

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES
GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDA DE PARÁMETROS
EDÁFICOS MEDIANTE EL USO DE SENSORES**

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

Trabajo de fin de grado

Septiembre 2022

Autor: Guillem Josep Forcadell Pérez

Tutor: Ignacio Meléndez Pastor

Co-Tutor: Jose Navarro Pedreño

Área de Edafología y Química Agrícola

Código OIR: 220622134833

Resumen

Las ciencias ambientales tienen cada día un mayor peso en la sociedad. Con los impactos ocasionados por la actividad del ser humano en los últimos siglos crece la necesidad de tener instrumentos de medida más precisos y exactos a fin de detectar cambios en la composición y en las características de los medios naturales y antropizados. Para obtener resultados fiables en las investigaciones, es fundamental la adquisición y uso de equipos de medición que estén verificados y calibrados correctamente, con sus márgenes de error de medida. El suelo es uno de los componentes esenciales para el medio ambiente, es el sostén de la gran mayoría de los ecosistemas terrestres, sumidero de gases de efecto invernadero y, además, su uso y aprovechamiento han sido esenciales en la evolución del ser humano. Por ello se decidió probar la fiabilidad de instrumentos de medida de temperatura y humedad *in situ* en suelos, que es una matriz compleja. Los resultados obtenidos mostraron, en líneas generales, una precisión y una exactitud condicionada por la instrumentación. Adicionalmente, los resultados obtenidos de temperatura y humedad se compararon con las medidas de un radiómetro portátil VIS-IRC, como instrumento que podría servir para realizar determinaciones *in situ* de amplio espectro.

Palabras clave: Instrumentación, calibración, verificación, precisión, exactitud, parámetros edafológicos

Abstract

Environmental sciences offer the opening to an area of study that every day has greater weight in society, with the impacts caused by human activity in recent centuries; the need for more precise and accurate measurement tools grows for taking measurements capable of detecting changes in the composition and characteristics of natural environments. In order to obtain reliable results in investigations, the acquisition and use of measurement equipment that is verified and correctly calibrated in its measurement error margins is essential. The soil is one of the essential components for the environment, it is the support of the vast majority of terrestrial ecosystems, a sink for greenhouse gases, and its use and exploitation has also been essential in the evolution of the human being. For this reason, we decided to test the reliability of temperature and humidity measurement instruments *in situ* which is a complex matrix. The results obtained showed, in general terms, a precision and accuracy conditioned by the instrumentation. Additionally, the results obtained for temperature and humidity were compared with the measurements taken by a portable V-NIR radiometer, as an instrument that could be used to carry out broad-spectrum *in situ* determinations.

Keywords: Instrumentation, calibration, verification, precision, accuracy, soil parameters

Índice

1. Introducción.....	4
2. Objetivos	6
3. Materiales y métodos	7
3.1 Zona del estudio	7
3.2 Descripción del estudio	7
3.2.1 Preparación de Muestras	7
3.3 Instrumental	8
3.4 Métodos de medición	10
3.5 Metodología experimental.....	10
3.5.1 Ensayo y preparación de la fase experimental	11
3.5.2 Inicio del experimento	12
3.6 Análisis de los suelos.....	14
3.6.1 Determinación de la textura	15
3.6.2 Determinación del pH.....	16
3.6.3 Determinación de la conductividad eléctrica	16
3.6.4 Determinación de la materia orgánica.....	17
3.6.5 Análisis espectral	18
3.7 Análisis estadístico	18
4. Resultados y discusión.....	19
4.1 Características edáficas de los suelos	19
4.2 Temperatura	21
4.3 Humedad	24
4.4 Radiometría y relación con la humedad y temperatura	26
5. Conclusiones y proyección futura.....	34
6. Bibliografía	35

1. Introducción

El futuro de la investigación ambiental está ligado a las continuas alteraciones producidas por el cambio climático, por ello es necesario contar con un instrumental de mayor calidad, que siga unos estándares de verificación y calibración, como por ejemplo los estándares según la ISO 9001:2015 para Sistemas de gestión de la calidad (UNE-NE, 2015), que se renueven y actualicen continuamente para poder ofrecer datos que sean precisos y exactos.

Precisión y exactitud no son palabras sinónimas, pese a su uso habitual como tales. Su diferencia es muy importante, especialmente a la hora de obtener mediciones de datos. La precisión es la medida de replicabilidad y consistencia, lo que depende directamente del instrumento de medida, del método empleado, del manejo del instrumental y del ambiente (California, s.f.). Por otra parte, la exactitud está definida como el grado de concordancia entre un valor medido y el valor verdadero o estándar, dicho con otras palabras, cuanto se aproxima el valor de una medida al valor de referencia (PRECISA, 2022).

A la hora de llevar a cabo un proceso experimental, es de vital importancia saber qué se va a medir, qué instrumental se va a utilizar para hacer esas mediciones y cuál va a ser el método a seguir. Cuando se muestrea en un ambiente no controlado como en el campo, tanto el lugar de muestreo como el momento de muestreo juegan un rol muy importante, si bien siempre existe la incertidumbre de saber si el valor medido es el correcto, si es representativo para toda un área de estudio o si es un valor específico de un punto en concreto. Con la intención minimizar este error se genera una batería de medidas para acotar cuál será la precisión de la medida y cómo de exactas serán estas.

A lo largo del trabajo se han realizado una serie de experimentos con la intención de comprobar cuán preciso y exacto es el material de uso habitual para las mediciones directas de suelos en el campo, como es el caso de termómetros digitales, sondas de temperatura y humedad, y un radiómetro de campo.

El experimento se diseñó utilizando cuatro suelos de características desconocidas, para posteriormente poder clasificarlos determinando sus propiedades edáficas. Tras ello se cruzaron los datos obtenidos con las mediciones de temperatura y humedad, con la intención de comprobar si la composición de los suelos influía en la retención de la humedad o en el aumento de la temperatura.

Además, se intentó comprobar si existía alguna relación entre la reflectancia de los suelos medidos con la temperatura y la humedad.



2. Objetivos

La finalidad principal de este trabajo de fin de grado (TFG) es la valoración de la precisión y exactitud de material de uso habitual para mediciones en suelos, con la intención de comprobar la fiabilidad de los datos obtenidos. Para ello se compararán distintos instrumentos de medición de dos parámetros que se miden habitualmente *in situ*, la temperatura del suelo y la humedad.

Adicionalmente, se compararán estos resultados con las características del suelo y, en particular, con el espectro obtenido mediante el uso de un radiómetro de campo que mide la reflectancia en el rango del espectro visible y del infrarrojo cercano (VIS-IRC).

Los objetivos específicos definidos para alcanzar esta finalidad son los siguientes:

- Realizar una revisión de la bibliografía disponible acerca del tema de estudio.
- Recopilar información de las especificaciones técnicas y de calibración de los fabricantes para los instrumentos.
- Preparar cuatro sustratos edáficos.
- Analizar y caracterizar dichos suelos con el objetivo de tener información de las características relacionadas con la humedad y la temperatura en suelos, concretamente textura y materia orgánica.
- Evaluar y discutir los resultados obtenidos mediante el uso de instrumentación portátil para medida de propiedades en suelos.
- Evaluar la relación entre las medidas realizadas por radiometría y las propiedades edáficas: temperatura y humedad.
- Redactar el trabajo de fin de grado y exponer sus resultados y conclusiones.

3. Materiales y métodos

3.1 Zona del estudio

La actividad se desarrolló en condiciones controladas dentro del invernadero del campus de la Universidad Miguel Hernández d'Elx y en el edificio l'Alcúdia.



Figura 1. Invernadero de la Universitat Miguel Hernández d'Elx.

3.2 Descripción del estudio

Para la experimentación, se prepararon suelos en las que poder utilizar el instrumental y valorar su fiabilidad. El procedimiento seguido se detalla a continuación.

3.2.1 Preparación de Muestras

Con la intención de comprobar la fiabilidad, precisión y exactitud de instrumentos de medida *in situ* del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente, se prepararon cuatro tipos de suelos compuestos a partir de distintas muestras almacenadas de suelos tamizados a 2 mm (tierra fina), con la intención de generar unos suelos de los cuales no se conocen sus características *a priori* como, por ejemplo, el contenido en materia orgánica, conductividad eléctrica (salinidad), pH y composición granulométrica (textura).

Mezclando debidamente las distintas muestras hasta obtener un suelo de apariencia homogénea, se prepararon 10 tiestos para cada tipo de suelo, 40 en total, los suelos se dispusieron en maceteros de plástico y se añadieron 900

gramos de suelo, posteriormente se rotularon debidamente y se conservaron muestras de las cuatro mezclas (suelos compuestos) con la intención de caracterizar la textura mediante el método Bouyoucos (Beretta, 2014), y los porcentajes de materia orgánica y carbono orgánico mediante el método *Walkey-Black* (Nilo *et al.*, 2019). También se hicieron mediciones de pH y de la conductividad de cada suelo.

3.3 Instrumental

Al objeto de comprobar si los equipos e instrumental del que se dispone está correctamente calibrado y verificado se elaboró un listado con todos los instrumentos de medición que se utilizaron y sus características básicas, que se indica a continuación.

- Un registrador de temperatura y humedad ambiental *DATA LOGGER RS-Pro-USB-2*. Tiene una amplitud de medida de -35 °C a 80 °C y de 0 a 100% de humedad relativa, es capaz de hacer hasta 16.000 mediciones. Dentro de su amplitud tiene un error de ± 0.5 °C para la temperatura y de $\pm 3.5\%$ para la humedad.
- Sonda de temperatura ambiente LOG100-CRYO V0 (Dostmann-electronic): Amplitud de medida de -10 °C a 70 °C; precisión de la medida de -10 °C a 50 °C de $\pm 0,3$ °C y $\pm 0,7$ °C para el resto de las amplitudes.
- Sonda portátil HydraGo (VanWalt): La sonda de temperatura tiene un rango de medida que va de -10 °C a 65 °C con una precisión de ± 0.3 °C. Para la humedad el rango de medida va en porcentaje siendo el 0% un suelo totalmente deshidratado y el 100% siendo un suelo totalmente hidratado, teniendo una precisión de ± 0.01 WFV (*Water fraction by Volume*).
- 3 termómetros digitales *CHECKTEMP (HANNA instruments Checktemp)*: termómetro digital de gama media, de uso rutinario en el laboratorio, están numerados del 1 al 3. Las especificaciones de cada uno son: *Checktemp 1* calibración, test a 50 °C y 85 °C lecturas de 49,9 °C y 85 °C, *Checktemp 2* calibración, test a 50 °C y 90 °C lecturas de 49,9 °C y 90,1 °C, *Checktemp 3* calibración, test a 50 °C y 85 °C con lecturas de 49,9 °C y 84,9 °C. Los tres termómetros tienen un rango de -50 a 150,0 °C, una resolución de 0,1 °C, una precisión a los 20 °C de ± 0.3 °C y una desviación típica de ± 3 °C.
- Termómetro digital *AA-Precision*: amplitud de -50 a 200 °C, con una precisión de ± 1 °C de 0 a 100 °C, para el resto de la amplitud de ± 2 °C.

- Sonda de temperatura digital Quartz digitermo (Quartz): Amplitud de medida -55 °C +148 °C; precisión de medida de 0 a 60 °C de ± 0.1 °C, para el resto de las amplitudes, $\pm 1,5$ °C.
- Sonda programable de temperatura, humedad y conductividad eléctrica "Moisture meter type HH2, WET sensor", AT delta-t Devices Ltd. El instrumento incorpora un CD donde se incluyen los archivos de calibración del sensor WET. La sonda de temperatura está calibrada frente a un termómetro digital Testo110.

Junto a este instrumental, se utilizaron adicionalmente:

- Granatario: *Gram precision S3R-30KD*, Balanza digital de precisión con capacidad de medida de 30 kg hasta 1 g.
- Espectrorradiómetro de superficies: *Analytical Spectral Devices (ASD) Field Spec Hand Held VNIR radiometer* (ASD Inc., Boulder, CO, USA). Con una amplitud de cobertura de los 325 nm a los 1075 nm el cual se aproxima al rango de las regiones del espectro visible y hasta el infrarrojo cercano de onda corta (SW-NIR), con una exactitud de ± 1 nm y una resolución de < 3 nm a 700 nm (Melendez-Pastor, *et al.*, 2008).

Para llevar a cabo la experimentación se emplearon cuarenta maceteros de plástico, papel de filtro, una lona de rafia de 4x6 metros, un capazo de jardinería y diverso material auxiliar.

Además, para caracterizar los suelos, se usó diferente instrumental de laboratorio como matraces, pipetas, reactivos, vasos de precipitado, buretas, agitadores, campanas de extracción y balanzas de precisión.

Todos estos aparatos que se valoran en el TFG, se pueden usar tanto en medidas de campo como en laboratorio para los parámetros establecidos, por lo que es de gran interés conocer su funcionamiento, características y calidad (Czarnomski N, *et al.*, 2005).

3.4 Métodos de medición

A la hora de llevar a cabo la toma de medidas hay que tener en cuenta distintas consideraciones: Los tiestos es mejor que no estén ordenados, deben estar colocados de forma aleatoria y luego calcular la media aritmética para cada parámetro en cada una de las repeticiones de los cuatro suelos. Así se evita, a la hora de obtener datos, un sesgo por la posición que ocupaban sobre la mesa de trabajo. La intención es minimizar la incidencia de aquellos factores que puedan alterar las condiciones de los suelos, como, por ejemplo, una mayor exposición a la radiación solar o variaciones de temperatura según en que parte de la mesa se encuentren.

Para minimizar posibles alteraciones ambientales, incluso dentro del invernadero, se dispuso de una lona aislante a 2 metros sobre el suelo que ayudaría a un mejor control del medio ambiente de desarrollo experimental.

3.5 Metodología experimental

Durante la planificación del experimento, lo primero que se realizó fue establecer un periodo de mediciones periódicas, empezando siempre a la misma hora cada paso, de manera que se harían un total de seis mediciones dejando 48 h entre medición y medición, para cada suelo (y repeticiones). Se estimó un tiempo total de once días, empezando a medir el día 11 de julio, hasta el 21 del mismo mes. Adoptamos este criterio porque, teniendo en cuenta las temperaturas que se llegan a alcanzar dentro del invernadero, el manejo del instrumental y la reducción de humedad de los suelos, ya que estos se secan rápidamente, aconsejaba ese periodo de toma de medidas.



Figura 2. Distribución de las 40 muestras numeradas, con los instrumentos de medida de temperatura, durante la segunda sesión de medida.

3.5.1 Ensayo y preparación de la fase experimental

El ensayo y la preparación de la fase experimental comenzaron el viernes día 8 de julio. Se colocaron de forma aleatoria los tiestos de las repeticiones de los suelos X-1 a X-7. Posteriormente, se colocaron las series de X-8, X-9 y X-10. La X hace referencia al tipo de suelo, enumerados como S1, S2, S3 y S4, y la número hace referencia a la repetición. Así, por ejemplo, al suelo 3 repetición 5 le correspondería la nomenclatura S3-5.

Se pesaron todos los tiestos y se llevó a cabo una práctica de ensayo de determinaciones con el radiómetro para conseguir la experiencia necesaria en su manejo. A un metro y medio de altura sobre la mesa se instalaron *data loggers* para tomar medidas ambientales de temperatura y humedad relativa ambientes a lo largo de la duración del experimento, así mismo se colocó un segundo *logger* (LOG100-CRYO V0) a ras de la superficie de la mesa para disponer de los valores de temperatura.

Cabe remarcar que se hizo una distinción entre las distintas repeticiones, solo se llevaron a cabo medidas con las sondas, alterando la estructura en las repeticiones de la 1 a la 5. Las repeticiones 6 y 7 se introdujeron en la distribución aleatoria, pero no se midió ningún parámetro. Esto fue así para conservarlos inalterados una vez empezado el experimento, además, por si alguna de las series de medidas sufría muchas pérdidas de material o daños significativos durante su manejo, poder reemplazarla, teniendo pues estas dos series una función de "salvaguarda".

Para las medidas de reflectancia con el radiómetro se utilizaron de la repetición 8 a la 10. Se procuró moverlas lo mínimo posible para no alterar sus superficies, ya que el interés de utilizar un espectro radiómetro reside en ver cómo evoluciona la reflectancia de la superficie del suelo en los días de muestreo.

3.5.2 Inicio del experimento

El experimento comenzó el domingo 10 de julio con el pesaje de todas las muestras de suelo seco. A continuación, se realizó la saturación de estos con agua a las 7:30 h. Pasadas 24 h, cuando el excedente de agua gravitacional fue eliminado, y los suelos quedaron prácticamente a capacidad de campo, se volvieron a pesar para obtener la retención hídrica. Se inició la rutina para los próximos once días siguiendo una serie de pautas, el inicio de cada jornada de medidas sería a las 7:30 h.



Figura 3. Suelos ya distribuidos durante la saturación.

El día de la primera medida periódica fue el lunes 11 de julio. Se empezó a las 07:30 h con pesada de todos los tiestos; posteriormente, por orden se hizo la toma de datos de temperatura empezando con los tres termómetros digitales *HANNA Instruments Checktemp*, termómetro digital *A-precision* y *Quartz digitermo*, y después con el sensor de temperatura ambiente *LOG100-CRYO V0*. A continuación, se tomaron las medidas las sondas portátiles *HydraGo* y *WET Type HH2 sensor*. Es muy importante seguir siempre de forma rigurosa el mismo procedimiento, así como introducir las sondas siempre a la misma profundidad en el suelo, 5 cm. Así mismo se dejaba introducida la sonda en el suelo 30 segundos. Al terminar con estas mediciones realicé las mediciones de la reflectancia de superficie, para las

cuales había que preparar un ordenador específico que contiene el software del radiómetro, y donde poder almacenar los datos; además, se dejó calentar el instrumental y antes de cada medida se calibró con un blanco, *Spectralon*, que servía durante 10 minutos para mantener calibrado el dispositivo. El "Spectralon" o espectralón, es un fluoropolímero que posee la reflexión difusa más alta de cualquier material conocido o capa para las regiones del espectro ultravioleta, visible o infrarrojas, por ello se utiliza para calibrar.

En resumen, el procedimiento que se siguió para realizar la experimentación fue el siguiente: pesaje de todas las muestras en seco, saturación completa de los tiestos, pasadas 24 h se hizo un nuevo pesaje de cada tiesto para determinar la capacidad de campo. Después se empezaron a realizar las mediciones ordenadamente y anotando los resultados para cada instrumento en una plantilla, al final de cada jornada, por cada suelo tendré medidas de cada instrumento por quintuplicado. Una vez terminadas las mediciones, con el máximo cuidado posible se extrajeron las sondas evitando arrastrar material con la intención de minimizar las pérdidas, especialmente los primeros días posteriores a la saturación ya que restos de suelo quedaban adheridos a las sondas y había que retirarlos cuidadosamente con una espátula; para comprobar cuánto suelo se había perdido después de cada sesión de medidas se pesaron de nuevo todos los tiestos y por último se hicieron las medidas con el radiómetro.

Los días posteriores en los que había que tomar medidas, se siguieron exactamente los mismos pasos, primero un pesaje de control que sirve para valorar cuánta agua se ha perdido en las 48h previas y para controlar cuánto suelo se iba perdiendo por el error de manejo.

El uso del *data logger* RS-PRO sirvió para atestiguar que las condiciones ambientales de humedad y temperatura dentro del invernadero fueran las mismas a lo largo del período de mediciones en la zona donde se situaron los suelos.

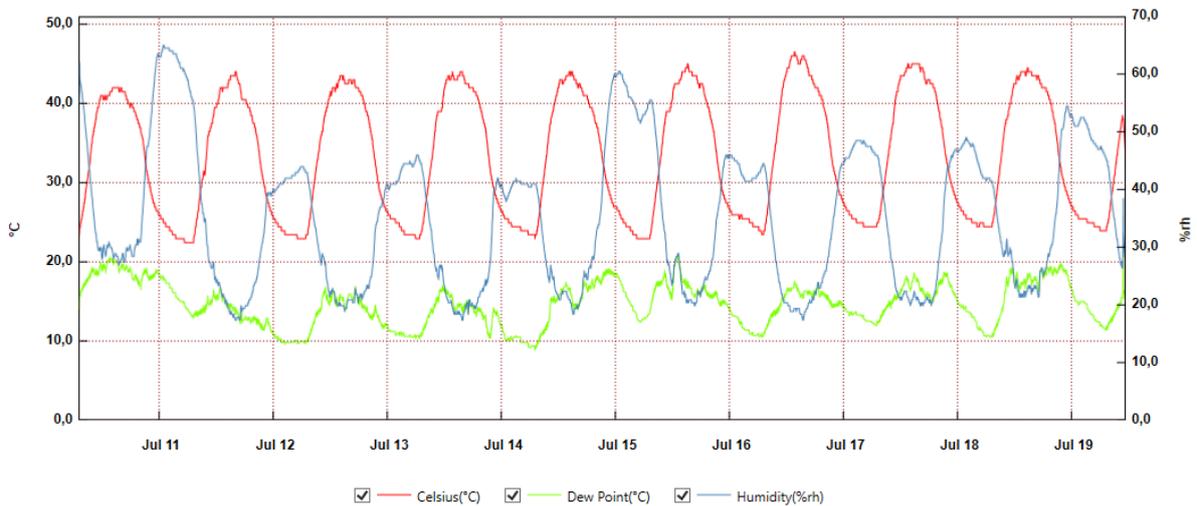


Figura 4. Representación de los datos ambientales de temperatura y punto de rocío en grados Celsius, y humedad relativa en porcentaje. Obtenidos con el *data logger* RS-Pro-USB-2.

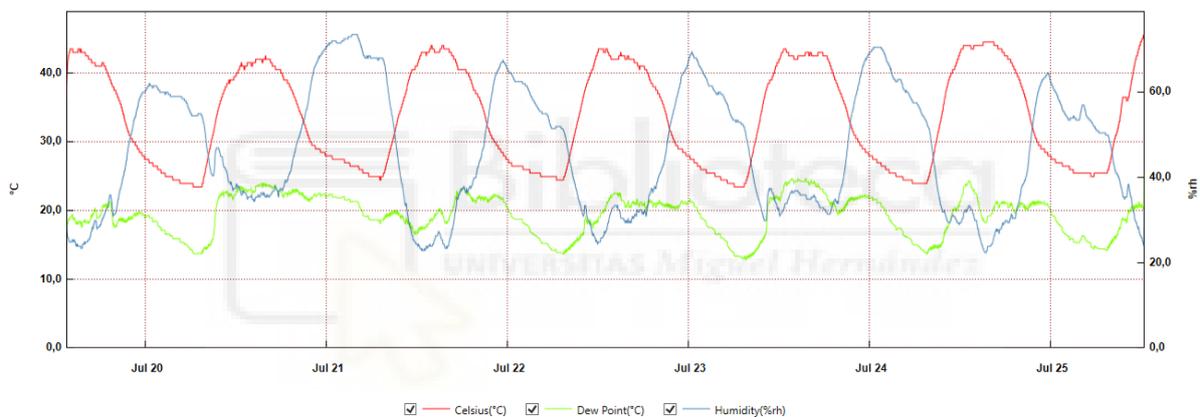


Figura 5. Continuación de la representación de los datos ambientales de temperatura y punto de rocío en grados Celsius, y humedad relativa en porcentaje. Obtenidos con el *data logger* RS-Pro-USB-2.

3.6 Análisis de los suelos

Para la caracterización de los suelos artificiales que se generaron para llevar a cabo este experimento se van a determinar los distintos parámetros de interés, pero no todos los parámetros necesarios para hacer una clasificación completa de estos, puesto que no es necesaria para lograr los objetivos. Primero habrá que hacer la caracterización de la textura del suelo, el contenido en materia orgánica, pH y conductividad, este último es muy importante para trabajar con los datos del radiómetro. La determinación de la conductividad eléctrica, pH y contenido en materia orgánica se realiza con suelos tamizados a un diámetro aparente inferior

a 2 mm. Dado que los suelos empleados estaban tamizados, no se requirió un análisis de elementos gruesos.

3.6.1 Determinación de la textura

La textura, o distribución por tamaño de las partículas (o su volumen de poro asociado), es una de las medidas más importantes del suelo. Las partículas del suelo se clasifican por tamaño en tres tipos: arena, limo y arcilla (USDA, 2017). La determinación de la textura del suelo se realizó siguiendo el método del hidrómetro Bouyoucos (Beretta, 2014), ya que nos proporciona una estimación de las características texturales de los suelos. Es un método sencillo de realizar, en el que con la ayuda de un densímetro obtenemos la densidad de la mezcla en suspensión de los suelos en agua. Para ello, primero medimos la densidad del Calgón (hexametáfosfato de sodio) disuelto en agua destilada y luego la de la mezcla de cada una de las muestras en suspensión tomando dos medidas; una a los 40 segundos de realizar la mezcla donde introduciremos el densímetro y un termómetro, y se vuelve a mezclar. La segunda medición se realiza pasadas 2 h. Los valores de las medidas siguen las normas USDA en cuanto al tamaño de las partículas para este método. Se realizan los cálculos siguiendo las siguientes fórmulas para obtener los porcentajes de cada fracción.

% Limo + % Arcilla (X) $\rightarrow X=(D+[(T-20) *0,36])*(100/P)$
% Arcilla $\rightarrow Y=(D'+[(T'-20) *0,36])*(100/P)$
% Arena = 100-X
% Limo = X-Y

Figura 6. Fórmula de la estimación de la textura del suelo con el método Bouyoucos.

Donde el valor de D es la medida del densímetro inicial, es decir a los 40 segundos. T corresponde a la temperatura en grados centígrados inicial. D' y T' son las medidas correspondientes pasadas 2 horas. P es el peso de suelo en gramos y 0,36 = factor de corrección por grado de diferencia de temperatura. La temperatura de contraste del densímetro Bouyoucos es de 20 °C.

3.6.2 Determinación del pH

El pH es un parámetro que condiciona las propiedades del suelo, sus características y el desarrollo de las plantas, debido a que sus nutrientes, que sean dependientes del pH, pueden no estar biodisponibles.

La medición del pH se basa en el potencial eléctrico de la membrana de vidrio de un electrodo, el cual mide la actividad de iones hidrógeno a cada lado de la membrana. La medición se realiza con un pH-metro GLP 21 CRISON, y toma como referencia una temperatura de 25 °C.

Para realizar la medida del pH hay que preparar una suspensión de suelo con agua desionizada con una relación peso-volumen 1:2,5. En este caso se utilizaron tres repeticiones por muestra de suelo tamizado de 10 gramos cada una y se le añadieron 25 mL de agua destilada. Se agitó durante 30 minutos y se dejó reposar durante 30 minutos para que se equilibrara la solución. Antes de medir hay que agitar para volver a agitar la suspensión la solución antes de ponerla en contacto con los electrodos, tras la medida se anota el resultado del pH-metro (Pansu y Gautheryou, 2006).

3.6.3 Determinación de la conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo (EC) es la capacidad de una muestra de suelo para permitir el paso de la corriente eléctrica. Este proceso se favorece por la presencia de iones en disolución, los cuales proceden de las sales inorgánicas disueltas. De este modo se crea una relación directamente proporcional entre la medida de la conductividad eléctrica y el contenido salino de los suelos.

Este parámetro es dependiente del voltaje aplicado; del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes, y de la viscosidad del medio en el que estos se encuentran. La conductividad es un parámetro dependiente de la temperatura, ya que en un medio acuoso al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad de este, por lo que se facilita el transporte iónico. La medición se lleva a cabo con un conductímetro de mesa GLP- 31, CRISON y se toma como referencia una temperatura de 25°C.

Para la medida de la conductividad hay que preparar una suspensión de suelo tamizado y agua desionizada con una relación peso-volumen 1:5. Para este caso se utilizaron tres repeticiones de los cuatro tipos de suelo, se pesaron 8 gramos de suelo tamizado a 2 mm y se añadieron 40 mL de agua destilada, se agita durante 30 minutos en un agitador y se deja reposar durante 24 horas para que se establezca la disolución antes de realizar la medida con el conductímetro (Vargas, *et al.*, 2018).

3.6.4 Determinación de la materia orgánica

La determinación de la materia orgánica es uno de los procesos importantes y necesarios para poder caracterizar el suelo. Ya que la concentración de carbono orgánico sirve para realizar una estimación de la materia orgánica del suelo, se utilizó el coeficiente de Waskman (Waskman, 1936) con el cual se determina que cantidad de carbono es oxidado por dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4); tras la reacción, el exceso de dicromato potásico, agente oxidante, será valorado con sal de Mohr (sulfato de amonio y hierro (II)) 0,5 N que nosotros mismos preparamos para la valoración. Una vez se conoce la cantidad de dicromato potásico reducido se calcula la cantidad de carbono orgánico oxidado.

La determinación se lleva a cabo siguiendo el método Walkey y Black, basado en la valoración con dicromato potásico. Primero se pesa 1,0 g de suelo tamizado, al cual cuidadosamente se le añaden 10 mL de dicromato potásico y 20 mL de ácido sulfúrico. Al añadir los reactivos hay que procurar que no impacten de forma súbita sobre el suelo, pues este puede dispersarse por las paredes del Matraz de Erlenmeyer haciendo que la reacción no se lleve a cabo por completo; tras añadir los reactivos hay que dejar reposar en una campana de extracción durante 30 min. Transcurrido este período de tiempo hay que detener la reacción, esto se realiza añadiendo 200 mL de agua y 10 mL de ácido ortofosfórico (H_3PO_4). Antes de realizar la valoración con sal de Mohr hay que añadir 5 gotas de difenilamina, un indicador de viraje de color; después se llena una bureta de 25 mL con sal de Mohr y se coloca el matraz Erlenmeyer debajo, y mientras se va agitando el matraz dejamos caer a velocidad controlada la sal de Mohr hasta que observamos un claro viraje de color y se obtiene un verde esmeralda (Nilo *et al.*, 2019).

$$\% \text{Carbono Orgánico} = \frac{(V_{\text{blanco}} - V_{\text{muestras}}) \times 0.5M \times 0.003 \times 100 \times f \times \text{mcf}}{\text{Peso de la muestra}}$$

$$f = \frac{2 \times V_{\text{blanco}}}{\text{mL sal de Mohr}} \quad \text{mcf (factor de corrección de humedad)}$$

Figura 7. Ecuación para el cálculo del método *Walkey y Black*.

3.6.5 Análisis espectral

Las medidas fueron tomadas a la misma hora todos los días, para lo que se estableció que se hicieran a las 10:00 h, teniendo en cuenta que la preparación del equipo conlleva aproximadamente 20 minutos para calentar el instrumental y su posterior calibración con un blanco *Spectralon* (Labsphere, North Sutton NH, USA). Para obtener los datos de evolución de la reflectancia medida con el espectrorradiómetro a lo largo de los días se procesaron los datos con el software SAMS. Mediante una técnica de suavizado basado en el algoritmo Savitzky-Golay se utilizó un polinomio de orden dos y con una ventana móvil de 10 nm (Steiner, 2002) se minimizó el ruido generado por picos de medida del espectro visible y el infrarrojo cercano de onda corta.

3.7 Análisis estadístico

A fin de estudiar las muestras obtenidas con las medidas de temperatura y humedad, así como las muestras del espectro radiómetro, se ha realizado un análisis estadístico descriptivo agrupando las distintas repeticiones de los suelos en cada tipo de suelo, para así obtener las medias y desviaciones estándares (SD). Con el objeto de relacionar los parámetros entre sí, se realizaron regresiones lineales obteniendo el coeficiente de correlación de Pearson (Field, 2005).

4. Resultados y discusión

Tras el proceso experimental llevado a cabo, se obtuvieron resultados, tales como la caracterización de los cuatro tipos de suelos, su pH, conductividad, su porcentaje de carbono y materia orgánica, y su textura. Los otros resultados, que son los fundamentales en este trabajo, son aquellos que determinan la precisión y exactitud del instrumental, comparando los datos obtenidos de temperatura y humedad. Por último, se compararon la humedad y temperatura de los suelos y la reflectancia obtenida con el radiómetro de campo.

4.1 Características edáficas de los suelos

Conocer las propiedades de los suelos es fundamental para poder relacionar los resultados obtenidos de las mediciones de temperatura y humedad con cada suelo. Las particularidades individuales de cada uno o las observaciones de sus aspectos generales nos pueden servir de forma provechosa para enfocar de una manera u otra el análisis de los resultados y su discusión.

Los resultados obtenidos figuran en la tabla 1 y tabla 2.

Tabla 1: Resultados obtenidos de los análisis realizados en los. Se muestran los resultados para los parámetros de carbono orgánico, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica.

Suelo	Carbono orgánico (%)		Materia orgánica (%)		pH (uds. pH)		Conductividad eléctrica (dS/m)	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	1,94	0,1	3,35	0,2	8,14	0,1	0,83	0,1
2	1,97	0,1	3,39	0,1	7,98	0,1	1,13	0,1
3	2,29	0,1	3,94	0,2	7,86	0,1	1,46	0,1
4	1,89	0,1	3,26	0,2	7,9	0,1	1,7	0,1

Tras la obtención de estos datos, surgen distintas características que vale la pena remarcar; el suelo con mayor porcentaje de materia orgánica es el suelo 3,

mientras que el que menor porcentaje tiene es el suelo 4. La materia orgánica es una característica estrechamente ligada a la retención de la humedad (Rattan Lal, 2020), por lo que más adelante habrá que comprobar si el suelo 3 retiene mayor humedad y el suelo 4 un menor valor de humedad. Respecto al pH podemos observar que el suelo más alcalino, el que tiene un mayor pH es el suelo 1, mientras que el suelo más ácido es el suelo 3. La salinidad del suelo se obtiene mediante el cálculo de la conductividad eléctrica, por lo que el suelo 4 es el que tiene una mayor conductividad eléctrica y por ende una mayor salinidad, mientras que el suelo 1 tiene una menor conductividad eléctrica. La presencia de sales en superficie puede afectar a la reflectancia de los suelos, esta será una observación importante a tener en cuenta (Paz-Pellat, Palacios-Sanchez y Ramírez-Ayala, 2018).

Tabla 2: Resultados de la textura medida por el método Bouyoucos.

Suelo	Limo		Arcilla		Arena	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	72,0	0,0	6,6	0,0	21,4	0,0
2	68,0	0,1	8,6	0,0	23,4	0,1
3	66,0	0,1	10,6	0,0	23,4	0,1
4	68,0	0,0	8,7	0,0	23,4	0,1

Sobre las características granulométricas de los suelos, la conclusión que se obtiene es que, tras la preparación de los suelos, se han obtenido cuatro suelos distintos en su composición, pero con alguna diferencia. Esto nos puede ayudar a comprobar la precisión de los instrumentos empleados para medir temperatura y humedad reduciendo la variabilidad del sustrato edáfico.

El hecho de que sean tan similares en sus características, aunque estas propiedades no se hayan medido con otros aparatos externos, son propiedades que influyen directamente con los parámetros que se midieron. En principio, un suelo como el 3, con un valor mayor que el resto en porcentaje de arcilla, retendrá mejor la humedad, y como consecuencia tendrá una temperatura menor.

Según la clasificación textural de la United States Department of Agriculture (USDA, 2017) los cuatro suelos son franco limosos.

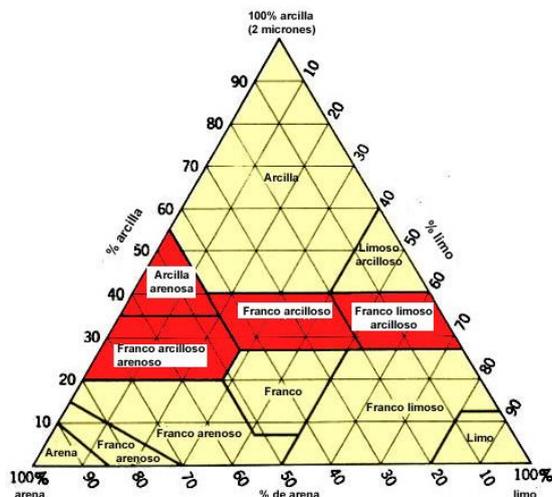


Figura 8. Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo (USDA, 2017).

4.2 Temperatura

Entre todas las sondas de temperatura encontramos variabilidad en los resultados. Para determinar cuál de los instrumentos empleados es más preciso, habrá que fijarse en aquel que tras los resultados ofrezca una menor desviación estándar a lo largo de todas las medidas. Esto implicará que los datos de ese instrumento son consistentes y más fiables. Por otra parte, para determinar el instrumento con la mayor exactitud de medida, sabiendo que desconocemos el valor real, se tendrán en cuenta los resultados de las medias para determinar que instrumento está más próximo a la media de valores obtenidos durante este experimento. A continuación, se ofrecen los resultados de los datos de medida de la temperatura en los suelos.

Tabla 3: Resultados de temperatura en el suelo 1.

Instrumento	Día 1		Día 2		Día 3	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	23,26	0,7	24,22	0,9	24,32	0,9
Checktemp2	23,42	0,4	24,3	0,7	24,32	0,7
Checktemp3	23,68	0,7	23,8	1,1	23,84	0,3
Digi T	22,54	0,5	23,12	0,6	23,46	0,6
Quartz T	22,48	0,2	23,56	0,8	23,42	0,5
WET T	24,32	0,2	26,3	1,1	26,22	0,5
HydraGO T	30,92	1,7	28,1	0,6	27,66	0,2
Instrumento	Día 4		Día 5		Día 6	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	25,86	0,6	25,48	0,4	27,2	0,5
Checktemp2	26,18	0,7	25,82	0,6	26,94	0,5
Checktemp3	26,22	1,0	26,44	1,3	27,16	0,8
Digi T	25,66	1,3	24,9	0,5	26,24	0,6
Quartz T	25,4	0,4	25,1	0,6	26,4	0,4
WET T	27,78	0,2	28,62	0,2	29,16	0,2
HydraGO T	27,92	0,3	28,2	0,4	29,08	0,3

Tabla 4: Resultados de la temperatura en el suelo 2.

Instrumento	Día 1		Día 2		Día 3	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	23,08	0,16	23,92	0,59	24,44	0,43
Checktemp2	23,34	0,26	24,54	0,59	24,62	0,74
Checktemp3	23,54	0,17	24,14	0,66	24,2	0,41
Digi T	22,74	0,56	23,22	0,517	23,42	0,19
Quartz T	22,46	0,21	23,26	0,49	23,54	0,5
WET T	24,48	0,51	26,94	0,98	26,28	0,52
HydraGO T	31,72	1,95	28,2	0,46	27,72	0,22
Instrumento	Día 4		Día 5		Día 6	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	26,28	0,44	25,64	0,32	27,38	0,78
Checktemp2	26,2	0,41	25,78	0,59	26,94	0,42
Checktemp3	25,8	0,21	26	0,43	26,94	0,5
Digi T	25,1	0,62	24,92	0,47	26,1	0,34
Quartz T	25,46	0,29	25,56	0,55	26,82	0,64
WET T	27,84	0,3	28,46	0,38	29	0,19
HydraGO T	27,98	0,2	28,3	0,3	29,02	0,16

Tabla 5: Resultado de la temperatura en el suelo 3.

Instrumento	Día 1		Día 2		Día 3	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	22,9	0,22	23,52	0,43	23,9	0,34
Checktemp2	23,08	0,29	23,98	0,37	23,92	0,44
Checktemp3	23,3	0,27	23,56	0,46	23,92	0,45
Digi T	22,4	0,19	22,94	0,38	23,2	0,23
Quartz T	22,48	0,24	23,04	0,62	23,3	0,40
WET T	24,38	0,36	26,04	0,45	25,9	0,26
HydraGO T	31,4	2,02	27,98	0,49	27,6	0,31
Instrumento	Día 4		Día 5		Día 6	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	25,78	0,60	25,5	0,32	26,86	0,61
Checktemp2	26,08	0,36	25,62	0,48	26,82	0,50
Checktemp3	25,78	0,30	25,68	0,57	26,7	0,47
Digi T	24,82	0,26	24,52	0,29	25,64	0,39
Quartz T	25,24	0,40	24,86	0,50	26,18	0,23
WET T	27,7	0,22	28,3	0,49	29,08	0,36
HydraGO T	27,82	0,20	28,14	0,31	28,96	0,25

Tabla 6: Resultado de la temperatura en el suelo 4.

Instrumento	Día 1		Día 2		Día 3	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	23,06	0,37	23,7	0,33	23,94	0,34
Checktemp2	23,18	0,26	23,8	0,57	24,04	0,29
Checktemp3	23,22	0,41	23,5	0,64	23,94	0,21
Digi T	22,48	0,15	23,24	0,47	23,2	0,33
Quartz T	22,52	0,23	23,12	0,54	23,3	0,16
WET T	24,28	0,23	25,92	0,79	25,82	0,35
HydraGO T	31,72	2,16	27,88	0,57	27,56	0,25
Instrumento	Día 4		Día 5		Día 6	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
Checktemp1	25,72	0,36	25,32	0,47	26,56	0,40
Checktemp2	25,72	0,28	25,44	0,23	26,72	0,37
Checktemp3	25,88	0,56	25,84	0,82	26,7	0,35
Digi T	24,88	0,28	24,44	0,29	25,96	0,40
Quartz T	25,18	0,33	24,74	0,34	26,12	0,29
WET T	27,64	0,15	28,62	0,60	29,26	0,47
HydraGO T	27,82	0,20	28,1	0,35	28,96	0,25

Como hemos comentado, el instrumento que mantenga una mayor consistencia en los datos será el más preciso, en este caso podemos observar que el *Quartz digitermo*, Quartz T en las tablas, tiene los valores más constantes en los distintos

suelos y a lo largo de los seis días de medidas mostrando una desviación estándar menor que el resto.

Ser el más preciso, como ya sabemos, no implica ser el más exacto, en esta ocasión podemos apreciar que el conjunto de los tres instrumentos *HANNA instruments Checktemp*, *Checktemp* en las tablas (tablas de la 3 a la 6), tienen una medición muy similar entre ellos, lo que podría ser indicativo de que son instrumentos fiables, y tal vez, los más exactos entre los instrumentos empleados.

No obstante, debemos ser cautelosos a la hora de elegir el criterio que aplicamos, puesto que la medición de temperatura del *HydraGo*, que es el instrumento más complejo y que mayor número de parámetros determina, da valores de temperatura relativamente altos comparados con el resto. Este aparato puede sobreestimar los valores de temperatura. Habrá que considerar pues, pese a haber llevado el mayor rigor posible en seguir los métodos de medición, la posibilidad de que el dato sea erróneo debido al manejo del instrumento, o bien que 5 cm de profundidad no sean suficientes para obtener un valor correcto para este dispositivo.

4.3 Humedad

A la hora de elegir cuál es la forma más precisa de medir la humedad, en nuestro caso, hay que tener en cuenta que se han utilizado tres instrumentos distintos, dos sondas y un granatario. Por ello, disponemos de tres medidas. Las dos de las sondas se calculan por estimación en función de los parámetros de diseño de cada instrumento, mientras que el granatario nos da el contenido de agua por gravimetría, es decir, habrá que esperar un valor más exacto, independientemente de lo preciso que pueda ser.

Como hemos visto en el apartado de las características edáficas de los suelos, el suelo 3 tiene un mayor porcentaje de arcilla y materia orgánica, y sabemos que esto está estrechamente relacionado con la retención de la humedad, habrá que comprobar si se cumple esta premisa. También puede darse el caso, de que este no sea el único parámetro que condicione la retención de la humedad y que, un menor porcentaje de arena lo favorezca también. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la medición de la humedad.

Tabla 7: resultados de la humedad en el suelo 1.

Día	WET %vol		HydraGo %vol		Humedad Gravimétrica	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	43,06	1,05	48,86	0,85	36,24	1,5
2	33,28	4,08	30,1	4,49	24,67	1,83
3	19,32	3,56	17,58	3,17	15,83	1,72
4	12,14	0,51	10,24	0,96	10,32	1,31
5	10,6	1,11	8,32	1,23	6,86	1,21
6	9,4	1,06	5,76	1,1	5,63	1,2

Tabla 8: resultados de la humedad en el suelo 2.

Día	WET %vol		HydraGo %vol		Humedad Gravimétrica	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	41,9	1,23	46,42	2,56	34,61	1,34
2	31,44	3,84	32,4	4,85	23,08	1,58
3	20,5	1,74	17,92	2,97	14,37	1,32
4	13,26	1,49	11,5	1,08	9,52	0,82
5	9,84	0,92	8	1,86	6,31	0,68
6	8,44	2,19	4,82	1,67	5,29	0,65

Tabla 9: resultados de la humedad en el suelo 3.

Día	WET %vol		HydraGo %vol		Humedad Gravimétrica	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	41,76	0,68	47	3,53	35,75	1,08
2	29,06	4,55	30,76	5,69	23,64	0,94
3	19,76	2,89	18,34	3,35	14,78	1,12
4	12,66	1,77	12,34	0,84	10,06	0,85
5	10,14	1,16	8,12	2,06	7,07	0,83
6	8,44	2,19	6,02	1,38	5,82	0,91

Tabla 10: resultados de la humedad en el suelo 4.

Día	WET %vol		HydraGo %vol		Humedad Gravimétrica	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
1	41,48	0,89	46,16	3,87	34,57	1,27
2	30,04	3,15	28,24	2,34	22,49	1,76
3	18,56	1,7	17,34	2,34	13,97	1,74
4	12,26	2,41	12,34	1,35	9,35	1,45
5	10,38	1,28	8,42	1,6	6,17	1,31
6	7,98	1,65	6	0,85	5,09	1,17

Tras el análisis de los datos, podemos comprobar que, aunque sí es cierto que los suelos con mayor porcentaje de arcilla retienen mejor la humedad, este no es el único factor. El limo también forma parte de la fracción fina (Yong-wang Zhang, *et al.*, 2021), y tiene un papel importante en la retención de la humedad. Como resultado, el suelo 3 es el que mejor retiene la humedad, pero con una diferencia mínima con respecto al suelo 1, que es el que mayor porcentaje de limo posee.

En cuanto a la consistencia de los datos para definir la precisión en la medida de la humedad, la menor variabilidad de los valores la obtenemos con el cálculo de la humedad gravimétrica. Aparentemente, las dos sondas, *HydraGo* y *WET HH2*, sobreestiman el valor de la humedad, ocasionando una discordancia en los resultados para cada suelo y día de medida. Sus datos nos hacen pensar que no sean instrumentos óptimos a la hora de tomar medidas rigurosas para un estudio en el laboratorio. Pero hay que tener en cuenta un factor más, estas dos sondas son de muy fácil manejo, transportables para muestreos de campo y cuentan con software propio de fácil control que nos ofrece los resultados *in situ*, por lo que el uso recomendable sería este, una ventaja frente al aparatoso transporte del granatario y el detalle de tener que calcular posteriormente los valores de la humedad.

4.4 Radiometría y relación con la humedad y temperatura

Cada suelo tiene una firma espectral particular, la signatura espectral, aunque todas tienen picos de reflectividad y emisión térmica similares, la reflectancia que alcanzan no es la misma y esto nos permite obtener datos de esas diferencias. Con el uso del espectrorradiómetro hemos podido obtener los espectros de reflectancia para cada suelo. Junto a los datos previamente obtenidos de temperatura y humedad, generaremos una serie de regresiones con las que trataremos de comprobar si existe una correlación entre ellos y la reflectancia.

A continuación, se muestran los espectros que hemos obtenido para los cuatro suelos compuestos en la figura 9 y las gráficas de las regresiones en las figuras de la 10 a la 13.

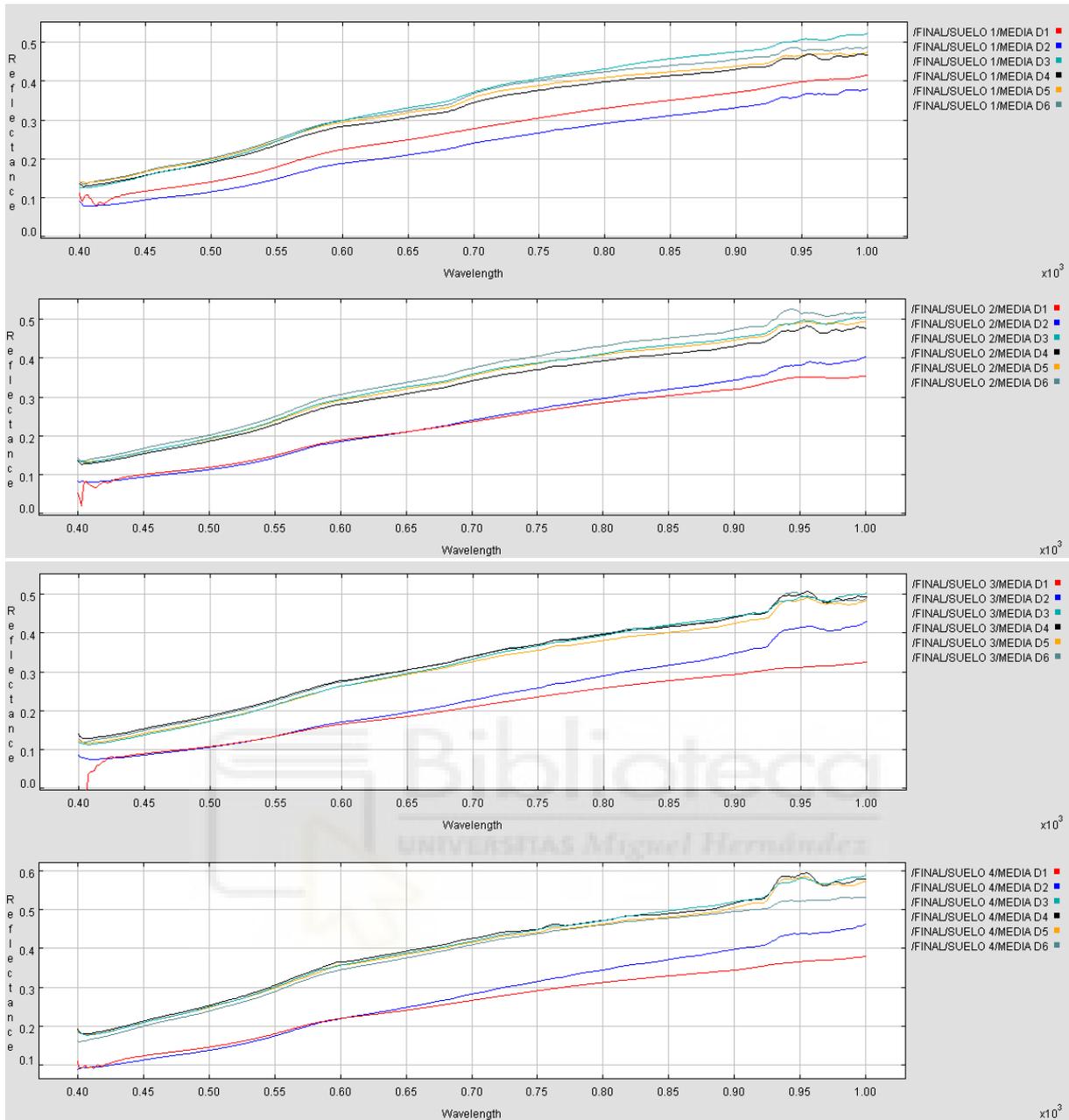


Figura 9. Graficos de las firmas espectrales del suelo 1 al suelo 4 y de 400 nm a 1000 nm.

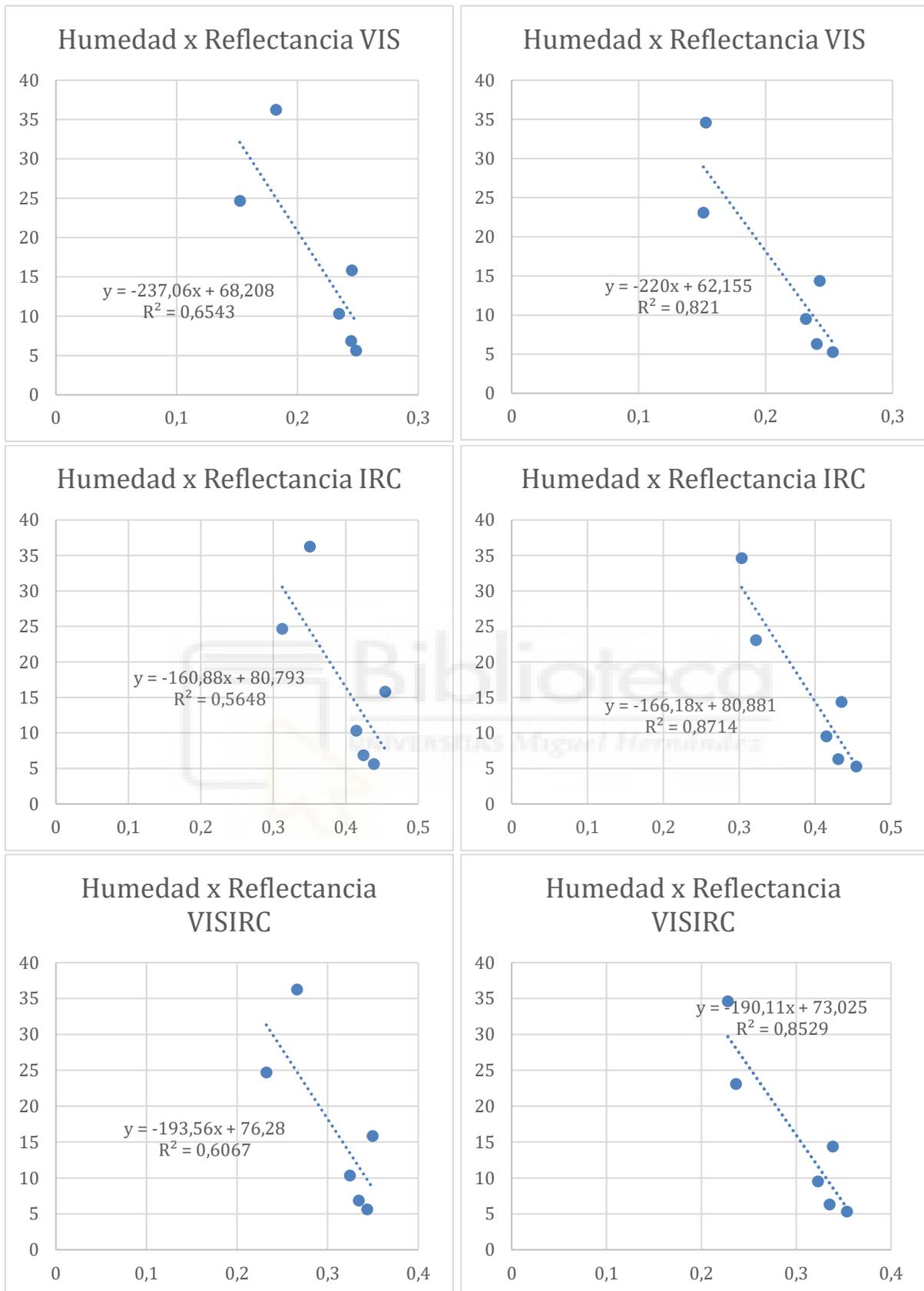


Figura 10. representación de los coeficientes de regresión lineal de la humedad y la reflectancia en los suelos 1 (izquierda) y suelos 2 (derecha).

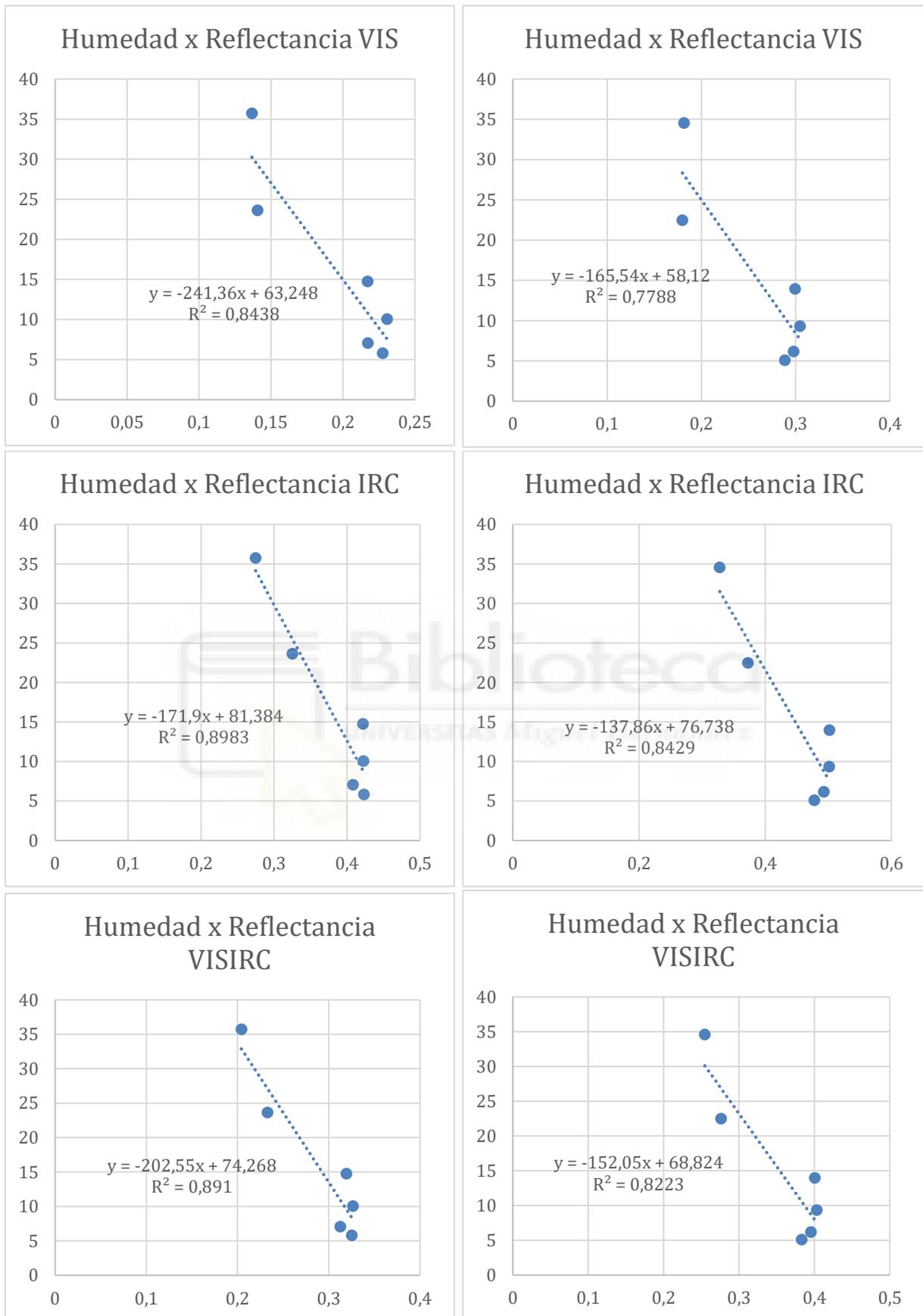


Figura 11. representación de los coeficientes de regresión lineal de la humedad y la reflectancia en los suelos 3 (izquierda) y suelos 4 (derecha).

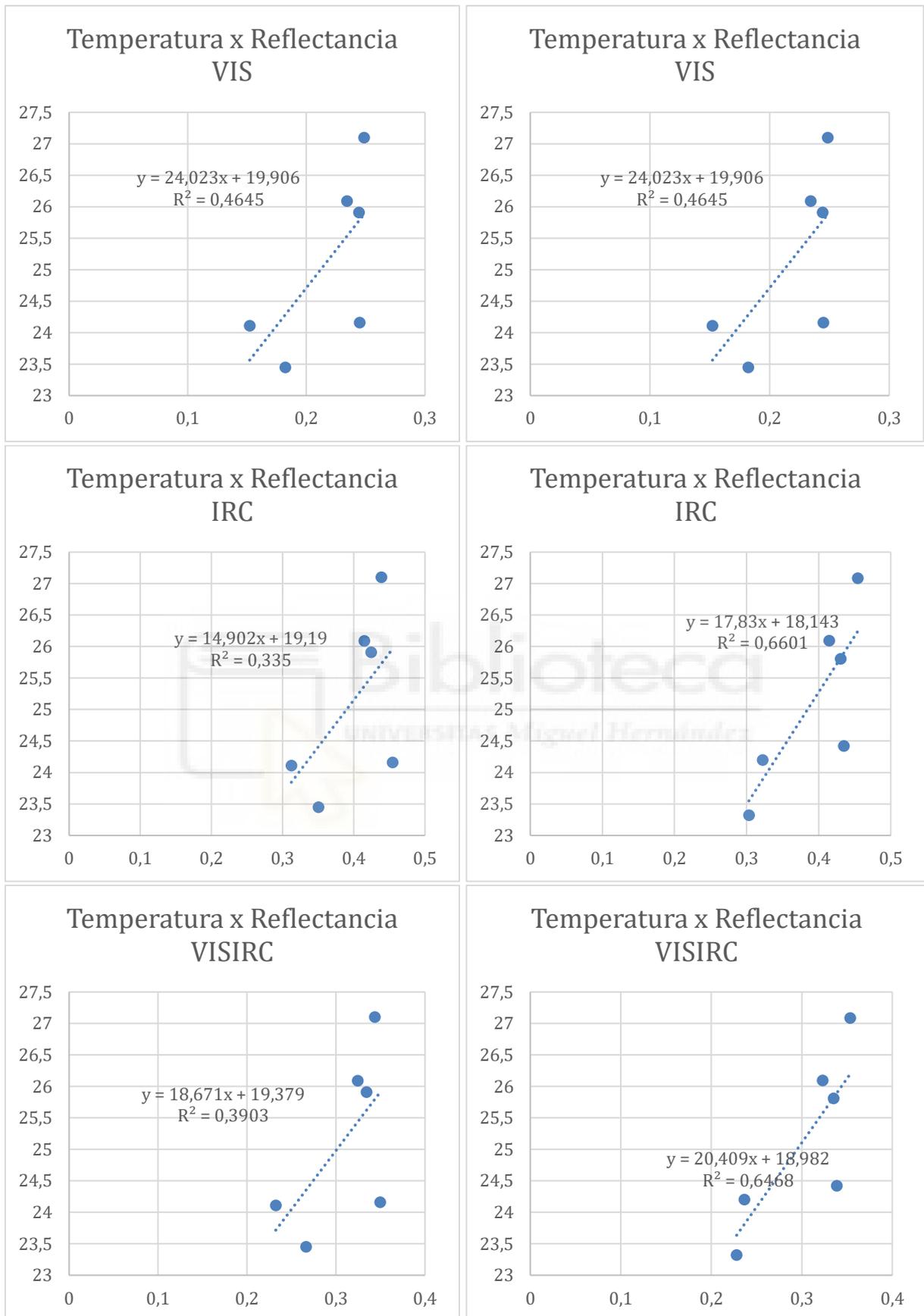


Figura 12. representación de los coeficientes de regresión lineal de la temperatura y la reflectancia en los suelos 1 (izquierda) y suelos 2 (derecha).

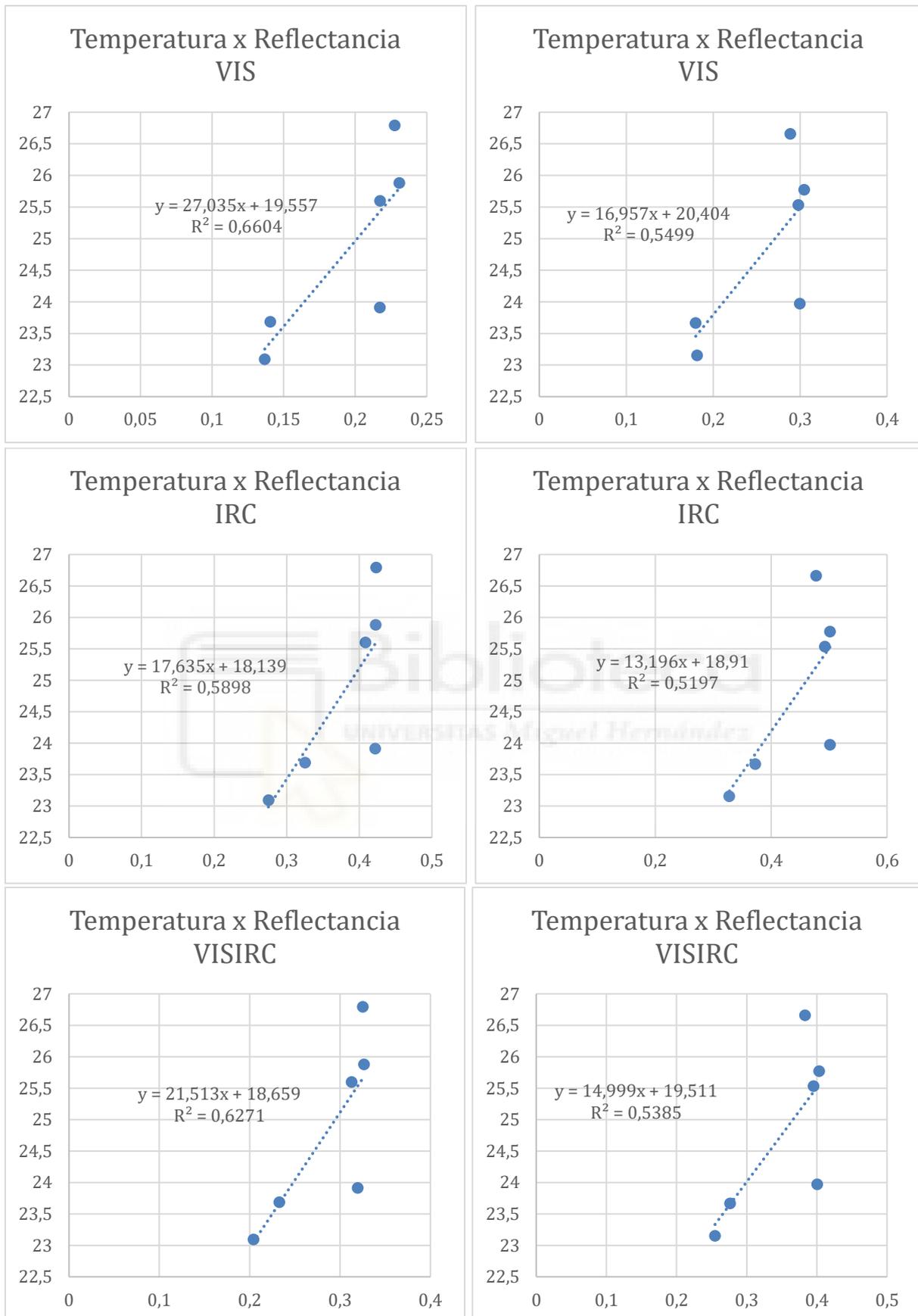


Figura 13. representación de los coeficientes de regresión lineal de la temperatura y la reflectancia en los suelos 3 (izquierda) y suelos 4 (derecha).

Como se puede observar en las gráficas de la figura 9, los suelos presentan una mayor reflectancia en la región del infrarrojo que en la región del espectro visible, que suele estar asociada a la presencia de humedad en los suelos.

Los valores promedio de reflectancia en la región del espectro visible (VIS) de 400 a 700 nm, la región del infrarrojo cercano (IRC) de 700 a 1000 nm y la suma de ellas (VISIRC) para todo el espectro de 400 a 1000 nm se han confrontado con los valores de humedad y temperatura en los suelos.

A partir del espectro medido en campo con el radiómetro portátil queremos ver la posibilidad de estimar la temperatura y la humedad de los suelos. Para ello realizaremos unas regresiones de los espectros medidos para cada región. Con el fin de comprobar si existe una correlación, se ha realizado una regresión con los datos de la humedad por gravimetría, debido a que es procedimiento que utiliza el instrumento que ofrece una mayor exactitud en la medida de la humedad del suelo. Por otro lado, se ha utilizado el promedio de los tres instrumentos *Checktemp* para realizar la regresión lineal de la temperatura, porque al tener un mayor número de repeticiones, nos permite tener unos valores representativos. A continuación se muestran los valores obtenidos en las tablas.

Tabla 11: Valores de los coeficientes de regresión lineal (R^2) obtenidos comparando humedad y reflectancia VIS, IRC y VISIRC.

Espectro	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
VIS	0,6543	0,821	0,8438	0,7788
IRC	0,5648	0,8714	0,8983	0,8429
VISIRC	0,6067	0,8529	0,891	0,8223

Tabla 12: Valores de los coeficientes de regresión lineal (R^2) obtenidos comparando temperatura y reflectancia VIS, IRC y VISIRC.

Espectro	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
VIS	0,4645	0,6236	0,6604	0,5499
IRC	0,335	0,6602	0,5898	0,5197
VISIRC	0,3903	0,6468	0,6271	0,5385

Los coeficientes de regresión lineal de la temperatura son menores que los obtenidos para la humedad, en general los valores de reflectancia nos pueden ayudar para estimar la humedad en los suelos, pero es más difícil estimar la temperatura en esta región del espectro utilizado (de 400 a 1000 nm).

En la tabla 11, vemos como la humedad está mejor relacionada con la reflectancia en todas las regiones, pero particularmente en el infrarrojo cercano (Cheng-Wen Chang, *et al.*, 2005). El suelo que mejor muestra este comportamiento es el suelo 3 mientras que el suelo 1 tiene los coeficientes de regresión más bajos. Esto podría deberse a que el suelo 3 contiene una mayor cantidad de materia orgánica como hemos visto en la tabla 1.

A pesar de que los coeficientes de regresión lineal son inferiores que los obtenidos en la humedad, se observa que el suelo 2 tiene, a grandes rasgos, los valores más altos.



5. Conclusiones y proyección futura

Tras la realización de este estudio, y teniendo presente las especificaciones técnicas de cada instrumento, podemos concluir que los instrumentos empleados no muestran una gran precisión y es difícil determinar su exactitud.

Queda patente que entre las mediciones reales de temperatura y humedad hay valores que sugieren que los equipos no miden con la exactitud que cabría esperar, teniendo en cuenta los valores de amplitud de medida proporcionados por los fabricantes.

Hemos llegado a la conclusión que algunos de los instrumentos utilizados generan unos valores que podrían estar sobreestimando algún parámetro del experimento realizado, por lo que quizás no hayan sido empleados en su lugar óptimo a la vista de los resultados, parecería que son más indicados para su uso en el campo, más que para su uso en experimentación. Por ejemplo, la sonda portátil *HydraGo*, probablemente tenga un uso más adecuado en el control de las variables de interés que interesan en una explotación agraria, donde el uso rutinario no requiere una precisión y exactitud tan fiables como se espera de un instrumento para la investigación.

Se ha encontrado una cierta relación positiva entre los valores de radiometría y la humedad de los suelos. Por otro lado, la relación entre la reflectancia y la temperatura no ha sido tan estrecha. A la vista de los resultados se podrían emplear los valores espectrales en el rango utilizado en este trabajo de fin de grado para estimar la humedad de los suelos.

Este trabajo ha sido una oportunidad para aprender el manejo de determinados instrumentos, y a la vez, para constatar la importancia del uso correcto del instrumental y el valor que tiene para la investigación cuando los datos generados son precisos y exactos.

Es necesario profundizar en los trabajos que permitan calibrar y analizar la precisión y exactitud de los instrumentos utilizados en la investigación. Sería deseable realizar más trabajos comparativos entre instrumentos, distintos grupos de trabajo y evaluarlos siguiendo las normas internacionales de forma periódica (UNE-NE, ISO, AENOR, etc...).

6. Bibliografía

Beretta A.N, Silbermann A.V, Paladino L, Torres D, Bassahun D, Musselli R, y García-Lamohte A. (2014) Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Cien. Inv. Agr.* 41(2): 263-271. doi: 10.4067 /S0718-16202014000200013

California State Water Resources Control Board (s.f.). *Tips for getting it, keeping it, proving it!*. California Government. Recuperado de: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/71a.pdf

Cheng-Wen Chang, David A. Laird, y Charles R. Hurburgh, Jr. (2005). Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties. *Soil Science.* 170(4):244-255. DOI: 10.1097/01.ss.0000162289.40879.7b

Czarnomski N, Moore G, Pypker T, Licata J, y Bond B. (2005). Precision and accuracy of three alternative instruments for measuring soil water content in two forest soils of Pacific Northwest. *Canadian Journal of Forest Research* 35(8):1867-1876. DOI: 10.1139/x05-121

FAO (2022). Textura del suelo. Recuperado de: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Field, A. (2005). *Discovering statistics using SPSS*. Londres, Reino Unido: SAGE Publications Ltd.

Harrel L, (2006). Software validation test plan and report: SAMS, versión 3.2. Recuperado de: <https://www.cstars.ucdavis.edu/software/sams/>

Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Gómez I, Koch M. (2008). Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. *Geoderma*, Vol.147, (pp.3-4).

Nilo, G. Bernaldo, B.G., Bertsch, F., Suvannang, N. y De Hayr, R. (2019). *Standard operating procedure for soil organic carbon. Walkey-Black method: tritiation and colorimetric method*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.

Pansu, M. y Gautheyrou, J (2006). *Handbook of soil analysis*. Berlín, Alemania. Springer-Verlag.

Paz-Pellat F, Palacios-Sánchez L. A. y Ramírez-Ayala C. (2018). Effect of soil soluble salts on crop reflectances and their implications in experimental design. *Terra Latinoamericana*. DOI: 10.28940/terra.v36i4.400

PRECISA (2022). *What is the Difference between Accuracy and Precision Measurements?*. Recuperado de: <https://www.precisa.co.uk/difference-between-accuracy-and-precision-measurements/>

Rattan Lal. (2020) Soil organic matter and water retention. *Agonomy Journal*. DOI: 10.1002/agj2.20282

Soil Science Division Staff. 2017. *Soil survey manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.

Steiner J, Termonia Y, Deltour J. (2002). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, (2002), 1627-1639, 36(8). DOI: 10.1021/ac60319a045

UNE-NE (2015). *Sistemas de gestión de la calidad. Directrices para la aplicación de la norma ISO 9001:2015*, Madrid, España: AENOR.

Vargas R., Pankova E., Balyuk S., Krasilnikov P. y Khasankhanova G. (2018) *Handbook for saline soil management*. Moscú, Rusia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.

Waskman, S.A. (1936). *Humus: origin, chemical composition, and importance in*

nature. Baltimore, EEUU: The Williams & Wilkins Company.

Yong-wang Zhang, Kai-bo Wang, Jun Wang, Changhai Liu y Zhou-ping. (2021). Shangguan Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports* 11, 9692 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-88914-0

