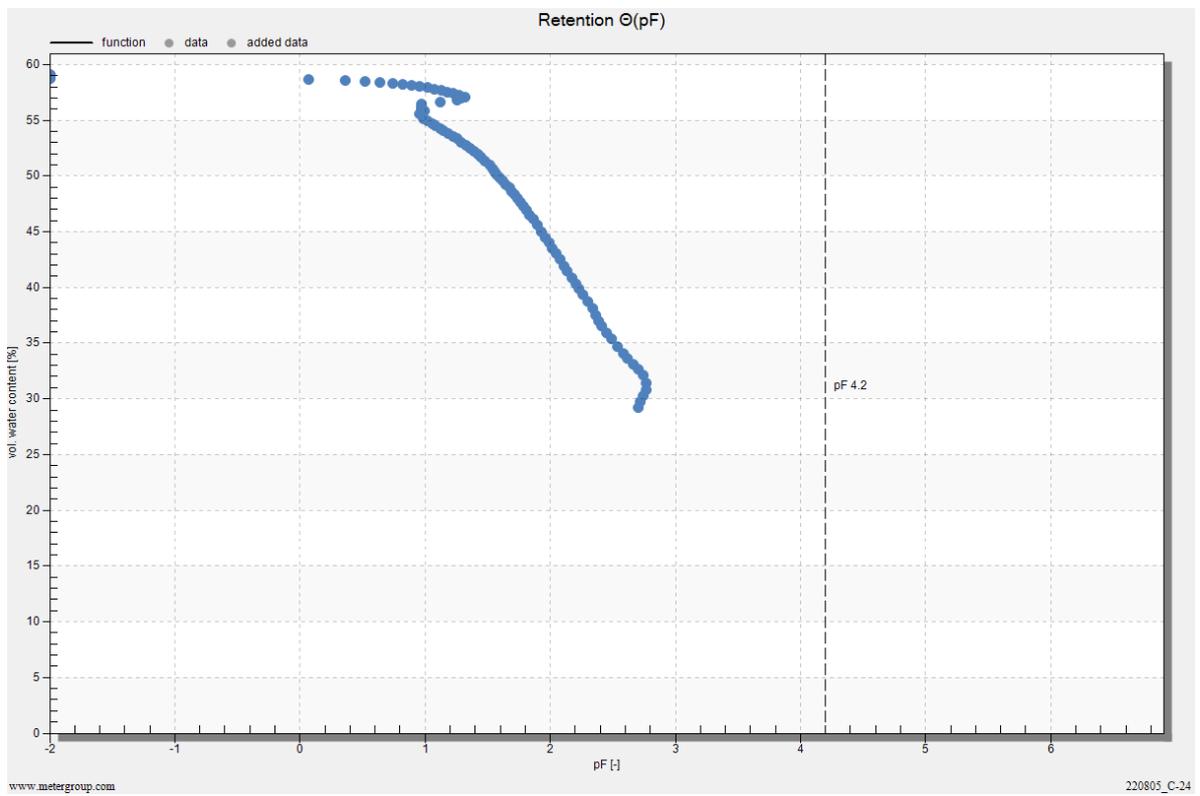


Figura A 6 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12378 caqui

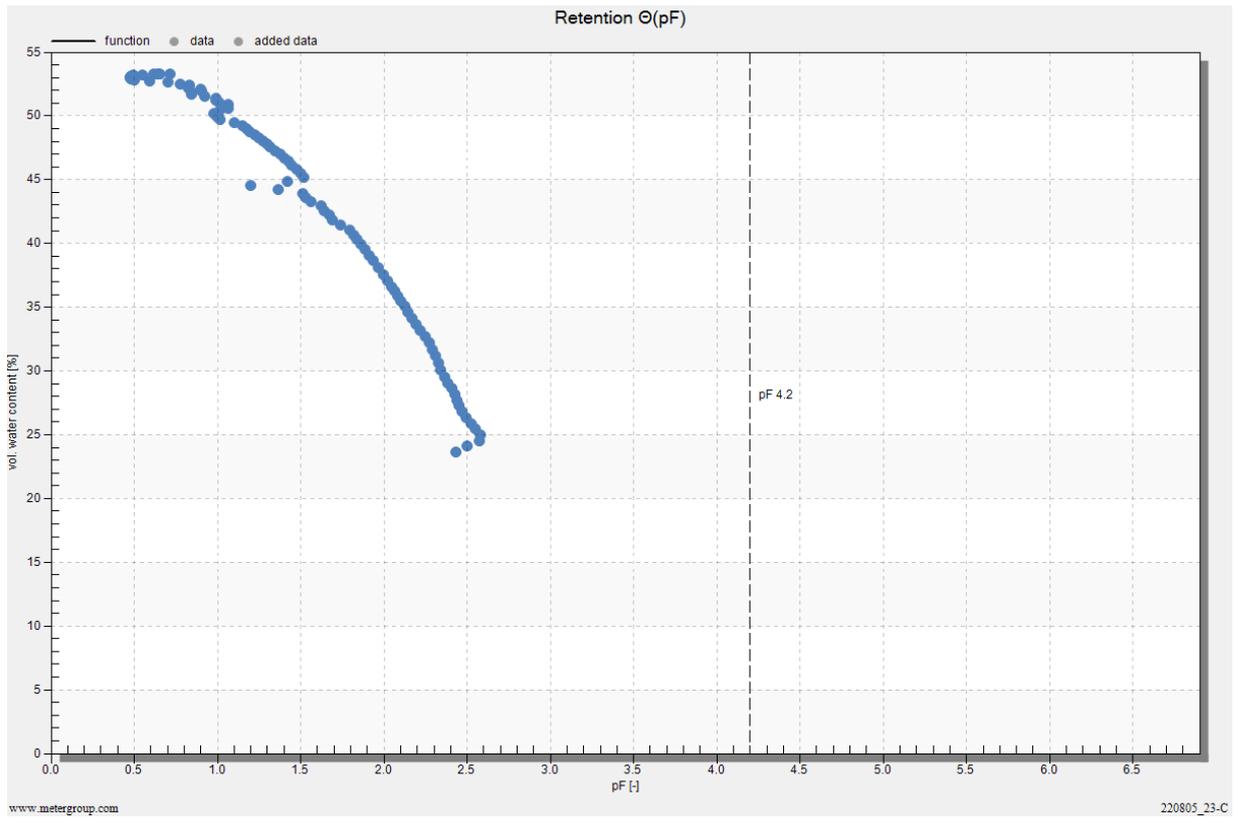


Figura A 7 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12380 caqui

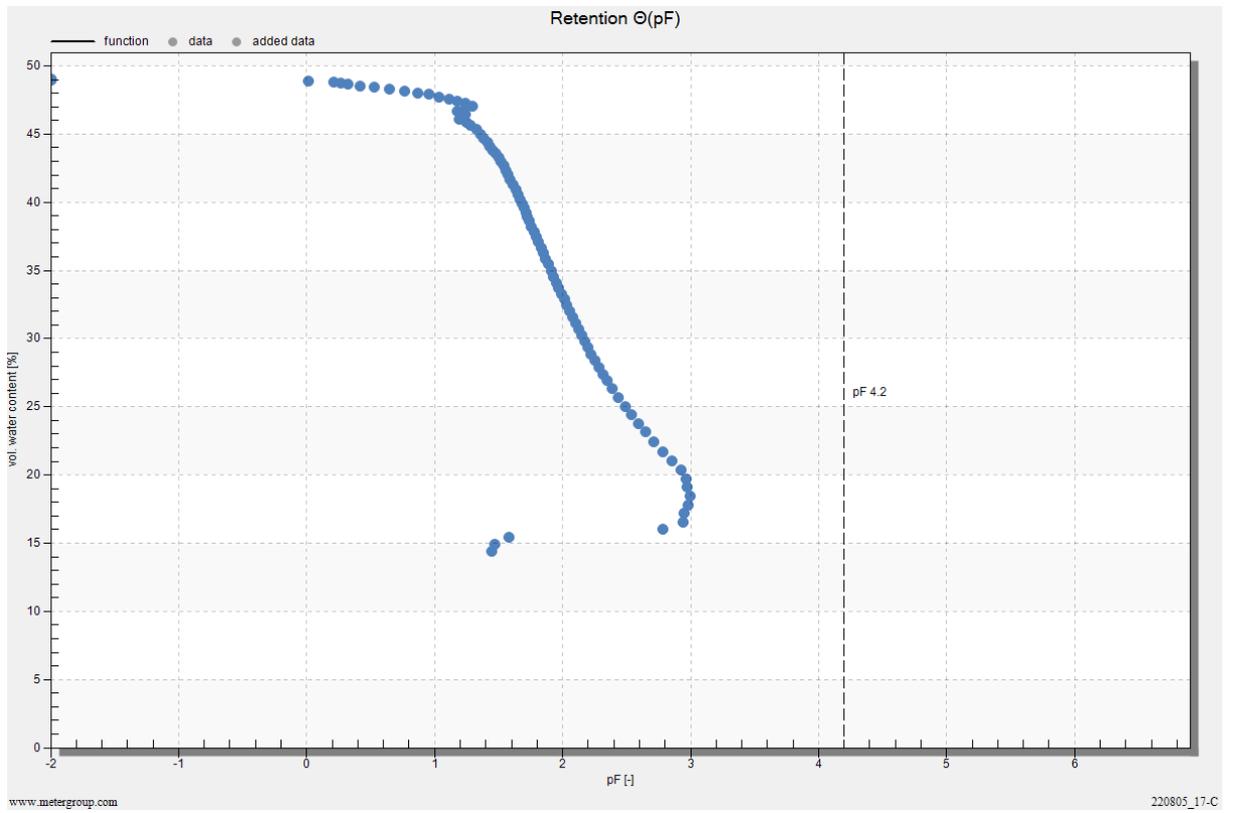


Figura A 8 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12381 caqui

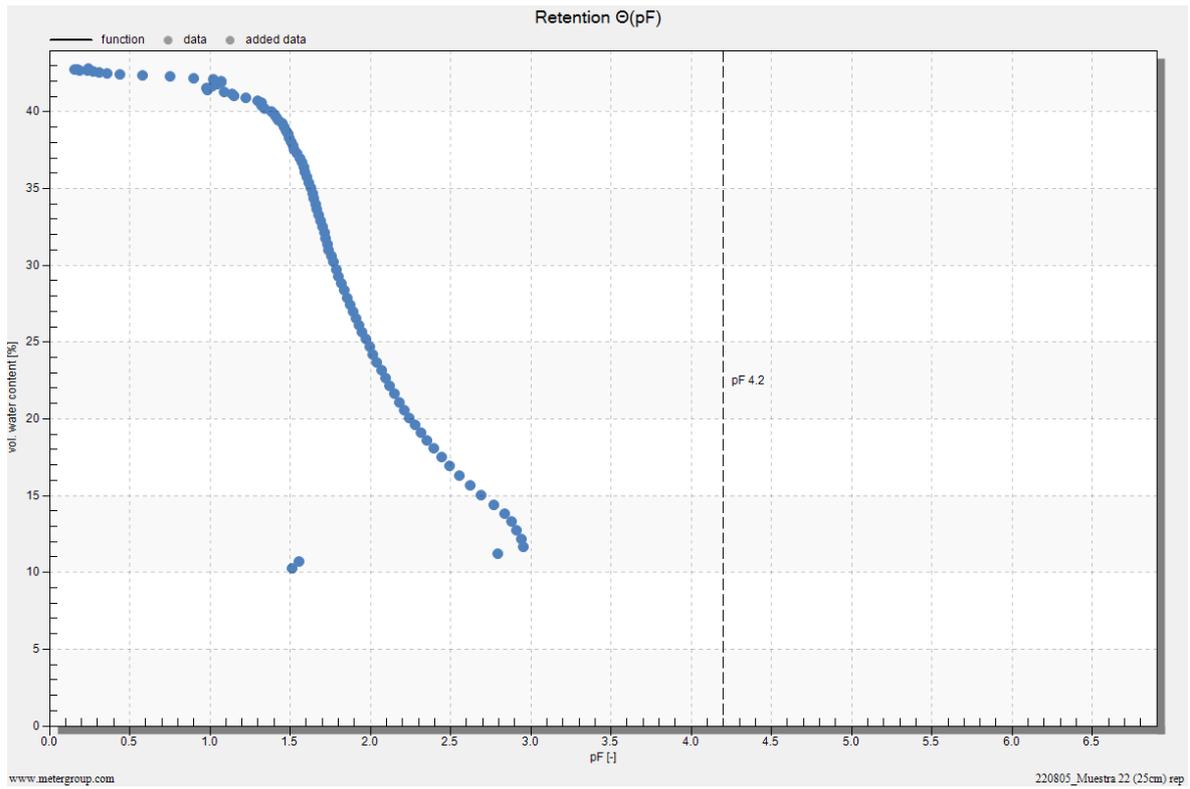


Figura A 9 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12395 granado

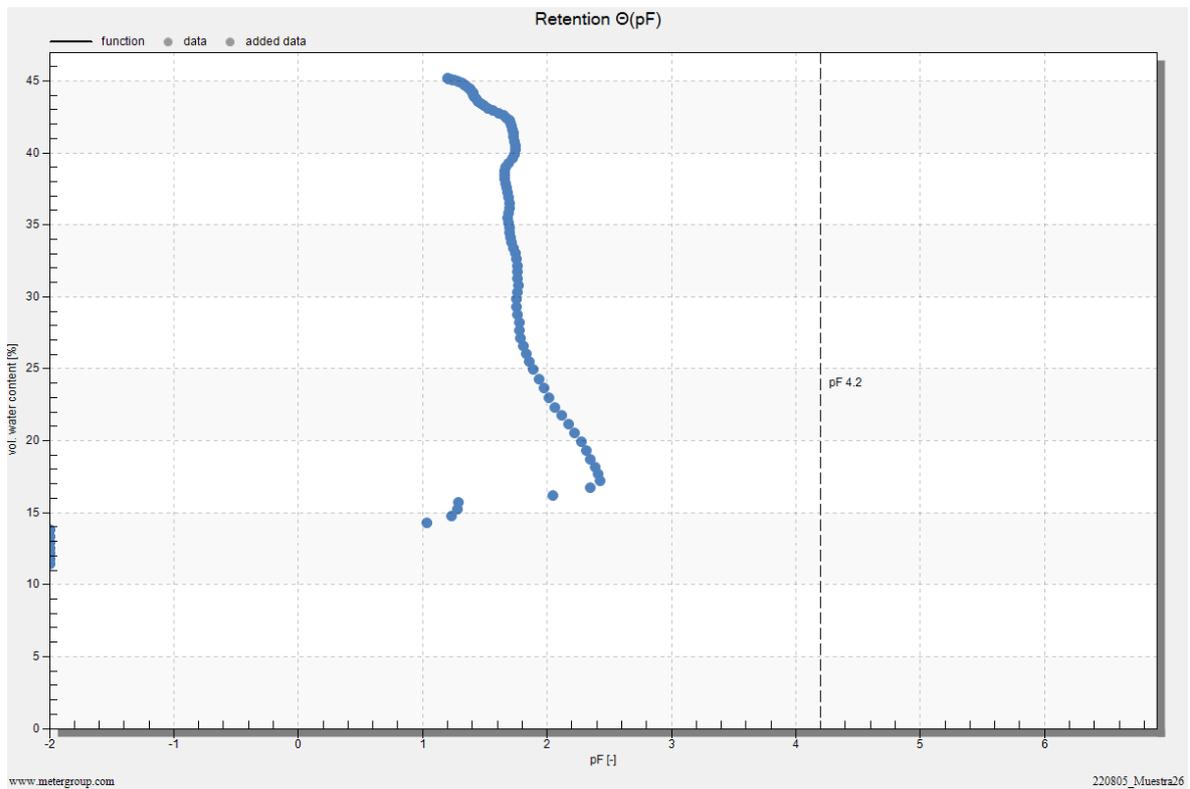


Figura A 10 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12396 granado

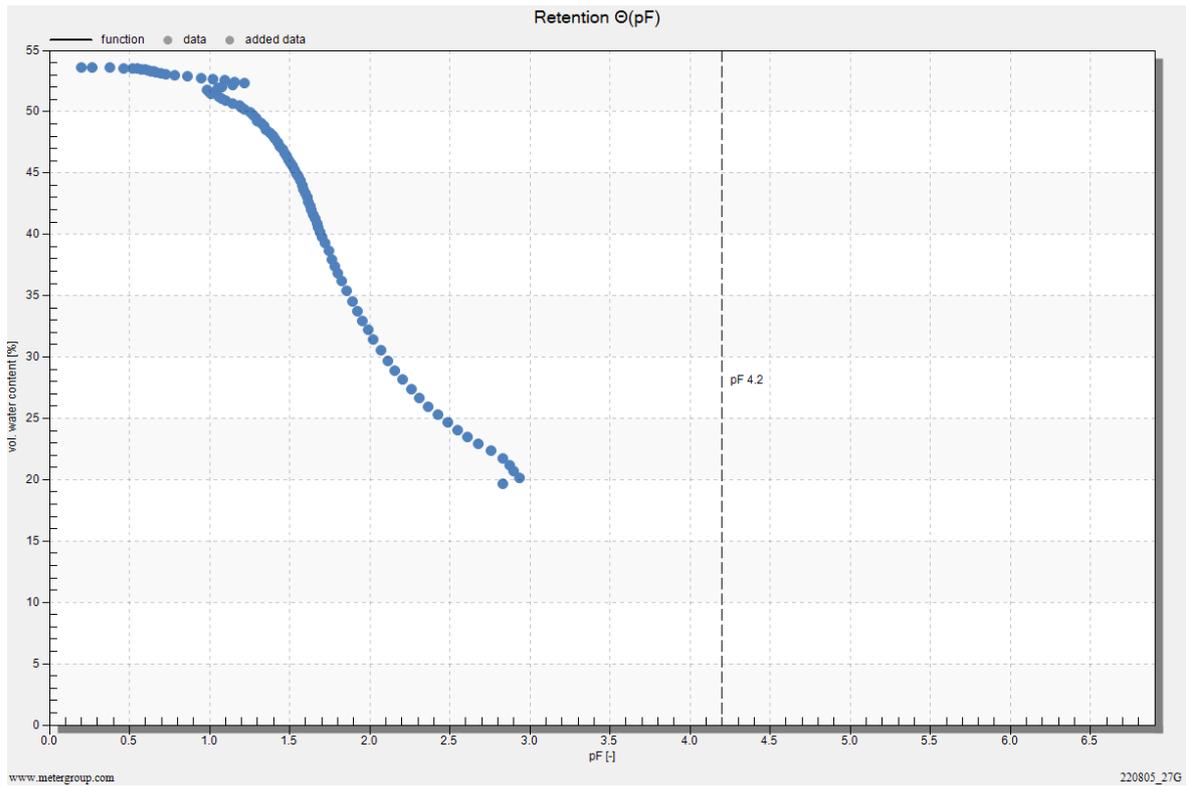


Figura A 11 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12397 granado

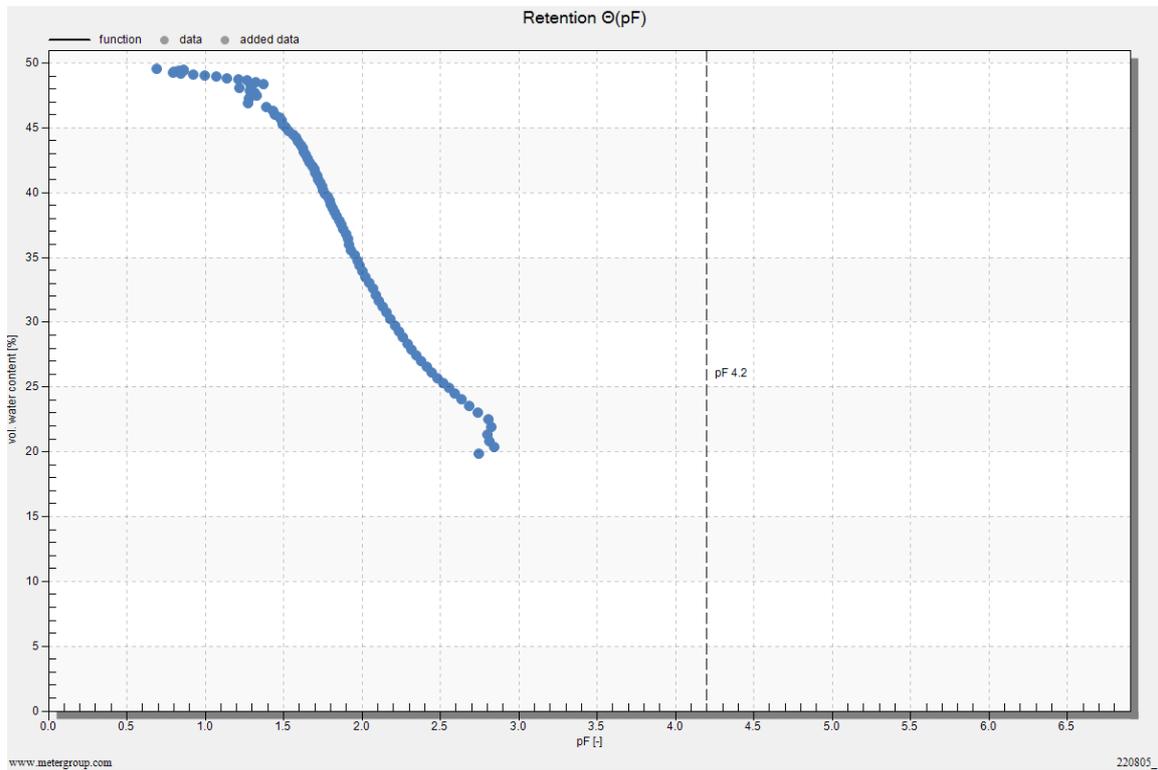


Figura A 12 Curva de retención de humedad HYPROP referencia 12404 granado