



Universidad de Jaén

Facultad de Ciencias
Experimentales

Caracterización físico- química y espectroscópica de suelos de cultivo de Senegal.

Autor: Javier Ariona Soriano

Fecha: 24/06/2025



CREA



Universidad de Jaén



Trabajo Fin de Grado

Caracterización físico-química y espectroscópica de suelos de cultivo de Senegal.

Javier Arjona Soriano
Jaén, Julio, 2025

Resumen.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. La evolución de la agricultura en Senegal.....	2
1.2. Parámetros de calidad referentes al suelo: Origen, definición, tipos y características.....	4
1.2.1. Parámetros químicos utilizados para la valoración de la fertilidad del suelo.....	7
1.3. Uso de técnicas espectroscópicas para análisis de suelos.....	11
1.4. Tipología del suelo senegalés y de la zona objeto de estudio.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1. Recogida y características de las muestras.....	17
3.2. Procedimiento analítico.....	19
3.2.1. pH.....	20
3.2.2. Conductividad.....	20
3.2.3. Capacidad de intercambio catiónico.....	20
3.2.4. Análisis elemental CNH (Carbono, Nitrógeno e Hidrógeno).....	21
3.2.5. Espectro infrarrojo.....	21
3.2.6. Fluorescencia de rayos X.....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1. Análisis del pH y conductividad eléctrica en suelos de cultivo y enmiendas orgánicas.....	24
4.1.1. Adaptación de la metodología oficial.....	24
4.1.2. Resultados.....	26
4.2. Caracterización espectroscópica.....	29
4.3. Análisis del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno.....	33
4.3.1. Análisis de contenido CNH en las muestras de suelo y enmiendas orgánicas.....	33
4.4. Análisis de resultados obtenidos en fluorescencia de rayos X (XRF).....	36
4.4.1. Análisis de materiales de referencia certificados.....	36
4.4.2. Resultados en las muestras de suelo.....	38
4.4.3. Resultados en las enmiendas orgánicas.....	41
4.5. Análisis de la capacidad de intercambio de cationes.....	42
4.6. Análisis de nutrientes disponibles mediante ICP-MS.....	46
5. CONCLUSIONES.....	48
6. BIBLIOGRAFÍA.....	48

Resumen.

En este trabajo se analizan, dentro del marco de un proyecto de cooperación, suelos de cultivo y enmiendas orgánicas utilizadas en éstos y provenientes de Senegal. Para ello, se han evaluado distintos parámetros de carácter químico (pH, conductividad eléctrica, contenido en CNH y capacidad de intercambio de cationes) y espectroscópico (infrarrojo medio con accesorio ATR y fluorescencia de rayos X). Los resultados revelan que los suelos estudiados no presentan las características más idóneas para su uso como tierra de cultivo debido, en especial, a sus bajas cantidades de materia orgánica, inferior al 1% en todos los casos, y de elementos necesarios para el normal desarrollo de los cultivos.

Otros hechos comprobados son: Valores de conductividad bajos en los suelos y altos en las enmiendas orgánicas, relaciones C:N inusualmente bajas, altas presencias de N e H, poca disponibilidad de elementos como el Fe, el K o el Ca.

Abstract.

In this study, carried out within the framework of a cooperation project, agricultural soils and the organic amendments applied to them in the Ndoum region, Senegal, have been analyzed. For this goal, several chemical parameters (pH, electrical conductivity, CNH content, and cation exchange capacity) and spectroscopic techniques (mid-infrared spectroscopy with ATR accessory and X-ray fluorescence) were evaluated. The results indicate that the soils analyzed don't show the most appropriate characteristics for use as arable land, mainly due to their low organic matter content—less than 1% in all cases—and the deficiency of essential elements required for normal crop development.

Other findings include: low electrical conductivity values in the soils, contrasted with high values in the organic amendments; unusually low carbon-to-nitrogen (C:N) ratios, associated with high nitrogen and hydrogen contents; and limited availability of elements such as iron (Fe), potassium (K), and calcium (Ca).

1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la historia, la agricultura ha constituido un motor económico fundamental para la evolución y el crecimiento de las sociedades en distintos periodos históricos. Dicha relevancia permanece hasta la actualidad, en la que la agricultura representa un área de especial importancia económica y social, con especial impacto en aquellas zonas que cuentan con tradición agrícola y que disponen tanto de un terreno de cultivo como de instrumental para su cosecha. Concretamente, se estimó que para el año 2050 sería necesario aumentar en un 50% la producción de alimentos para consumo humano con respecto a los datos de 2012, ya que se estima que el aumento de la población para este año llegará a los 9,73 billones de personas. A pesar de que se han registrado aumentos de producción mayores en diversos periodos históricos (1961-2011) (FAO, 2017), diversos factores globales como el cambio climático, cuya incidencia es notable y sus efectos deben tenerse siempre presentes, u otros como los conflictos bélicos, crisis y desastres naturales, presentan una dificultad añadida que provoca que esta meta sea notoriamente compleja. Este aspecto cuenta con especial relevancia en el continente africano, en el que la agricultura supone un soporte económico de gran importancia. Concretamente, el marco de este proyecto se enfoca en el norte de Senegal, país del centro de África en el que, como se desarrollará a continuación, todo lo anterior influye especialmente.

1.1. La evolución de la agricultura en Senegal.

Los últimos reportes económicos de organismos internacionales muestran, como se citó anteriormente, el peso de la agricultura en este país. En 2021, el Banco Mundial apuntaba que un 15% del producto interior bruto (PIB) se debía a la actividad agraria, ocupando en el proceso a un 22% del total de la población activa en ese año. Además, la FAO (Food and Agriculture organization), estimó en el mismo periodo que 2,5 millones de hectáreas de terreno eran cultivables dentro del territorio senegalés, siendo el arroz, la sandía, el cacahuete y el mijo las principales producciones agrícolas (Figura 1.1). En este caso, predominan los sistemas de trabajo tradicionales, reflejados en el uso de mano de obra de baja cualificación durante largas jornadas de trabajo, además de una escasa utilización de sistemas mecanizados (González, 2023). Dicho sistema se ha

mantenido a lo largo de la historia tradicional senegalesa. Antes de las diversas colonizaciones europeas y americanas, se constituyeron en el país diversas sociedades caracterizadas por la descentralización y unidas por aspectos como la religión tradicional, *awasena*, y una serie de altares *uciin*, que regulaban las actividades de interés de estas comunidades y que reunían tópicos de diferentes índoles, como la fertilidad, el matrimonio, o la agricultura. La llegada de los franceses a la isla Carabane en 1836 y su posterior expansión provocaron una extensión de la agricultura; sin embargo, al no pertenecer las tierras a los senegaleses, este periodo llevó a la pobreza de la población, además de la pérdida de cultivos locales, fauna y tradiciones en cuanto a técnicas de labranza.

A estos aspectos hay que sumar las tasas de pobreza y desigualdad en países del continente africano, las cuales parecen aumentar anualmente e intensificarse en áreas rurales, complicando el objetivo de erradicar la hambruna antes del año 2030. En este trabajo se estudia el caso de Senegal, un país situado en la zona occidental del continente africano y que cuenta con un clima tropical, al igual que en el resto de países en la zona ecuatorial. Esto implica que las temperaturas no oscilan demasiado durante el año. Sumado al efecto amortiguador de la costa, las diferencias de temperatura se reducen aún más.

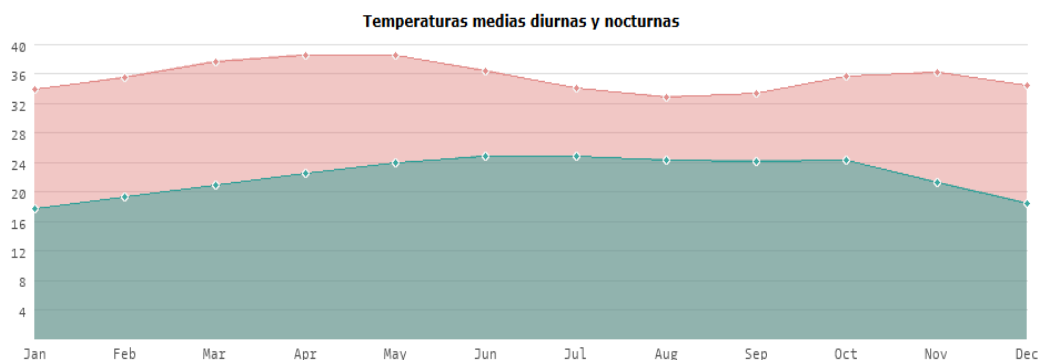


Figura 1.1: Evolución de la temperatura media mensual en Senegal. Fuente: Weather and Climate (weatherandclimate.com/Senegal).

Como se puede apreciar en la Figura 1.1, las temperaturas se mantienen, de media anual, entre los 32 y los 38°C, aunque algunos datos en el interior del país apuntan a días con temperaturas de hasta 44 grados. En cuanto a las temperaturas mínimas, se mantienen entre los 18 y los 25°C durante el transcurso del año.

En este marco se encuentra el proyecto que la organización ENDA PRONAT, en colaboración con otras entidades como Solidaridad Internacional Andalucía (SIA), lleva a cabo en países como Senegal. Sus principales objetivos pasan por implementar modelos de agricultura ecológica en estos países, además de concienciar socialmente de la importancia de la agricultura y de la autosuficiencia, el trabajo cooperativo, la igualdad en el trabajo entre hombres y mujeres y el uso de otras vías de aporte nutricional al suelo, como el compost o el bokashi, que no pasen necesariamente por la utilización de fertilizantes nitrogenados artificiales.

Este Trabajo Fin de Grado se encuentra ubicado en el contexto de una colaboración entre la universidad de Jaén y las organizaciones anteriores con objeto de hacer una primera valoración del estado de los suelos, analizándolos química y espectroscópicamente para registrar el estado inicial de los mismos.

1.2. Parámetros de calidad referentes al suelo: Origen, definición, tipos y características.

La comprensión del suelo como base de la actividad agrícola se trata de un aspecto clave a la hora de desarrollar acciones necesarias que mejoren la productividad y el estado del mismo. Para ello, es conveniente, en primer lugar, aclarar qué se entiende por suelo.

A pesar de que hay varias definiciones, dependiendo del contexto en el que se trabaje, en este caso, se puede definir el suelo como: *“Un sistema estructurado, heterogéneo y discontinuo, fundamental e irremplazable, desarrollado a partir de una mezcla de materia orgánica, minerales y nutrientes capaces de sostener el crecimiento de los organismos y microorganismos.”* (Atlas y Bartha ,2002; Nanniperi et al. 2003). El suelo, por tanto, presenta contribuciones a nivel físico (reflejado en características como la estructura, textura, formación de agregados, etc.), químico (cambios en la composición, acción de diversos compuestos como agua, CO₂ o adición de fertilizantes) y biológicos (degradación y aporte de materia orgánica por la microbiota, producción de CO₂ en la respiración de la vegetación, intervención en los ciclos biogeoquímicos, etc), siendo la mezcla de todos estos la que marca la evolución del suelo en una u otra dirección. (García, Ramírez Suarez y Sánchez 2012).

Además de todo lo anterior, se debe tener en cuenta la acción humana, ya que diversas acciones sobre el suelo provocan alteraciones en los ciclos naturales, provocando un reajuste que llevará las características anteriores a un nuevo equilibrio. En el caso de terrenos agrícolas, se debe garantizar que el suelo a cultivar cumpla con una serie de características que garanticen el correcto crecimiento de los cultivos durante largos periodos de tiempo o, en su defecto, durante el tiempo en el que se vaya a explotar, siempre y cuando se garantice su recuperación. En ocasiones, los terrenos seleccionados no cumplen con las características consideradas necesarias para el crecimiento de los cultivos. Entre estas, se podrían considerar, por ejemplo: la falta de nutrientes y microorganismos en el suelo, ausencia de canales para la infiltración de aguas, contaminación debida a diversos motivos, etc. Si bien se recurre, en algunos casos, a fertilizantes y diversos tipos de plaguicidas y herbicidas para solucionar algunos defectos como la falta de nutrientes, existen efectos provocados por la sobreexplotación del suelo que no pueden solventarse en un corto periodo de tiempo. Además, debe sumarse a lo anterior que el uso de este tipo de compuestos, de tipo inorgánico mayormente (conocidos como fertilizantes minerales), afectan a las propiedades y a la salud del suelo, definida en los siguientes términos: *“La capacidad continuada de un suelo para funcionar como un ecosistema vital y vivo que sostenga a plantas, animales y humanos.”* (Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I. et al, 2020). Dicha salud del suelo se ha extendido, en los últimos años, pasando de afectar únicamente a la eficiencia y calidad de los cultivos a otros aspectos como la calidad del agua, el cambio climático y la salud humana.

En este contexto, se habla en un primer momento de suelos fértiles o suelos con calidad como aquellos con características adecuadas para una agricultura eficiente y viable en el medio-largo plazo. A pesar de que a lo largo de la historia no se ha establecido una definición consensuada de suelo fértil/suelo con calidad, se tomará como base que la calidad del suelo es: *“la capacidad del suelo para desempeñarse dentro de los límites de un ecosistema natural o mejorado, sostener la productividad de las plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y el agua y sostener la salud humana y el hábitat.”* (Doran y Parkin, 1994). A la hora de comparar entre sí distintos tipos de suelos en base a

sus características, resulta de gran utilidad definir una serie de parámetros evaluables y comunes a todos los suelos mediante los cuales se pueda decidir cuál es la tipología de suelo más afín. Para ello, se utilizan los indicadores de la calidad del suelo. Éstos son propiedades del suelo relacionadas directamente con el uso dado al mismo y que permiten determinar si el uso afecta en el desempeño de sus funciones. Para ello, dependiendo del uso que se le quiera dar, se analizan un conjunto de variables de carácter físico, químico y biológico que dan una idea de la evolución del suelo con respecto a su utilización.

Los indicadores físicos se relacionan con aspectos estructurales del mismo, siendo uno de los más relevantes la estabilidad de agregados por evaluar la resistencia de un determinado suelo ante la erosión (Bastida et al, 2008).

Por su parte, los indicadores químicos reflejan las condiciones en las que se encuentra el suelo en ese momento, siendo fundamentales para concluir si unos cultivos pueden o no desarrollarse. Entre estos, los indicadores más relevantes son: pH, conductividad eléctrica, presencia de materia orgánica y resto de elementos necesarios, como N, H, S, P, Mg, Ca, etc. Junto a estos se analizan otras variables como la capacidad de intercambio de cationes, parámetro que informa de la cantidad de iones disponibles para los distintos organismos que interactúen con el suelo.

Por último, los indicadores biológicos, que se encuentran estrechamente relacionados con los anteriores, son los más sensibles a pequeñas variaciones en las condiciones del suelo, por lo que en un estudio exhaustivo y detallado deben tenerse en cuenta. Estos incluyen parámetros relacionados con organismos y microorganismos que desarrollen su actividad vital en el suelo. Algunos autores consideran el C producido por la biomasa microbiana como el más relevante por reflejar cambios en el suelo debido a la gestión y la contaminación del mismo.

Dado que se pueden tomar en cuenta cientos de aspectos para uno de los tres tipos de indicadores, en cada caso se toman un conjunto mínimo de datos, o Minimun Data Set (MDS), utilizados en la evaluación de la calidad del suelo (Castillo et. al, 2021). Atendiendo a las características del suelo, las propiedades que se quieran analizar o la actividad a la que estén dedicados.

Independientemente de todo lo anterior, todos los parámetros analizables que se utilicen como indicadores del suelo deben respetar una serie de premisas: En primer lugar, deben ser fácilmente medibles y comprensibles, tanto por los productores como por los especialistas, además de estar apoyados en información objetiva. Deben ser adecuados, en segundo lugar, al lugar y objeto de estudio, reflejar la sostenibilidad que se pretende evaluar y, fundamentalmente, ser sensibles a los cambios que sufra el suelo, tanto en procesos de degradación como en su posterior recuperación. Este Trabajo Final de Grado se centra, concretamente, en la evaluación de las características químicas del suelo

1.2.1. Parámetros químicos utilizados para la valoración de la fertilidad del suelo.

Para estudiar el grado de fertilidad y uso dado a los suelos muestreados, se han elegido una serie de parámetros (pH, conductividad eléctrica, contenido en carbono, nitrógeno e hidrógeno, capacidad de intercambio de cationes, etc), los cuales se desarrollan a continuación, destacando su influencia en las condiciones del suelo:

En primer lugar se hablará del pH. El pH es un parámetro crucial al influir directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y en numerosos procesos químicos que se dan en el suelo. Para ello, previamente es necesario establecer el intervalo de pH en el cual un suelo es óptimo en cuanto a su uso para actividad agrícola se refiere. Concretamente, se considera que la absorción óptima de nutrientes por la mayoría de plantas, incluyendo cultivos, se sitúa en valores de pH entre 5.0 y 6.5. En términos agrícolas, se considera que un sustrato o una disolución con nutrientes es ácido cuando su valor de pH es inferior a 5.0. Por otra parte, aquellos sustratos o disoluciones nutritivas con valores de pH por encima de 7.0 se consideran alcalinas. La acidificación y alcalinización de los suelos puede producirse a partir de la adición al medio de fertilizantes, agua de riego, etc, cuyo valor de pH difiera del valor de pH original del suelo. Por ejemplo, en un suelo óptimo de pH 6,3 este valor puede verse modificado al añadir fertilizantes de carácter ácido o alcalino y agua de riego con pH alcalino (Durán et. al, 2009)

Sobre esta última, se sabe que el uso de unos determinados fertilizantes como el sulfato amónico; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) ayudan a su acidificación, mientras que otros como el nitrato de potasio, KNO_3 , provoca su alcalinización. Desde el punto de vista práctico, en cuanto a las aguas de cultivo y fertilización, su clasificación con respecto al pH se recoge en la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Clasificación de las aguas de fertilización y cultivo en función del pH. (Adaptado de Durán et. al, 2009)

Categoría	pH disolución nutritiva
Óptima	5.5 < pH < 6.5
Subóptima	6.5 < pH < 7.5
Inadecuadas	pH > 7.5

Por otra parte, los suelos de cultivo presentan otra clasificación con respecto a su valor de pH, que se recoge a continuación en la tabla 2. En el apartado de resultados se clasificarán las muestras de suelo acorde con esta distinción. Además, se recogen algunos posibles efectos adversos en cada caso.

Tabla 1.2: Clasificación de los suelos de cultivo en cuanto a su pH. (Adaptado de: Navarro et al, "Análisis de suelos y aguas; aplicación agrícola")

Rango de pH	Tipología de suelo	Posibles efectos adversos
< 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones del suelo muy desfavorables.
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por efecto del aluminio.
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido	Deficiencia de Ca, K, Mg, N, P, S, Mo; exceso de Cu, Fe, Mn, Zn, Co; actividad bacteriana escasa.
5,6 – 6,0	Medianamente ácido	Suelo adecuado para la mayoría de los cultivos.
6,1 – 6,6	Ligeramente ácido	Disponibilidad máxima de nutrientes.
6,6 – 7,3	Neutro	Efectos tóxicos mínimos.
7,4 – 7,8	Medianamente básico	Presencia de carbonato cálcico en el suelo.
7,9 – 8,4	Básico	Disminución de la disponibilidad de P y B; deficiencia creciente de Cu, Fe, Mn, Zn, Co;
8,5 – 9,0	Ligeramente alcalino	Problemas mayores de clorosis férrica.
9,1 – 10	Alcalino	Presencia de carbonato sódico en grandes cantidades.

> 10	Fuertemente alcalino	Elevado porcentaje de Na intercambiable; actividad microbiana escasa; poca disponibilidad de micronutrientes.
----------------	----------------------	---

Cuando el pH se sitúa fuera del rango óptimo en el suelo o en el agua de riego, pueden empezar a aparecer problemas de diversos tipos. Un pH inadecuado puede provocar que las raíces de la planta se vean afectadas antes de que la propia planta presente síntomas relativos a carencias, por lo que es necesario tener un control del pH del suelo y de los productos que se utilizan en este en orden de mantener la cantidad y calidad de los cultivos agrícolas.

Otro de los puntos a tener en cuenta si se habla de suelos de cultivo agrícola es la presencia o ausencia de cationes metálicos asimilables por dichos cultivos. Como es sabido, el parámetro asociado a la cantidad de iones en una disolución es la conductividad, definida como la capacidad de un sistema para conducir la corriente eléctrica. Valores altos de conductividad eléctrica implican una alta presencia de iones y viceversa. Por tanto, este parámetro será de utilidad a la hora de establecer las condiciones de los suelos estudiados. Concretamente, se ha demostrado en estudios (Cortés et al., 2013) la relación entre la conductividad eléctrica de un suelo y la disponibilidad de ciertos nutrientes para las plantas. Principalmente, la conductividad eléctrica se utiliza para clasificar los suelos según su salinidad, además de como parámetro adicional de ayuda en la medida de otras propiedades o, en otros casos, como datos para la elaboración de mapas de conductividad, ya que es de interés para el estudio de los suelos.

En la tabla 1.3 se pueden ver los distintos tipos de suelos en cuanto a su salinidad se refiere.

Tabla 1.3: Clasificación de suelos con respecto a su conductividad eléctrica. (South Dakota Soil Health Coalition, s.f.)

Rango de conductividad eléctrica (dS/m)	Tipo de suelo
0-2	No salino
2-4	Muy ligeramente salino
4-8	Ligeramente salino
8-16	Moderadamente salino

>16	Fuertemente salino
-----	--------------------

Un medio ligeramente salino (Conductividad eléctrica >4 dS/m) puede ser indicativo de problemas con la salinidad del medio. Entre otros, se encuentran la incapacidad de los cultivos para absorber agua, incluso cuando esta está presente, debido a la diferencia de concentración entre el medio de la planta y el medio exterior, que sería hipertónico con respecto a la primera. Además, afecta a la actividad microbiana del suelo.

Con respecto a las aguas de fertilización y de riego, se considera que una conductividad eléctrica con un valor inferior a 0,75 dS/m es favorable para el desarrollo de los cultivos (South Dakota Soil Health Coalition, s.f.)

Por otra parte, se debe tener en consideración, a la hora de tratar sobre la fertilidad de un suelo, la cantidad de materia orgánica presente en el mismo. La materia orgánica de un suelo es una mezcla compleja y variable de componentes. Entre otros, se pueden encontrar: restos biológicos animales o vegetales con estructura organizada, productos intermedios de dichos restos o compuestos fácilmente solubles.

En cuanto a su clasificación, podemos distinguir entre tres tipos de suelos en cuanto a su contenido en materia orgánica se refiere (Garrido, 1994) tal que:

- Suelos con menos de un 1% de materia orgánica con respecto al total de la muestra se consideran bajos en materia orgánica.
- Suelos con un porcentaje de materia orgánica entre el 1 y el 3% del total se consideran de contenido orgánico medio.
- Suelos con más de un 3% de materia orgánica total se consideran suelos con alto contenido orgánico.

Por último, se analizará la capacidad de intercambio de cationes de los suelos analizados. Este parámetro mide la capacidad que tiene un determinado sistema, en este caso un suelo, para intercambiar cationes con otros organismos, como pueden ser las plantas. Un suelo con una baja capacidad de intercambiar cationes con el resto del medio dificulta el crecimiento de las especies en

contacto con él, ya que aunque haya una presencia adecuada de nutrientes, éstos no pasan correctamente a los distintos seres vivos.

Con respecto a los valores habituales de capacidad de intercambio de cationes (o CIC), éstos dependen de una serie de variables como: la cantidad de materia orgánica, el pH, el tipo de suelo, etc.

Para establecer alguna clasificación orientativa, se tomará como referencia la establecida en (Landon, 1991), en la que se clasifican los distintos tipos de suelos en base a un rango de valores de la capacidad de intercambio de cationes.

Tabla 1.4: Clasificación general de los suelos en base a su valor de CIC. Fuente: "Methods for Soils Analysis Used In Soil Survey (Landon J.R. 1991)

Categoría de suelo	Rango de CIC (cmol/kg de suelo)
Muy baja	<5
Baja	5-15
Media	15-25
Alta	25-40
Muy alta	>40

Sin embargo, los métodos clásicos de caracterización de suelos tienen una serie de costes y tiempo asociados que, en ocasiones, retrasan la toma de decisiones preventivas en situaciones en las que éstas pueden tener especial impacto, además de la destrucción de parte de la muestra de suelo analizada por parte de algunas técnicas. Con este fin, en los últimos años se han postulado diferentes técnicas para obtener información mayoritaria y rápida de un suelo. Entre estas, las técnicas espectroscópicas, fundamentalmente en el campo del espectro infrarrojo, se están aplicando como forma de dar a expertos y agricultores una visión a grandes rasgos del estado del suelo, siendo una forma de comprobar si la gestión de la tierra en ese tiempo y su uso han contribuido positiva o negativamente a la calidad del mismo (Rodríguez, Garcia, 2016)

1.3. Uso de técnicas espectroscópicas para análisis de suelos.

Entender la evolución y la variabilidad de un suelo es fundamental para mejorar la productividad y sostenibilidad del mismo. Para ello, es necesario el uso de herramientas que proporcionen información de forma rápida, ya que el tiempo

que demoran los análisis tradicionales pueden complicar las decisiones y actuaciones que requieran rapidez; esto se hace especialmente importante en regiones menos desarrolladas, en las que las instalaciones para el análisis de suelos son escasas y la necesidad de herramientas asequibles para la evaluación de la fertilidad de un determinado suelo (Dasgupta et al, 2024). El uso de técnicas de análisis más rápidas en comparación a los análisis tradicionales, por otra parte, puede aportar en menos tiempo datos que ayuden a confirmar si la gestión del suelo es la correcta según las características del mismo o si por otra parte se está sobreexplotando, lo que provoca defecto de nutrientes y alteración de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En los últimos años, las técnicas espectroscópicas se han postulado como candidatas a solucionar esta falta de información temprana y eficaz, estando su capacidad para la evaluación de parámetros edafológicos en valor actualmente. Entre otros, se han utilizado para el análisis de suelos: caracterizar la mineralogía del suelo mediante el uso de FTIR (Sánchez, 2019) o en la predicción de la fertilidad del suelo utilizando fluorescencia de rayos X (XRF) (Dasgupta et. al, 2024) Cada una de estas técnicas cuenta con ventajas y desventajas que serán determinantes a la hora de utilizarse en cada caso.

Entre estas, puede destacarse el análisis mediante Espectroscopía Infrarroja (IR), trabajándose en todas sus regiones. El infrarrojo comprende una zona del espectro electromagnético entre 20 y 4000 cm^{-1} y en él se pueden distinguir tres regiones: Infrarrojo cercano o NIR, infrarrojo medio o MIR e infrarrojo lejano o FIR. En cada una de estas regiones existen bandas características de compuestos que pueden ser de interés a la hora de caracterizar un suelo, como lo son: la presencia de carbonatos, sales solubles, contenido de limos y arcillas o la existencia de agua (García y Rodríguez, 2016).

Concretamente, en este caso se utiliza la técnica de Espectroscopía infrarroja de reflectancia total atenuada (o ATR-IR), cuya capacidad para la evaluación de parámetros edafológicos se ha considerado en los últimos años. Esta técnica consiste en medir la radiación infrarroja que atraviesa una fina capa de muestra y se ve reflejada en un cristal, normalmente de diamante, llegando finalmente a un detector. Si existen diferencias en las propiedades de la radiación incidente y la radiación recogida, dichas diferencias pueden relacionarse con el suelo,

fundamentalmente con las propiedades del mismo. Existen casos en los que los espectros presentan bandas muy complejas que en ocasiones se solapan y provocan poca especificidad. Para solventar esta problemática, se recurren a herramientas matemáticas para extraer los patrones de absorción de interés y poder relacionarlas con las propiedades del suelo.

La utilidad de las técnicas espectroscópicas ha sido puesta en valor en los últimos años en varios campos. Por ejemplo, a la hora de distinguir las raíces de diferentes especies de plantas por su espectro de infrarrojo medio, para el cual se utiliza el accesorio que permite al equipo obtener los espectros ATR, (Rewald y Meinen, 2013). En cuanto a suelos se refiere, se han estimado en el pasado las concentraciones de elementos mayoritarios y trazas mediante el uso de espectroscopía infrarroja media (MIR), siendo, por ejemplo, útil a la hora de detectar cualitativamente la presencia de arcillas y minerales en los suelos (Sánchez et. al, 2019) .La adición del ATR añade ventajas muy importantes a la metodología, como es: la casi nula preparación de muestra, solo siendo necesario una molienda exhaustiva de la muestra, la poca cantidad de muestra requerida para el proceso y la posibilidad de recuperar la muestra en aquellos casos en los que hay una pequeña cantidad de muestra disponible para los análisis. Además, se pueden analizar muestras de suelo completas, tanto inorgánicas como orgánicas sin un cambio en la metodología.

1.4. Tipología del suelo senegalés y de la zona objeto de estudio.

Senegal cuenta con variedad en cuanto a la tipología de sus suelos se refiere, representadas en la Figura 1.2

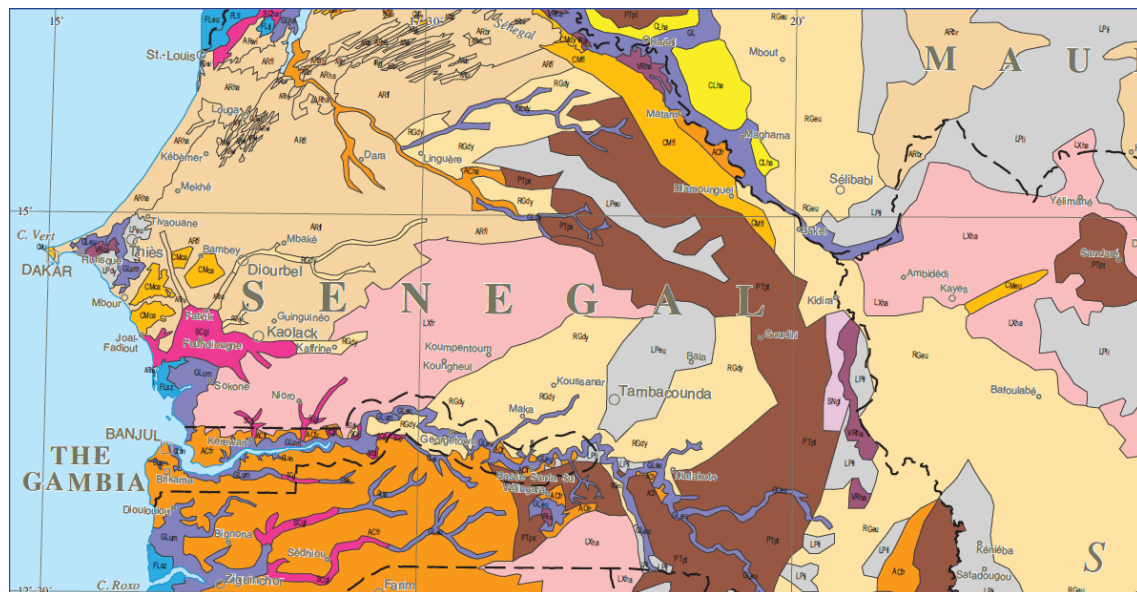


Figura 1.2: Atlas edafológico de Senegal. Extraído de Atlas Soil Of Africa; pág. 103

Como se puede apreciar, coexisten diversos tipos de suelos en el territorio, siendo algunos de ellos más idóneos para prácticas agrícolas en comparación con otros. (Soil Atlas Of Africa; páginas 50-61; 64-66).

En la zona norte y algunas zonas del centro se encuentran los arenosoles (representados de color marrón claro). Se tratan del tipo de suelo más abundante en África y se caracterizan por ser un suelo de textura arenosa con gran facilidad para ser erosionado. Cuenta con bajas capacidades para retener tanto agua como nutrientes necesarios para el crecimiento de la vegetación, hecho que facilita mucho más la erosión eólica que pueda sufrir o la acumulación de materia orgánica. La deposición de material rico en cuarzo y su posterior meteorización, es decir, el cambio debido a la acción de agentes externos, es uno de los factores principales que contribuye a su desarrollo.

En áreas colindantes a los ríos de la parte norte, se pueden distinguir, por otra parte, gleisoles y acrisoles (colores azul y naranja respectivamente). Ambos cuentan con características diferenciadoras: Los gleisoles están constituidos, de forma general, por terreno de baja latitud inundado por aguas subterráneas durante largos periodos de tiempo. En estos se aprecia algo de vegetación, juncos y algunos tipos de hierba principalmente). Tienen una gran acumulación de materia orgánica. En el otro lado se encuentran los acrisoles, diferenciables por presentar un carácter fuertemente ácido y un subsuelo rico en arcillas y baja capacidad de retención de nutrientes. Corresponden a zonas húmedas de los

trópicos y subtropicales y, a pesar de su carácter ácido, puede desarrollarse en ellos vegetación y actividad agrícola, siendo necesario para ello el aporte de fertilizantes al no retener eficazmente los nutrientes.

En la parte central se encuentra otro tipo de suelo: los *lixisoles* (representados en color rosa claro). Están caracterizados por tener un ligero carácter ácido y por la presencia de arcillas en el subsuelo, mayormente caolinitas, además de una baja capacidad para la retención de nutrientes. La estructura de este tipo de suelos no está completamente desarrollada, lo que dificulta la retención de materia orgánica y el flujo de agua a través de éste.

En el este del país se encuentran dos tipologías más: *plintosoles* y *leptosoles* (colores marrón y gris, respectivamente). El primero es un suelo caracterizado por grandes cantidades de hierro que, si se exponen al aire o a la luz solar, experimenta un endurecimiento irreversible, formando una capa que protege al terreno inferior, siendo las capas más interiores de mucha menos dureza. El segundo, por su parte, se trata de un suelo de poca profundidad asentado sobre rocas, material tipo grava o depósitos con gran contenido en calcio. Su estructura a nivel edafológico es débil y se suele encontrar en regiones montañosas y desérticas.

Por último, cabe destacar el *solonchak*, presente en algunas zonas del sur y el oeste. Cuentan con un alto contenido de sales solubles y se localizan en áreas áridas o que presenten aguas subterráneas cerca de la superficie. Dicha acumulación de sales, dependiendo de su concentración, extensión y cercanía a la superficie, pueden afectar al crecimiento de plantas y, por extensión, cultivos. (Soil Atlas for Africa, pág, 50).

En cuanto a la zona objeto de estudio, ésta se encuentra ubicada en una zona climática y geográfica conocida como *Sahel*, que es utilizada como separación para distinguir el desierto del Sáhara y zonas de sabana poco áridas. En el *Sahel* es muy común la presencia de vegetación como delimitación del desierto, en que apenas existe. Esta zona cuenta, generalmente, con una temporada de precipitación acompañada de vientos del sur y otra temporada seca. La vegetación de la zona, sobre todo en las cercanías del río Senegal, son manglares que tienen las conocidas como características tidálicas, es decir,

están cubiertos por el agua de la marea de forma habitual pero no están cubiertos cuando hay marea baja. Concretamente, las áreas del *Sahel* que se han estudiado son las regiones de Saint-Louis y Matam, zonas situadas en la parte norte del país y a una altura media de 8 metros sobre el nivel del mar.

Esta zona cuenta con un clima predominantemente subtropical desértico, lo que implica temperaturas altas y precipitaciones poco abundantes. Concretamente, la temperatura máxima anual es de 35,3 °C y las precipitaciones rondan los 30 mm a lo largo del año.

2. OBJETIVOS.

En países como Senegal, en los que, como se ha visto anteriormente, una parte significativa de la población depende directamente de las actividades agrícolas, la capacidad de los suelos para garantizar una producción agrícola eficiente y sostenible es un aspecto que puede contribuir significativamente a la reducción de la pobreza y el mantenimiento de la estabilidad socioeconómica. Por lo tanto, un diagnóstico de la calidad y fertilidad de los suelos es esencial para el diseño posterior de estrategias adecuadas de fertilización y optimización de la producción. El objetivo general de este trabajo es la caracterización de parámetros químicos de calidad del suelo de la zona norte de Senegal. Este se concreta en los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar químicamente diferentes tipos de suelos de cultivo provenientes de fincas agrícolas la zona de Ndoum sometidas a diferentes prácticas de cultivo y abonado, así como obtener de estos parámetros de interés agronómico.
- Caracterizar espectroscópicamente dichos suelos de cultivo utilizando técnicas espectroscópicas centradas en la región infrarroja.
- Valorar la fertilidad de suelos de cultivo en base a parámetros químicos establecidos.
- Caracterizar enmiendas orgánicas proporcionadas por ONGs locales de forma similar a los suelos de cultivo.
- Determinar si dichas enmiendas cumplen con los requisitos necesarios para que sean consideradas como tal y tengan un efecto beneficioso en el suelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Recogida y características de las muestras.

Como se ha comentado anteriormente, este trabajo está enmarcado dentro de un proyecto de colaboración de la Universidad de Jaén con organizaciones no gubernamentales, además de con agricultores locales. Los investigadores fueron los encargados de la toma de muestra de los suelos. En cada zona visitada se tomaron muestras de varias porciones del terreno y, tras su homogeneización, se tomaron sub-muestras para su análisis en dos tubos Falcon de 15 mL diferentes, de tal forma que cada uno de estos tubos se tomará como una muestra individual aun perteneciendo a la misma zona. Para ello, a cada localización se le asignó una codificación que, para mayor simplificación, se ha mantenido a lo largo de todo el proyecto. Dicho código está compuesto por la letra S, un número que indica el área en el que se tomó la muestra y una letra (a ó b) para distinguir entre las dos sub-muestras.

Las condiciones de cada suelo en cuanto a abonado, producción o posibles plagas se reflejan en la tabla 5. Se han separado suelos agrícolas de otro tipo de muestras, compuestas por abonos, *bokashi* y compost, que se estudiarán de forma paralela.

Tabla 3.1 Datos de campo de las muestras de suelo de la zona de muestreo Podor-Ndioum (Región de Saint-Louis y Matam, Senegal). Elaboración perteneciente al grupo de investigación FQM 363.

Referencia de muestra	Tipo de muestra	Localización	Cultivo/ descripción	Abonado (frecuencia/al año)
S1a y S1b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Lérabé	Arrozal	DAP (2), Urea
S2a y S2b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Lérabé	Cebollas	DAP, estiércol de cabra, residuos cosecha
S3a y S3b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Lérabé	Hortalizas	DAP, Urea, estiércol de cabra, residuos cosecha
S4a y S4b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Guedé Village	Pimientos picantes, cebollas	Bokashi (2)
S5a y S5b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Guedé Village	20% hierba, barbecho	Estiércol fresco
S6a y S6b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Guedé Village	----	----

Tabla 3.1 (Continuación)

Referencia de muestra	Tipo de muestra	Localización	Cultivo/ descripción	Abonado (frecuencia/al año)
S7a y S7b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Diamá Alwaly	Arrozal (20%), seco e inservible	Ninguno
S8a y S8b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Diamá Alwaly	Sin cultivar, destinado a seed-bed	----
S9a y S9b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Diamá Alwaly	Arrozal, riego a manta, cultivado 7 años	DAP (1), Urea (2)

S10_a y S10_b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/Arenosol	Petel Dieguess	Hortalizas	Estiércol de cabra/compost
S11_a y S11_b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Petel Dieguess	Sin cultivar	----
S12_a y S12_b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Petel Dieguess	Sin cultivar	----
S13_a y S13_b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Agnam	Hortalizas	Estiércol fresco
S14_a y S14_b	Suelo /no pedregoso/no rocoso/	Lérabé	Cebollas	Estiércol fresco (3), DAP, Urea, residuos de cosecha

Como se puede apreciar, en su conjunto, se trata de muestras no pedregosas o rocosas y provienen fundamentalmente de 4 zonas: Lérabé, Guedé Village, Diama Alwaly y Petel Dieguess. Con respecto a los suelos, estos son variados en cuanto a su uso, teniendo algunos destinados a arroz, pimientos o cebollas, y otros no cultivados o en periodo de barbecho durante la visita. Las descripciones de los suelos y las enmiendas orgánicas han sido aportadas por los investigadores de la Universidad de Jaén, así como la información acerca del abonado.

1.)



2.)



3.)

4.)



Figura 3.1: Imágenes que representan las zonas en las que se obtuvieron las muestras. Provenientes del proyecto de cooperación de la Universidad de Jaén, (grupo de investigación FQM363), con ONGs y agricultores locales. Cada número indica una zona: 1:Lérabé; 2:Guedé Village; 3: Diama Alwaly; 4: Petel Dieguess.

Con respecto a las enmiendas orgánicas, su descripción se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Datos de campo de las enmiendas orgánicas de la zona de muestreo Podor-Ndioum (Región de Saint-Louis y Matam, Senegal). Elaboración perteneciente al grupo de investigación FQM 363.

Referencia de muestra	Tipo de muestra	Localización	Cultivo/ descripción	Abonado (frecuencia/al año)
A1	Estiércol de cabra	Lérabé	Mezclado con bastante tierra. Moho blanco.	----
A2	Bokashi	Guedé Village	Mal elaborado, Resecado al sol	----
C1	Compost	Composición y elaboración desconocida. Aportados por ENDA PRONAT		
C2	Compost	Composición y elaboración desconocidas. Aportados por ENDA PRONAT		

3.2. Procedimiento analítico.

Las muestras, almacenadas en tubos Falcon, fueron guardadas en un lugar seco hasta la realización de los análisis. Solo fue necesario moler la muestra

finamente como pretratamiento antes de llevar a cabo algunos análisis. Para ello, se utilizó un mortero de agata.

3.2.1. pH.

Para medir pH se toman 2 g de muestra y se colocan en un vaso de precipitado junto con 5 mL de agua destilada, tomados con una micropipeta. La suspensión se agita a intervalos durante 1 hora. Una vez pasada esta hora, se coloca la mezcla en un tubo tipo Falcon de 15 mL y se mide en un pH-metro marca *Crison* modelo *Basic-20*. Previamente se calibra el instrumento con los patrones de pH disponibles (pH 4; pH 7 y pH 9) y tras cada medida se lava el electrodo de pH con agua destilada.

3.2.2. Conductividad.

La conductividad se midió en un conductímetro marca *Hanna* modelo HI6321-02 en una proporción agua destilada: suelo 5:1. El procedimiento es el mismo que el descrito para pH, con la diferencia de que tras terminar de agitar la muestra ésta se filtra con ayuda de una jeringa y filtros de 0,45 µm. En este caso se utilizó el preparado para la medida del pH y se diluyó con agua hasta cumplir con la proporción que establece el protocolo (5:1), filtrándose posteriormente. El filtrado se mide en el conductímetro, previa calibración de éste con un patrón de 1413 µS/cm. Después de cada medida se limpia el conductímetro con agua destilada para evitar contaminaciones entre muestras.

3.2.3. Capacidad de intercambio catiónico.

Para el análisis de la capacidad de intercambio de cationes, se pesan en primer lugar 2 gramos de muestra, (1 gramo si se trata de las enmiendas orgánicas), en tubos falcon de 50 mL. A éstos se les añade 40 mL de una disolución de cloruro de hexaamincobalto (III) ($[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$), preparada, según el protocolo, pesando exactamente 4,458 g del complejo en un pesasustancias y llevándose a un matraz de 750 mL, enrasando con agua destilada y homogeneizando con ayuda de un agitador magnético). Los tubos falcon se llevan a un agitador con las siguientes condiciones: 90 rpm y 1 hora de agitación, teniendo la precaución de que no les incida directamente radiación, puesto que el complejo es fotosensible, y que los tubos estén dispuestos de forma ordenada. Tras la hora de agitación, los tubos se dejan reposar verticalmente durante 10 minutos y se filtra su

contenido a otro tubo falcon de 50 mL con ayuda de una jeringa y filtros de 0,22 μm . El filtrado, posteriormente, se lleva a un espectrofotómetro UV-Vis para obtener su espectro. En este caso se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis marca Cary modelo Varian 50. Posteriormente se lleva a un ICP-MS del CICT marca Agilent modelo 7900 (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente) para analizar las bases de cambio (fundamentalmente Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Previamente al envío, se diluyeron las muestras, con el objetivo de que estas entraran dentro de los calibrados del equipo. La dilución que se efectuó es 0,2 mL $\rightarrow$ 10 mL,

3.2.4. *Análisis elemental CNH (Carbono, Nitrógeno e Hidrógeno).*

Para el análisis elemental orgánico, es necesario pretratar las muestras. Concretamente, se toman entre 5 y 6 cucharadas con una micro-cuchara y se colocan en un mortero de ágata, en el cual se muele hasta que la muestra sea un polvo fino. Tras esto, se pasa a un tubo tipo eppendorf, se rotulan y se envían a un analizador elemental orgánico marca Leco modelo TruSpec Micro, correspondiente al centro de Instrumentación Científico Técnica de la Universidad de Jaén.

3.2.5. *Espectro infrarrojo.*

Por otra parte, se realizaron espectros MIR (4000-400 cm^{-1}) de las muestras objeto de estudio con el fin de obtener más información que ayude a la caracterización de los suelos. Para ello, previo al análisis fue necesaria la molienda individual de cada una de las muestras, utilizando para ello un mortero de ágata y una cuchara pequeña y alargada. El resultado se trasladó a un tubo Eppendorf de plástico. Como se ha comentado anteriormente, dichos espectros se han recogido con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR-IR) marca Bruker, modelo Vertex 70 y bajo las siguientes condiciones: una resolución de 4 cm^{-1} y 64 scans para los espectros tomados en la región media del infrarrojo (MIR). Previa a realización de los espectros, independientemente de la región y dado que el instrumento es muy sensible, se limpia la zona de colocación de muestra, y se hace un primer espectro de comprobación, asegurándose que la señal obtenida, con las fluctuaciones propias del instrumento, se encuentra entorno a cero. Una vez se confirma la total limpieza del equipo, se tapa durante

un periodo suficiente para asegurar la eliminación prácticamente completa de todos los gases que puedan interferir en la medida: fundamentalmente vapor de agua y dióxido de carbono, utilizando nitrógeno para tal fin. Tras esto, se envía al software un background, que es, en esencia, una corrección de la señal provocada por aquellos compuestos que permanezcan dentro de la zona de medida y cuya presencia da señal, además de ser necesaria en toda medida de absorción de luz una medida sin muestra. Así, a la hora de colocar la muestra, la señal de dichos compuestos no se tendrá en cuenta, obteniendo un espectro únicamente dependiente de la muestra, que cuenta, además, con una lectura más nítida y clara. Finalmente, se abre la tapa, se coloca la muestra y, una vez cerrado el sistema y esperar unos minutos, se registra el espectro.

3.2.6. *Fluorescencia de rayos X.*

Para la medición de las distintas muestras en un fluorímetro de rayos X es necesario una preparación previa de cápsulas para fluorescencia de rayos X, llámese a partir de ahora XRF (X-ray fluorescence). Se prepara una cápsula por cada muestra, asegurando que la superficie cubierta por la muestra no presenta curvaturas y es completamente recta.

Una vez preparadas todas las cápsulas, se llevan a un fluorímetro de rayos X portátil marca Thermo Scientific Niton modelo XL3t en el que se llevarán a cabo las medidas. Cada muestra se ha medido utilizando dos modos diferentes incorporados en el instrumento: uno aplicado a elementos con mayor tendencia a aparecer en suelos (modo *soils*) y otro aplicado a elementos con más presencia en minerales (modo *mining*). Cada modo es, en esencia, una calibración interna del equipo que cuantificará de formas diferentes los elementos que mida dependiendo del modo elegido.

Cuando se ha configurado el equipo, eligiendo la calibración correspondiente, se debe hacer, previo a todas las medidas, un *system check* para verificar que todo en el equipo se encuentra en perfectas condiciones. Tras esto, se coloca la cápsula con la muestra correspondiente en la zona de medida, mostrada en la figura 4 (interior del fluorímetro). Una vez hecha la medida, se rota la cápsula para hacer una réplica que incida en otra zona de la cápsula. Y se vuelve a medir.

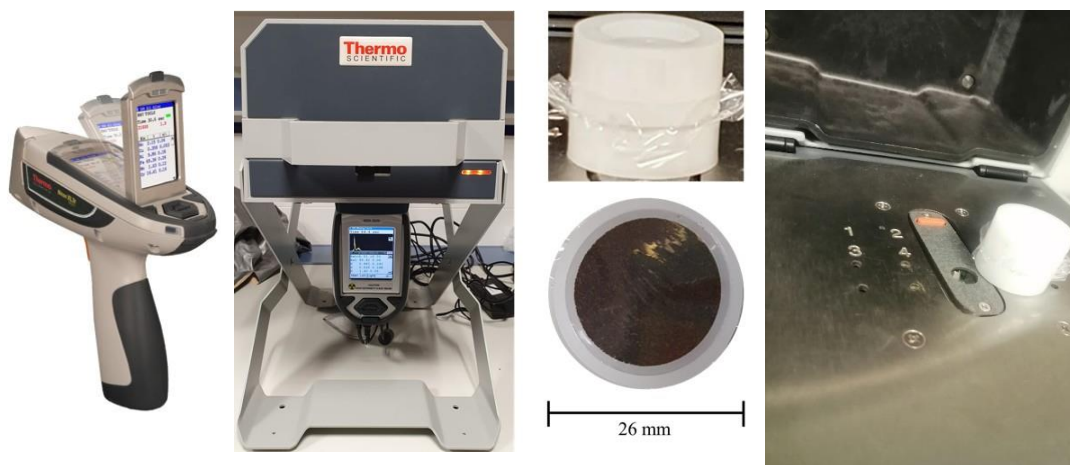


Figura 3.2: Zona de medida de analizador de fluorescencia de rayos X, colocado en un soporte de seguridad de plomo. Al lado, una cápsula lista para su medida. De izquierda a derecha: Imagen del analizador de XRF, el soporte en el que se coloca el analizador, así como la imagen y características de las cápsulas medidas y, por último, una imagen del analizador colocado en el soporte junto a una cápsula.

Cada uno de los modos cuenta con una serie de filtros, que están optimizados para recoger la mayor cantidad de señal en un rango de energías concreto, tal que:

- El filtro *low range* está preparado para medir elementos ligeros.
- El filtro *mid range* está preparado para medir elementos de peso mediano.
- El filtro *high range* está optimizado para la medida de elementos pesados.

Cada filtro mide durante un total de 30 segundos, comenzando por el de más baja energía. Tras el tiempo de medida, el equipo cambia de filtro y se repite el proceso de forma consecutiva.

En el modo *mining* existe otro filtro (*very light*) utilizado para los elementos muy ligeros; sin embargo, este modo no es especialmente preciso, ya que los elementos muy ligeros cuentan con pocas capas electrónicas y la energía de las propias transiciones internas puede ser absorbida por los gases del ambiente.

Con respecto a los modos de medida:

El primero (*soils*) presenta una calibración para elementos que, mayormente, pueden encontrarse en suelos, como es el Ca, K, P, etc; mientras tanto, en el otro modo de medida, (otra calibración diferente) se pueden medir elementos más usuales en los minerales pero que a nivel de fertilidad no son tan relevantes, como el Si o el Al. En el modo de medida *soils* los elementos típicos presentes

en suelos son semicuantificados por tres filtros diferentes (*low range*, *mid range* and *high range*).

Por otro lado, el modo de medida *mining* cuenta con los tres filtros anteriormente descritos y, además, otro filtro adicional, conocido como *very light range*, del que ya se ha hablado anteriormente.

Cuando se hacen todas las medidas en un modo y se desea cambiar al otro, debe realizarse otro *system check* previo a las medidas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Análisis del pH y conductividad eléctrica en suelos de cultivo y enmiendas orgánicas.

4.1.1. Adaptación de la metodología oficial.

Con respecto a los resultados obtenidos, deben tenerse en cuenta algunos factores que pueden influir en los datos finales que se han recogido. En primer lugar, la metodología estándar para el análisis de pH en suelos establece que deben tomarse 10 gramos de suelo y añadir agua en una proporción 1:2,5, siendo en este caso 25 mL de agua (Bazán, 1996). Como se ha comentado anteriormente, la toma de muestras se realizó en el marco de un proyecto de cooperación, en el que investigadores de la UJA visitaron las distintas fincas agrícolas. Debido a limitaciones en la cantidad de muestra que se podía transportar, las cantidades recogidas fueron notablemente inferiores a las que se suelen muestrear habitualmente (> 0,5 kg) (Vera et al, 2018). Por este motivo, fue necesario adaptar la metodología de los análisis de pH y conductividad eléctrica para reducir la cantidad de muestra necesaria y comprobar si dicha reducción implica una variación notable en el pH.

Para ello, se propuso reducir la cantidad de muestra en el análisis de pH, pasando de los 10 gramos que indica la metodología inicial a 2 gramos. Aun variando la cantidad de muestra, se mantendrían las proporciones que indica el método (1:2,5) para evitar incluir más variaciones que llevaran a error. Antes de incorporar este cambio, se hizo una comprobación para corroborar que el pH de la muestra no se vería afectado. Esto se debe a que, si bien en materiales

homogéneos no deberían afectar estos cambios, la heterogeneidad del suelo, a pesar de haberlo homogeneizado y teniendo en cuenta que la muestra tampoco es molida para estos análisis, es considerable, de tal forma que si se reduce demasiado la cantidad de muestra, y con ello la porción analítica, la reproducibilidad no está asegurada. Además, la cantidad de muestra de la que se dispone es limitada. Aproximadamente, entre unos 15 y 20 gramos por muestra.

Para este ensayo, se eligió un suelo que, anteriormente, había sido analizado por un laboratorio externo. El valor de pH emitido por el laboratorio se tomó como valor de referencia.

De acuerdo con la metodología para análisis de pH mencionada en el apartado 3.2.1, se hicieron 3 réplicas de este suelo de referencia, pesando para cada una de ellas 2 gramos del suelo y añadiendo 5 mL de agua. Tras agitar y calibrar el electrodo de pH, se obtuvieron los resultados reflejados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores de pH obtenidos para 3 réplicas de un suelo de pH conocido.

Número de réplica	Valor de pH	Coefficiente de variación (%)
1	6,73	0,61
2	6,65	
3	6,70	
Valor de referencia	6,73	-----

Teniendo en cuenta que el valor de pH emitido por el laboratorio externo fue de 6,73, se puede concluir que la reducción de la cantidad de muestra de 10 gramos a 2 gramos, manteniendo el resto de condiciones iguales, no supone una variación significativa del valor de pH de la muestra, presentando un coeficiente de variación del 0,61%. Por tanto, en los análisis llevados a cabo se utilizaron 2 gramos de muestra para cada ensayo.

Por otra parte, en pro de no agotar toda la muestra recogida en los distintos puntos muestreados se planteó unir los procedimientos de medida de pH y conductividad eléctrica, ya que ambos comparten una metodología de trabajo similar y, con algunas ligeras modificaciones, podría medirse en valor de conductividad de la muestra tras efectuar las medidas de pH, ya que este análisis

no es destructivo. De esta forma, se planteó tomar las muestras a las que se les midió el pH, filtrarlas con ayuda de un filtro de 0,45µm, y al líquido filtrado añadirle el mismo volumen que se haya filtrado para alcanzar una proporción 1:2, ya que la metodología para medida de la conductividad exige que la dilución efectuada sea de 1:5 antes de la medida. En este nuevo caso, con la metodología adaptada, después del filtrado se debería añadir un volumen de 5 mL.

4.1.2. Resultados.

Con los cambios anteriores implementados, se llevó a cabo el análisis de pH de las muestras, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Resultados acerca del análisis de pH y conductividad (adaptación de la metodología con 2 gramos de muestra)

Procedencia	Identificador de la muestra	pH	Clasificación con respecto al pH	Conductividad (µS/cm)
Lérabé	S1A	5,7	Medianamente ácido	935,4
	S1B	6,6	Ligeramente ácido	940,3
	S2A	6,5	Ligeramente ácido	481
	SAB	6,5	Ligeramente ácido	471,1
	S3A	6,7	Neutro	564,3
	S3B	6,3	Ligeramente ácido	567,5
	S14A	6,5	Ligeramente ácido	248,7
	S14B	6,4	Ligeramente ácido	253,8
Guedé Village	S4A	8,2	Básico	131,6
	S4B	8,2	Básico	185,8
	S5A	8,2	Básico	190,2
	S5B	8,1	Básico	168,7
	S6A	8	Básico	1444
	S6B	8,0	Básico	1785
Diana Alwaly	S7A	6,8	Neutro	206,6
	S7B	6,8	Neutro	215,3
	S8A	6,3	Ligeramente ácido	85,7
	S8B	6,2	Ligeramente ácido	70,2
	S9A	5,8	Medianamente ácido	139,6
	S9B	5,7	Medianamente ácido	103,2
Petel Dieguess	S10A	5,7	Medianamente ácido	77,8
	S10B	9,1	Alcalino	73,6
	S11A	7,9	Básico	647,5
	S11B	7,8	Medianamente básico	625,3

Agnam	S12A	7,8	Medianamente básico	143,4
	S12B	9,0	Ligeramente alcalino	135,8
	S13A	8,3	Básico	64,8
	S13B	8,4	Básico	78,5

Se puede apreciar en estos resultados que el pH de estos suelos indica una cierta tendencia, en general, a suelos clasificables entre ligeramente ácidos y ligeramente alcalinos. En el caso de los suelos ligeramente ácidos-ligeramente básicos, la disponibilidad de los nutrientes es adecuada y suficiente para el crecimiento de cultivos. En el resto de clasificaciones se pueden encontrar problemas a la hora de la disponibilidad de ciertos elementos o en cuanto a su absorción.

Si se analizan los suelos atendiendo a su clasificación por zonas, encontramos que los procedentes de Lérabe y Guedé Village presentan valores de pH cercanos con respecto a los suelos de la misma zona. Los suelos de Diama Alwaly presentan, entre extremos, una variación de una unidad de pH. Por último, en los suelos de la zona e Petel Dieguess, se puede notar una diferencia muy alta de pH entre algunas de las muestras, yendo desde 5,73 en la muestra S10A a 9,02 en la muestra S12B. Este hecho se puede explicar debido a que, según los investigadores que acudieron a tomar las muestras de esa zona, el terreno era muy heterogéneo, por lo que incluso homogeneizando las muestras, se pueden encontrar valores tan dispares de pH, demostrando, como se había comentado con anterioridad, que una reducción de la cantidad de muestra en aquellas que no sean homogéneas pueden provocar falta de precisión en los resultados.

Por otra parte, existen diferencias de pH entre aquellos terrenos destinados al cultivo y no cultivados o en periodo de barbecho, como se puede apreciar, por ejemplo, entre las muestras S8 (sin cultivar) y S9 (cultivado durante 9 años). El pH de los suelos cultivados es ligeramente superior con respecto a los no cultivados. En otros casos, como la serie de muestras S10 (cultivadas) y S11 (no cultivadas), se puede apreciar este detalle.

Como se puede apreciar, además, ninguno de los suelos puede ser considerado salino según la clasificación que se tomó como referencia (vista en el apartado

1.2.1) no llegando en ninguno de los casos a 0,2 dS/m. Valores tan pequeños de conductividad indican una baja presencia de cationes en el suelo capaces de conducir la electricidad, siendo este factor, como se comentó anteriormente, vital para el desarrollo de los cultivos y el mantenimiento de los suelos en el largo plazo. Si se observan los resultados zona por zona, las muestras S7A y S7B presentan un valor de conductividad alto con respecto al resto de muestras. Teniendo en cuenta que estos suelos no fueron abonados de ninguna forma, debe tratarse de una característica propia del suelo.

Con respecto a las enmiendas orgánicas, resulta de interés analizar sus valores de pH y la semejanza que puedan tener entre sí. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 4.3: Resultados de pH y conductividad de las enmiendas orgánicas.

Procedencia	Identificador de la muestra	pH	Clasificación con respecto al pH	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Lerabé	A1	8,2	Básico	8970
Guedé Village	A2	8,55	Ligeramente alcalino	9004
Desconocida	C1	7,86	Básico	2071
Desconocida	C2	7,94	Básico	1823

Las enmiendas, por su parte, no presentan diferencias sustanciales de pH entre sí. Las muestras C1 y C2, correspondientes a dos compost de composición desconocida aportados por ENDA PRONAT, involucrada en el proyecto, muestran un valor de pH bastante similar, mientras que, en conjunto, todas presentan un pH con carácter básico-ligeramente alcalino. Para poner en perspectiva los resultados, el valor de pH del estiércol de cabra se encuentra alrededor de 8,32, valor aceptable teniendo en cuenta el 8,2 obtenido (Colín-Navarro et al. 2019).

Con respecto a estas enmiendas, resaltan enormemente sus valores de conductividad, que aun estando por debajo de 1 dS/m, son muy superiores a las obtenidas en las muestras de suelo. Este hecho es normal. Existen una gran cantidad de elementos que pueden estar presentes en las enmiendas

orgánicas y que existen en forma de sales solubles (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , nitratos, etc) (Gondek et. al, 2020).

4.2. Caracterización espectroscópica.

La caracterización espectroscópica de las muestras ha demostrado, como se verá a continuación, la similitud de los espectros presentados entre los diferentes suelos y la ausencia de bandas claramente asignables a materia orgánica entre $2950\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ o carbonilos sobre 1700 cm^{-1} . En cuanto a la mineralogía, se han podido detectar bandas asignables a la caolinita y a otros minerales que, si bien sus bandas no son perfectamente definidas, se encuentran en zonas del espectro con señal intensa. Algunos de estos minerales son la saponita (bandas de OH en $1300\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, así como la hectorita y la crisolita, con presencia de bandas en el mismo rango.

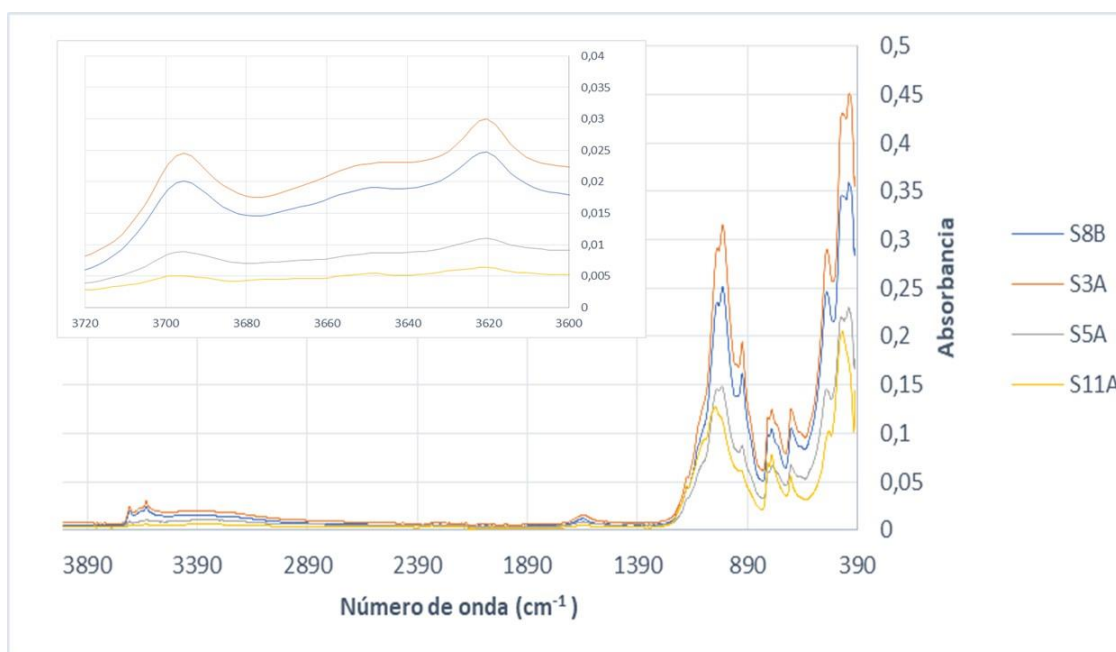


Figura 4.1: Espectro de infrarrojo medio (MIR) completo para muestras procedentes de las cuatro zonas principales: Lérabé, Guedé Village, Diama Alwaly y Petel Dieguess. Se ha medido en el rango $4000\text{ cm}^{-1}\text{-}400\text{ cm}^{-1}$. En la esquina superior izquierda se ha representado este espectro en el rango $3720\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$.

En primer lugar, se observará la zona de $3720\text{ cm}^{-1}\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, ya que en esta zona se encuentran las primeras bandas de interés.

En este rango se pueden observar dos bandas en, aproximadamente, 3695 cm^{-1} y 3622 cm^{-1} . Comparando los espectros obtenidos con los que aparecen en bibliografía, se puede concluir que estas bandas corresponden a la caolinita, la cual presenta dos bandas en 3695 y 3620 cm^{-1} (Madejová, 2002). La caolinita es un mineral cuya composición química corresponde a la de un aluminosilicato hidratado de fórmula $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ incluido en el género de las arcillas. La caolinita posee una estructura laminar 1:1, es decir, la forman una misma lámina hexagonal de tetraedros de sílice (SiO_4^{4-}) y una lámina de gibsita, de fórmula Al_2O_3 , tal como se representa en la Figura X. En esta estructura las interacciones entre los grupos OH de una capa con otros elementos y grupos originan las bandas a 3695 y 3620 cm^{-1} .

La banda en 3695 cm^{-1} corresponde a una vibración de *stretching* simétrica y en la misma fase. Por otra parte, la banda en 3620 cm^{-1} se explica con la interacción de átomos de aluminio en posiciones octaédricas y grupos hidroxilo (OH) internos ubicados entre capas de huecos tetraédricos y octaédricos interaccionan con estos átomos de Al, provocando la absorción en 3620 cm^{-1} . Los otros tres grupos OH restantes se encuentran en la superficie de capas octaédricas y forman enlaces de hidrógeno débiles con el oxígeno de los enlaces Si-O-Si de la siguiente capa.

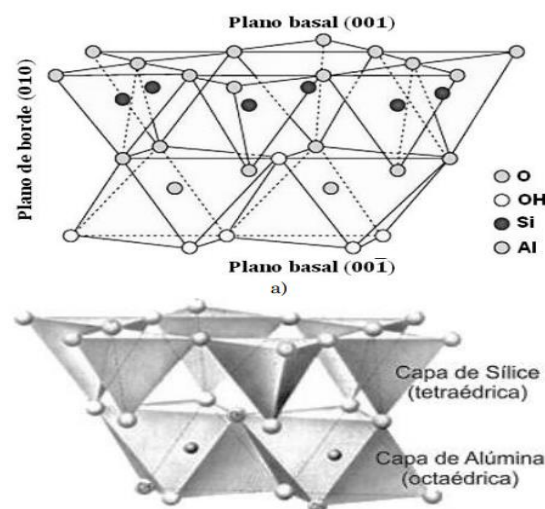


Figura 4.2: Estructura de la caolinita, mostrándose los distintos huecos para el silicio y para el aluminio. (Usuga-Manco, 2015).

Como se puede apreciar en la figura 4.1, se ha pasado directamente a la zona del espectro entre 1200 y 400 cm^{-1} , rango en el que se encuentra el siguiente grupo de bandas. Estas, según bibliografía, se pueden atribuir a movimientos de *stretching* y *bending* tanto de enlaces Si-O como de absorciones de los grupos OH (Madejová, 2002)

Concretamente, el *stretching* de los enlaces Si-O, en el caso de la caolinita se encuentran varias bandas diferenciadas entre 1120 y 1000 cm^{-1} , presentes en la imagen. Además, se puede asignar otra banda sobre 914 cm^{-1} debido a modos de vibración tipo *bending* del grupo Al_2OH que provienen de las vibraciones de grupos OH de capas interiores y sobre las láminas, correspondientes a frecuencias de 914 y 936 cm^{-1} respectivamente. En este caso no se aprecia la banda a 936 cm^{-1} . Además, puede existir cierta contribución de una pequeña cantidad de materia orgánica, ya que las bandas de los grupos carbonilos de los polisacáridos se encuentran entre 900-1200 cm^{-1} (Bleha, 2022).

Con respecto al resto de bandas, su análisis es algo más complejo, pues en la muestra se encuentra una mezcla de otros aluminosilicatos, cuarzo, etc; constituyendo ciertas bandas que pueden solapar parcial o totalmente bandas características, por ejemplo, de la caolinita.

Por otra parte, es interesante analizar el espectro de infrarrojo medio de las enmiendas orgánicas recogidas, puesto que de esta forma se puede obtener una primera confirmación de la presencia o no de materia orgánica, así como es interesante su comparación con el espectro de una muestra de suelo de cara a futuras conclusiones. En este caso, se tomará el espectro MIR de todas las enmiendas orgánicas, mostrado en la figura 4.3.

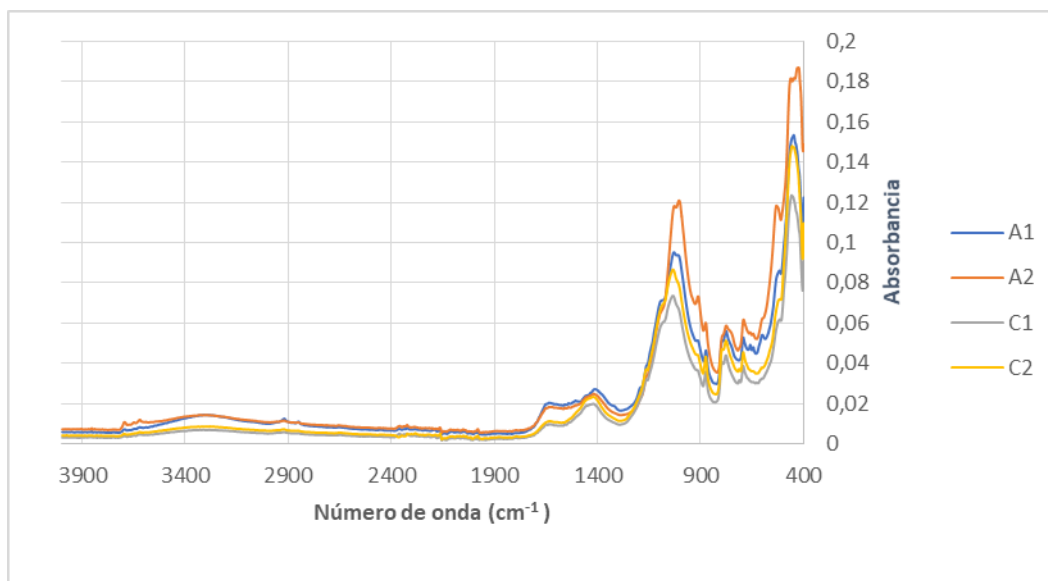


Figura 4.3: Espectros MIR correspondiente a las enmiendas orgánicas tomados en el rango de 3900 a 400 cm^{-1} .

Si se compararan los espectros provenientes de las muestras de suelo y las enmiendas orgánicas, se pueden observar varios aspectos: En primer lugar, se aprecian dos bandas sobre 2920 y 2850 cm^{-1} . Dichas bandas no aparecen en el espectro de infrarrojo de las muestras de suelo, por lo que debe tratarse de algún grupo no comentado anteriormente. Al tratarse la muestra A1 de una enmienda orgánica, puede pensarse que estas nuevas bandas corresponden a distintas vibraciones de enlaces C-H, típicos de compuestos orgánicos. De esta forma, en se puede asignar una banda a 2925 cm^{-1} a enlaces C-H, por lo que se puede considerar que la banda obtenida a 2925 cm^{-1} corresponde a un modo de vibración de enlaces C-H tipo *stretching* (Vasquez-Mora; 2015) Este hecho aporta una conclusión relevante: las muestras de suelos recogidas no cuentan con materia orgánica, o al menos la cantidad de dicha materia es inferior a la necesaria para que esta se reflejara en un espectro de infrarrojo. Por otra parte, las enmiendas orgánicas sí poseen materia orgánica; sin embargo, la baja señal de los picos asociados a dichos compuestos indica que la cantidad de materia orgánica es baja.

Al igual que se ha comentado, en la zona de 900-1200 cm^{-1} algunos grupos carbonilo de polisacáridos pueden dar señal. En esta zona hay una mezcla de varias bandas, así que no se puede descartar la presencia de estos compuestos.

4.3. Análisis del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno.

Una parte fundamental de estos análisis es comprobar la fertilidad de estos suelos de cara a su posible explotación agrícola. Para ello, se comprobó su contenido en C, H y N, tomados como indicadores de la cantidad de materia orgánica en suelos. Las muestras, preparadas tal como se detalla en el apartado 3.2.4, se llevaron al analizador elemental disponible en los servicios técnicos de la Universidad de Jaén. Se diferenciará el análisis de estos elementos en las muestras de suelo y las enmiendas orgánicas, ya que a priori su composición debería ser diferente.

4.3.1. Análisis de contenido CNH en las muestras de suelo y enmiendas orgánicas.

Cada muestra de las muestras se analizó por duplicado, por lo que en este apartado se trabajará con valores medios y las desviaciones estándar de cada pareja de valores.

Con respecto al cálculo del % de materia orgánica, este se ha hecho a partir del %C. Concretamente, el valor del %C se relaciona con una constante de valor 1,728 para obtener el %M.O. Este valor es experimental y procede de estimar que, de media, el 58% del C presente en el suelo se trata de C orgánico, siendo el otro 42% C inorgánico (Bianchi, 2008).

En la tabla 4.4, se puede apreciar que algunos valores de % de N e H están resaltados, siendo estos especialmente altos. El hecho de tener una relación C:N baja y una presencia tan alta de N e H hace pensar que estos elementos están presentes en otra forma. Concretamente, en forma de amonio. Además, los terrenos en los que estos valores son superiores, el abonado está formado por DAP y urea mayormente, hechos que explicarían la presencia de grandes cantidades de amonio.

Tabla 4.4: Contenido CNH en las muestras de suelo.

Identificador de la muestra	Valor medio de %C	Valor medio de %N	Valor medio de %H	Relación C:N media	%M.O medio de cada muestra
S1A	0,06	0,59	0,77	0,10	0,10
S1B	0,06	0,47	0,73	0,12	0,09
S2A	0,07	0,38	0,84	0,18	0,12

Tabla 4.4 (Continuación)

<i>Identificador de la muestra</i>	Valor medio de %C	Valor medio de %N	Valor medio de %H	Relación C:N media	%M.O medio de cada muestra
S2B	0,07	0,39	0,84	0,18	0,12
S3A	0,09	0,88	0,59	0,10	0,16
S3B	0,11	0,84	0,58	0,13	0,19
S4A	0,08	0,72	0,39	0,11	0,14
S4B	0,09	0,71	0,34	0,13	0,16
S5A	0,06	0,41	0,34	0,13	0,09
S5B	0,06	0,48	0,41	0,13	0,10
S6A	0,08	0,70	0,37	0,11	0,13
S6B	0,07	0,54	0,31	0,13	0,12
S7A	0,04	0,24	0,71	0,17	0,07
S7B	0,12	0,32	0,71	0,36	0,20
S8A	0,08	0,27	0,65	0,28	0,13
S8B	0,04	0,23	0,66	0,17	0,07
S9A	0,09	0,68	1,20	0,13	0,16
S9B	0,09	0,72	1,19	0,13	0,16
S10A	0,06	0,46	0,27	0,12	0,09
S10B	0,05	0,43	0,27	0,12	0,09
S11A	0,10	0,94	0,28	0,11	0,17
S11B	0,03	0,20	0,18	0,15	0,05
S12A	0,05	0,26	0,16	0,20	0,09
S12B	0,12	1,04	0,27	0,11	0,20
S13A	0,06	0,41	0,16	0,15	0,10
S13B	0,05	0,38	0,14	0,13	0,09
S14A	0,05	0,39	0,62	0,13	0,09
S14B	0,04	0,30	0,57	0,14	0,07
S15A	0,05	1,31	0,18	0,03	0,08
S15B	0,05	1,37	0,18	0,04	0,09

Los resultados obtenidos muestran un contenido muy bajo en materia orgánica, no superior en ninguno de los casos al 1% en el total del suelo. Además, los contenidos en H y en N acompañan al C, presentando, de forma similar, porcentajes bajos.

Otros parámetros como la relación C:N, utilizada de forma habitual como un parámetro que indica el estado de un suelo en cuanto a la cantidad de estos elementos se refiere, mantienen valores bajos. Para ponerse en perspectiva, un estudio del año 2013 (Shunfeng et al, 2013) se alcanzaron relaciones C:N

medias de 10,33, aproximadamente, en el estudio de manzaneros. Una baja relación C:N indica una baja presencia de materia orgánica, así como una baja actividad microbiana, ya que éstas se encargan de asimilar el nitrógeno atmosférico en forma de iones amonio (NH_4^+). Por tanto, se puede concluir en este apartado que los suelos analizados requieren de aporte de materia orgánica para su correcto funcionamiento y mantenimiento a lo largo del tiempo.

En el caso de las enmiendas orgánicas se presupone una mayor cantidad de materia orgánica, ya que se han utilizado precisamente para dotar de ésta a las muestras de suelo anteriormente analizadas.

Los resultados en contenido CNH de las enmiendas orgánicas se representan a continuación:

Tabla 4.5: Análisis de CNH en las enmiendas orgánicas.

Identificador de la muestra	Valor medio de %C	Valor medio de %N	Valor medio de %H	Relación C:N media	%M.O medio de cada muestra
A1	1,12	11,67	1,54	0,10	1,92
A2	0,65	6,13	0,87	0,11	1,12
C1	0,76	7,29	0,98	0,10	1,31
C2	0,75	7,34	1,00	0,10	1,28

Como se puede observar, estas enmiendas orgánicas sí poseen un mayor contenido de materia orgánica, entre el 1 y el 2%. Destaca especialmente la muestra A1, correspondiente a estiércol de cabra, con casi un 2% de materia orgánica en su contenido. Las enmiendas destacan por su alto contenido en N, siendo el estiércol de cabra aquella con mayor presencia de N, hecho que es normal en este tipo de muestras (Washaya, Whashaya ;2023)

Sin embargo, a pesar de que se cumpla lo esperado, es decir, que las enmiendas orgánicas tengan un mayor contenido en materia orgánica con respecto a los suelos, este contenido es anormalmente bajo en comparación con estiércoles de cabra analizados en otros estudios (Díaz et al, 2020). En este estudio se analiza un estiércol de cabra de relación C:N 14,3 y de contenido medio en N, en porcentaje, de 1,68. Por tanto, de media ese estiércol tiene alrededor de un 24% de materia orgánica, cantidad muy superior al 1,92% obtenido en este caso.

4.4. Análisis de resultados obtenidos en fluorescencia de rayos X (XRF)

4.4.1. Análisis de materiales de referencia certificados.

Este equipo, al tratarse de un instrumento de medida portátil, cuenta con algunas limitaciones que afectan considerablemente a los resultados obtenidos. Entre estas limitaciones, se puede destacar que el equipo no hace un vacío completo a la hora de medir, por lo que la presencia de gases en la atmósfera del equipo durante la medición puede provocar que los elementos muy ligeros no puedan cuantificarse adecuadamente, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.2.6. En adición a esto, el equipo solo realiza medidas semicuantitativas, por lo que los valores obtenidos no corresponden exactamente con los valores reales. Por todo lo anterior, además del análisis de las muestras de suelo y las enmiendas orgánicas, se tomaron dos materiales de referencia certificados (a partir de ahora por fluidez en el texto se les abreviará MRC), con los que se podrá comparar la exactitud y precisión del equipo con los dos modos de medida utilizados.

Concretamente, los MRC analizados son NCS DC 85108 y NCS DC 85109 respectivamente. Dichos materiales cuentan con más elementos con valores certificados de los encontrados en los suelos, por lo que a continuación solo se muestran los de interés para este estudio. Además, en la certificación se han incluido porcentajes de los elementos en forma de óxidos, por lo que es necesario hacer una conversión a % elemental.

Tabla 4.6: Porcentajes certificados en diferentes elementos mayoritarios de interés (forma atómica)

Porcentaje de cada elemento presente en los materiales de referencia										
Material	Si	Al	Fe	Mg	Ca	K	Cu	Zn	B	Mo
NCS DC 85108	29,48	6,75	3,15	1,21	3,26	2,02	25	68	54	0,82
NCS DC 85109	25,11	7,80	4,00	1,26	5,66	2,26	29	96	75	1,53

Tabla 4.7: Concentraciones certificadas (en partes por millón) de diferentes elementos minoritarios de interés (forma atómica)

Concentración de cada elemento presente en los materiales de referencia				
Material	Ti	Mn	P	S
NCS DC 85108	4076	596	707	170
NCS DC 85109	3896	821	860	190

Con estos valores se puede comparar las medidas obtenidas con fluorescencia de rayos X, en ambos modos, para estos elementos. De esta forma, si ambos modos miden un mismo elemento, el valor más cercano al valor de referencia indicará qué modo mide con mayor exactitud y, por tanto, qué elementos es mejor medir con cada uno de ellos. Por esto, comparando los valores obtenidos con ambos modos para los materiales de referencia, se concluye que:

- El silicio (16,5%), el aluminio (1,3%), fósforo (0,6%) y azufre (0,07%) se miden exclusivamente en el modo *mining*. Estos elementos normalmente se subestiman en este tipo de medidas, ya que al tratarse de elementos ligeros, como se comentó en otros apartados, la energía de sus transiciones puede recogerse por los gases presentes en el soporte del equipo, ya que no está a vacío.
- El hierro (3,54% de media), el calcio (4,05%) potasio (0,83%) manganeso (0,2%) cobre (0,028%) y zinc (0,029%) tienen mejores resultados al medirse en el modo *soils*.

Con respecto a sus espectros, a continuación se muestran los espectros en los tres filtros (*low*, *main* y *high*) para determinar la presencia de ciertos elementos.

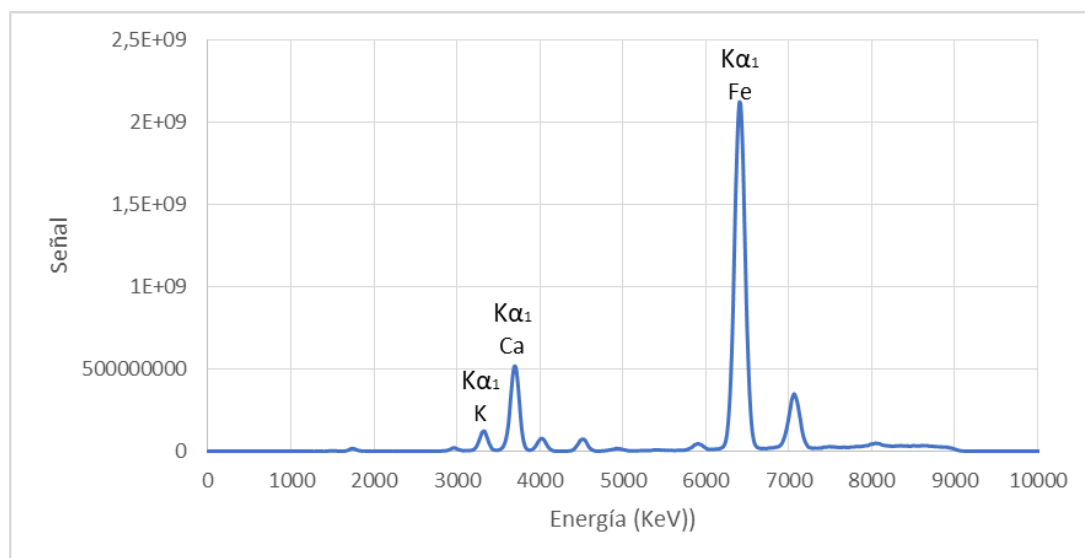


Figura 4.4: Espectro low range del material de referencia NCS DC 85108. Encima de algunas de las señales se indica a qué elemento corresponde cada banda.

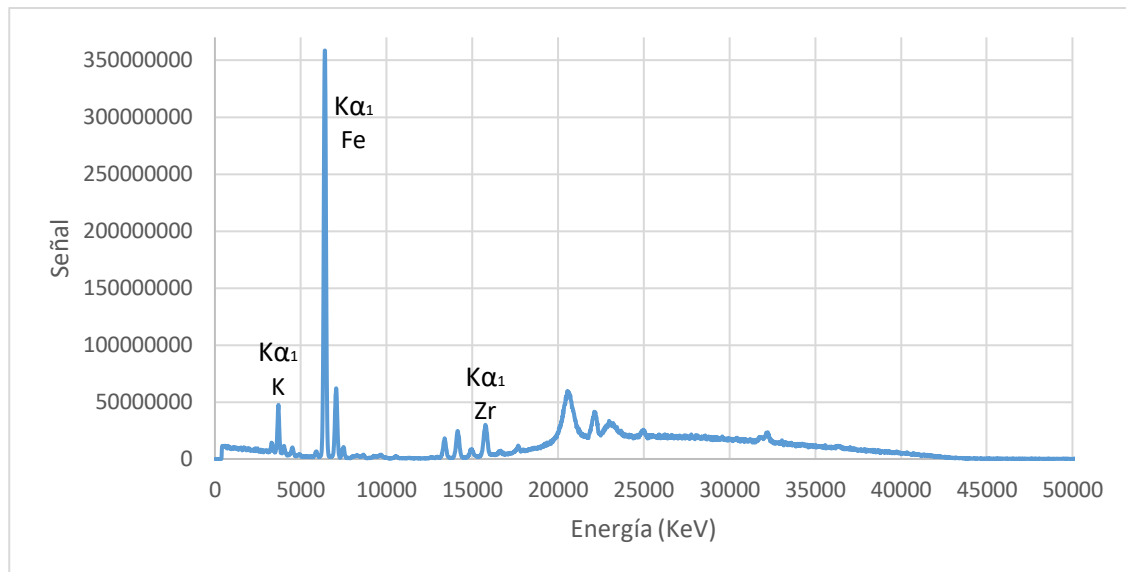


Figura 4.5: Espectro main range del material de referencia NCS DC 85108. Encima de algunas de las señales se indica qué elemento es el causante de esa banda.

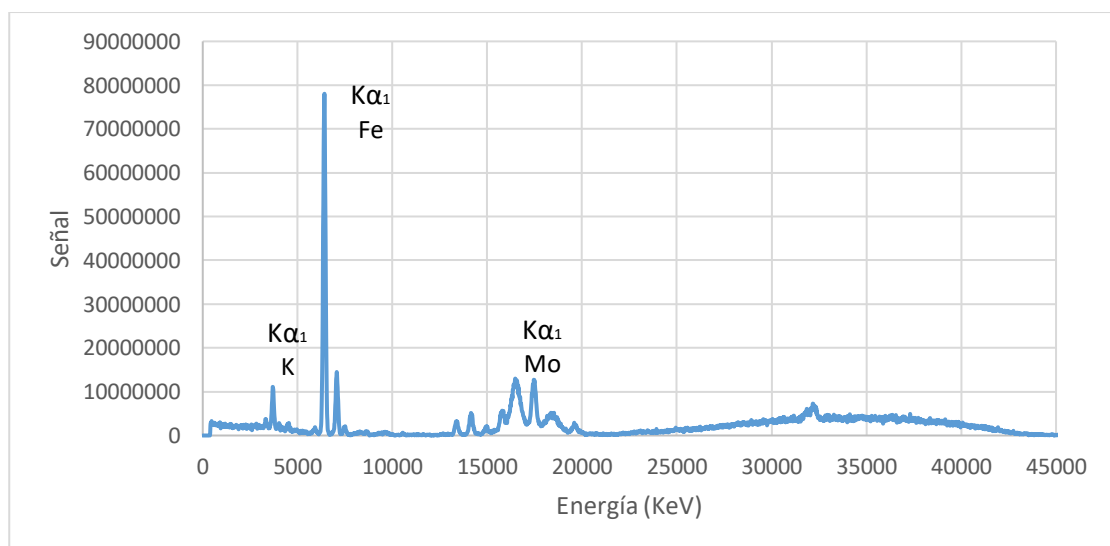


Figura 4.5: Espectro high range del material de referencia NCS DC 85108. En la figura se ven etiquetados algunos elementos así como las líneas que estos provocan.

Cabe destacar que los espectros de los distintos filtros son iguales en modo *soils* y *mining*, variando únicamente el calibrado que el equipo utiliza para llevar a cabo la semicuantificación.

4.4.2. Resultados en las muestras de suelo.

Previo a mostrar los resultados obtenidos, es importante destacar, en ambos tipos de muestras, que el fluorímetro de rayos X hace una medida, como ya se

ha comentado, semicuantitativa de prácticamente todos los elementos de la tabla periódica. Algunos de estos elementos, por sus características, no están presentes en las muestras o su concentración es tan pequeña que el instrumento no alcanza a detectarlos, por lo que a la hora de ver los resultados aparecerían con la etiqueta “<LOD”, indicando que se encuentran por debajo del límite de detección. Por tanto, todos los elementos con esta etiqueta no serán considerados ni comentados posteriormente. Algunos de ellos son: uranio, antimonio, cadmio, selenio, oro y wolframio, entre otros muchos.

Tras observar la forma y qué elementos se pueden localizar en cada filtro, se muestran los resultados de los elementos mayoritarios más representativos en ambas calibraciones. Aparte, se han colocado aquellos que no superan el 1% en el total de la composición (elementos minoritarios)

Tabla 4.8: Elementos mayoritarios medidos en modo *soils* (valor medio expresado en % con respecto al total de la composición)

Identificador	Fe	Ca	K	Ti
S1	2,64	2,98	1,00	0,55
S2	2,64	3,07	0,72	0,51
S3	1,83	3,03	0,96	0,48
S4	1,43	5,49	1,10	0,52
S5	1,60	4,77	1,09	0,53
S6	1,44	4,72	1,03	0,44
S7	2,56	3,37	0,87	0,56
S8	2,19	2,70	0,77	0,47
S9	3,94	3,41	0,85	0,58
S10	8,17	3,86	0,64	0,33
S11	5,20	3,45	0,45	0,23
S12	5,55	8,71	0,59	0,23
S13	7,72	4,65	0,71	0,27
S14	2,63	2,56	0,88	0,57
Error medio (%)	0,02	0,01	0,02	0,01

Los resultados muestran que hay una gran cantidad de Fe notable en las muestras, habiendo variaciones sustanciales en algunas de ellas como consecuencia del origen y la heterogeneidad del medio. Con respecto al Ca y al

K, no se puede confirmar que los porcentajes mostrados sean suficiente para los cultivos, ya que pueden formar parte de minerales.

Tabla 4.9: Elementos minoritarios medidos en modo *soils* (valor medio expresado en partes por millón)

Código	Zr	Sr	Rb	Zn	Cu	Mn	Cr	V
S1	458,41	59,23	54,72	34,90	27,36	146,29	127,82	119,46
S2	354,21	53,81	50,39	39,32	30,80	224,35	166,73	119,99
S3	502,75	57,31	48,90	35,95	25,00	154,13	108,76	103,86
S4	662,10	65,33	43,71	34,01	20,15	210,12	70,29	93,14
S5	700,63	64,96	44,45	26,88	<LOD	198,79	91,32	94,43
S6	686,05	65,45	46,08	24,95	<LOD	157,99	78,18	74,84
S7	546,71	55,68	49,30	30,46	27,44	367,67	139,20	116,24
S8	410,47	40,49	42,55	31,62	23,45	187,39	107,50	113,66
S9	396,91	65,35	75,46	56,58	46,77	317,10	215,57	165,01
S10	375,81	34,28	17,46	9,71	<LOD	72,66	<LOD	55,51
S11	265,87	17,80	8,54	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	42,33
S12	314,19	52,60	12,71	13,02	<LOD	<LOD	<LOD	38,22
S13	244,5	29,36	16,34	13,06	<LOD	<LOD	23,76	50,28
S14	522,86	54,22	51,62	31,43	20,62	222,91	148,44	133,95
Error medio (ppm)	5,98	2,25	2,38	6,29	12,49	42,41	15,31	20,75

En cuanto a los elementos minoritarios, cabe destacar los valores de Zr presentes en prácticamente todas las muestras, además de la no detección de varios elementos (Cu, Mn y Cr) en las últimas muestras debido a la tipología de minerales presentes en la zona y a su mayor o menor presencia.

Tabla 4.10: Elementos mayoritarios cuantificados en modo *mining* (valores medio expresados en % con respecto al total de la muestra)

Identificador	Si	Al	P
S1	15,48	2,16	0,35
S2	13,77	2,07	0,36
S3	15,29	1,98	0,40
S4	16,81	1,51	0,70
S5	16,23	1,43	0,91
S6	16,78	1,36	0,87
S7	14,25	2,02	0,39

Tabla 4.10 Continuación			
Identificador	Si	Al	P
S8	15,47	1,84	0,40
S9	12,51	2,21	0,39
S10	16,33	1,32	0,42
S11	18,28	1,10	0,41
S12	18,00	0,96	0,46
S13	19,12	1,41	0,50
S14	15,88	2,06	0,42
S15	15,13	1,47	0,40
Error medio (%)	0,11	0,06	0,04

Estos resultados, por último, confirman la existencia de una gran cantidad de aluminosilicatos, de los que se ha hablado anteriormente, por lo que cabía esperar una alta concentración de estos elementos. El P, por su parte, deberá compararse con los resultados obtenidos en ICP-MS para ver qué cantidad de este está disponible y qué parte forma parte de la mineralogía.

4.4.3. Resultados en las enmiendas orgánicas.

Para las enmiendas orgánicas, los resultados que se obtuvieron, teniendo en cuentas los mismos elementos que en el apartado anterior, se reflejan en las tablas a continuación:

Tabla 4.11: Elementos mayoritarios medidos en modo *soils* (valor medio expresado en % con respecto al total de la composición) para las enmiendas orgánicas.

Identificador	Fe	Ca	K	Ti
A1	0,59	2,50	3,11	0,16
A2	0,13	1,90	2,78	0,30
C1	0,68	4,90	1,23	0,22
C2	0,68	5,40	1,27	0,26
Error medio (%)	0,01	0,02	0,02	0,01

En estas enmiendas, como se comentó para la conductividad, hay una alta presencia de aquellos elementos que pueden formar sales solubles, como es el

caso del K y el Ca; mientras que aquellos elementos que no las forman no representan una parte notable en la composición.

Tabla 4.12: Elementos minoritarios medidos en modo *soils* (valor medio expresado en partes por millón) para las enmiendas orgánicas.

Código	Zr	Sr	Rb	Zn	Mn	V
A1	179,07	179,78	39,86	52,99	122,73	28,17
A2	461,61	143,60	74,76	67,26	151,53	59,81
C1	188,6	213,04	28,63	123,21	188,57	29,00
C2	246,54	215,69	29,73	100,68	155,39	41,84
Error medio (ppm)	4,46	3,80	2,33	7,46	36,75	14,70

Nótese con estos datos las diferencias existentes entre los elementos minoritarios entre los suelos y las enmiendas orgánicas, ya que elementos como el Ba o el Cu, que sí aparecían antes, están por debajo del límite de detección.

Tabla 4.13: Elementos mayoritarios cuantificados en modo *mining* (valores medio expresados en % con respecto al total de la muestra)

Identificador	Si	Al	P	S
A1	12,56	0,70	0,67	1,53
A2	13,82	1,12	0,66	0,69
C1	13,21	0,68	0,72	0,29
C2	14,02	0,77	0,72	0,24
Error medio (%)	0,11	0,06	0,02	0,01

Como se puede apreciar, a excepción de algunos elementos, las enmiendas orgánicas tienen una composición parecida a la de los suelos, teniendo porcentajes más bajos en caso de las enmiendas y contando con la presencia de azufre cuantificable.

4.5. Análisis de la capacidad de intercambio de cationes.

Esta metodología se utiliza, principalmente, para determinar qué concentración de cationes está disponible para los distintos organismos que crecen en el suelo. Para ello se sigue el procedimiento descrito en el apartado 3.2.3 y se registran los espectros. En este caso, la señal obtenida corresponde al complejo de

cobalto, por lo que las muestras mostrarán, en la longitud de onda para la que la señal sea máxima, una disminución de la señal, ya que el Co se habrá intercambiado con otros cationes presentes en el suelo y, por tanto, no estará aportando señal. Aplicando una expresión matemática, en la que se tienen en cuenta diversos aspectos como la masa de suelo utilizada, el volumen de la disolución medida y algunos factores multiplicativos, se puede obtener la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Según el procedimiento:

$$CIC_{A472} = \left(\frac{A472_{0,05N} - A472_{muestra}}{A472_{0,05N}} \right) * 50 * \left(\frac{V}{m} \right) * 100$$

Expresión en la que:

- $A472_{0,05N}$ es la absorbancia a 472 nm de la disolución de cloruro de cobaltihexamina (III) 0,05N puro. En este caso el valor es de 0,93.
- $A472_{muestra}$ es la absorbancia a 472 nm del sobrenadante de la muestra problema.
- V es el volumen, en litros, de la disolución que se ha colocado a cada muestra problema. En este caso un total de 40 mL.
- m es la masa de suelo exacta pesada en cada uno de los casos.

Aplicando esta expresión a cada muestra, se obtienen los valores de las dos últimas columnas. Los valores obtenidos son positivos ya que en esta metodología la señal del complejo sin haber pasado por el proceso de intercambio es más intensa que la señal de las muestras, ya que en el resto de casos parte del cobalto perteneciente al complejo se ha intercambiado con los cationes presentes en la muestra.

Una vez se hicieron los análisis de la capacidad de intercambio de cationes, tal como se describió en el apartado 3.2.3, se registró el espectro UV-Vis de las distintas muestras entre longitudes de onda de 350 y 700 nanómetros (nm). De esta forma, se puede comprobar si hay diferencias significativas en la composición de los suelos con respecto a las enmiendas orgánicas analizadas. Los valores de absorbancia a 472 nm ($A472$), así como otros parámetros necesarios se representan en la tabla 4.14.

Tabla 4.14: Resultados de la capacidad de intercambio de cationes de los suelos analizados, agrupados por zonas de muestreo.

Procedencia	Muestras	Masa (g)	A472 muestra	CEC472 (cmol/kg suelo)
Lérabé	S1A	2,09	0,88	4,46
	S1B	2,049	0,89	3,58
	S2A	1,999	0,83	10,05
	S2B	2,028	0,80	12,95
	S3A	2,022	0,88	4,58
	S3B	2,028	0,89	4,17
	S14A	2,01	0,80	1,73
	S14B	2,034	0,82	1,75
Guedé Village	S4A	2,032	0,91	1,61
	S4B	2,025	0,91	1,80
	S5A	2,002	0,91	1,06
	S5B	2	0,91	0,13
	S6A	2,011	0,92	14,60
	S6B	2	0,92	15,32
Diana Alwaly	S7A	2,013	0,79	13,56
	S7B	2,009	0,78	13,99
	S8A	2,014	0,80	19,59
	S8B	2,089	0,79	22,54
	S9A	2,036	0,74	4,69
	S9B	2,182	0,70	3,68
Petel Dieguess	S10A	2	0,88	0
	S10B	2,096	0,89	0,02
	S11A	2,087	0,93	3,03
	S11B	2,008	0,93	3,56
	S12A	2,018	0,90	3,28
	S12B	2,01	0,89	2,36
Agnam	S13A	2,033	0,89	13,75
	S13B	2,035	0,90	11,61

Como se puede apreciar en el caso de las muestras de suelo, los valores oscilan entre 0 y 15 cmol/kg de suelo, de media. Separando por zonas, todos los resultados son similares a los de su zona y, en general, cercanos a 0. Llama la atención los resultados de las muestras de Guedé Village y Petel Dieguess, ya que sus valores son especialmente bajos, siendo prácticamente 0. Esto implica

que hay una baja cantidad de cationes disponibles para los distintos organismos que interactúen con el suelo, tal como se vio en los resultados de la conductividad. Además, se pueden achacar a bajos contenidos en arcillas y materia orgánica, que son dos de los responsables fundamentales de valor de este parámetro. Para ponerlo en perspectiva, la CIC normal en los arenosoles, una de las tipologías de suelo en las que se encuentran las muestras, presentan una capacidad de intercambio efectiva de 4 cmol/kg entre 10 y 20 cm de profundidad y es algo mayor en la superficie (FAO, 2021), por lo que los valores obtenidos son bajos, pero normales en la tipología de suelos en las que se encuentran, por ejemplo, la presencia de materia orgánica no es tan común en los arenosoles, hecho que no respalda los bajos valores obtenidos en este trabajo.

En cuanto a las enmiendas orgánicas, se analizó su capacidad de intercambio de cationes. Tal como se notaba en el apartado de análisis de conductividad, la cantidad de cationes de estas muestras eran mayores, por lo que cabría esperar que su capacidad de cambio de cationes fuera mayor. Los resultados de estas enmiendas se muestran a continuación:

Tabla 4.15: Resultados de la capacidad de intercambio de cationes de los suelos analizados, agrupados por zonas de muestreo.

Procedencia	Muestras	Masa (g)	A472 muestra	CEC472 (cmol/kg suelo)
Lérabé	A1	1,118	0,7740	30,04
Guedé Village	A2	1,023	0,8113	25,00
Desconocida (ONG)	C1	1,006	0,7727	33,66
Desconocida (ONG)	C2	1,004	0,7595	36,54

Con respecto a las enmiendas orgánicas, estas presentan diferencias apreciables en la concentración de cationes con respecto a los suelos, siendo en los primeros notablemente superior. Se puede apreciar que las muestras de compost (C1 y C2) presentan la mayor concentración de cationes. Este hecho puede ser explicado si se tiene en cuenta que existe una relación inequívoca entre la cantidad de materia orgánica y la CIC del suelo que contenga esa materia orgánica, siendo una variación en la primera una causa de variación en

la cantidad de cationes disponibles (Ramos et. al, 2018). En este estudio se puede apreciar cómo la eliminación de la materia orgánica de un suelo provoca que la CIC disminuya prácticamente su valor a la mitad.

4.6. Análisis de nutrientes disponibles mediante ICP-MS.

Anteriormente se ha analizado la capacidad de cambio de los distintos suelos y se ha dado un valor total para cada uno de ellos que engloba a todos los cationes disponibles. Con el objetivo de desglosar qué cantidad de cada elemento está presente en las muestras, el extracto utilizado en la medición de la capacidad de intercambio de cationes se llevó a un ICP-MS para obtener las concentraciones de cada catión. Es importante recalcar es este punto que no todos los cationes presentes en el suelo son fácilmente asimilables por los organismos, sino que una parte se encuentra formando parte de arcillas y minerales, no estando disponible en estos casos. Para ponerlo en perspectiva, los valores obtenidos en las medidas de XRF corresponden a la cantidad de un elemento, K por ejemplo, total en la muestra, incluyendo tanto el que está disponible para los cultivos como aquel que forma parte de los minerales; por otra parte, los valores obtenidos en la CIC y en el ICP-MS solo informan de la cantidad de K disponible para su asimilación.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, los resultados de las muestras de suelo se representan a continuación, teniendo en cuenta las diluciones que se efectuaron a la hora de su preparación.

Tabla 4.16: Resultados medios (en ppms) de los distintos elementos medidos en ICP-MS y con presencia en XRF. Los valores obtenidos en las medidas de Mg y Na no se han medido en XRF debido a la gran dificultad de la medida, ya que el Na es un elemento muy ligero y el Mg no puede medirse en este instrumento.

Código	P	K	Ca	Fe	Mn	Cu	Zn	Mg*	Na*
S1	1,48	286,62	2667,65	0,03	29,14	0,06	0,93	1356,90	45,69
S2	2,44	398,62	3581,19	0,02	52,98	0,08	1,18	2646,12	829,71
S3	2,39	730,36	2669,41	0,04	28,38	0,08	1,09	1733,49	332,71
S4	71,40	1486,76	3516,38	0,02	4,57	0,07	0,41	909,51	282,46
S5	59,67	1124,84	3053,25	0,02	6,00	0,06	0,70	870,77	89,77
S6	90,30	1371,98	2691,27	0,03	20,71	0,11	0,58	729,15	47,34
S7	1,41	224,52	3741,45	0,01	32,18	0,06	0,78	1115,52	3608,08

Tabla 4.16 Continuación

Código	P	K	Ca	Fe	Mn	Cu	Zn	Mg*	Na*
S8	1,72	521,02	2893,68	0,01	78,87	0,10	1,00	1519,77	134,36
S9	1,53	636,49	3779,56	0,28	200,08	0,69	1,84	2524,78	278,36
S10	14,63	652,52	2032,48	0,01	0,51	0,06	0,08	643,68	245,23
S11	2,13	251,01	1011,81	<LOD	16,57	0,04	0,43	289,51	31,24
S12	54,00	1027,93	2271,60	0,01	0,36	0,05	0,07	523,12	1023,54
S13	44,84	833,94	2122,15	<LOD	0,76	0,04	0,14	417,98	22,34
S14	0,73	228,84	3335,00	0,01	67,54	0,09	1,20	1932,52	247,38

Para poner estos resultados en perspectiva, por ejemplo con las muestras S5, la concentración, en partes por millón, disponibles para los cultivos (1124,84) es prácticamente la décima parte del potasio total que se cuantificó en XRF (1,09%=10900 ppm), estando el otro 90% formando parte de minerales. En comparación con algunos estudios, el % de Cu obtenido en otros estudios se encuentra alrededor del 0,8% o el % Fe sobre el 1,17% (Siqueira et. al, 2019), por lo que se puede estimar que estos suelos tienen bajos contenidos en Cu y Fe, además de Zn y Ca.

Con respecto al resto de elementos, se puede destacar la poca concentración de Fe disponible, (0,04 ppm frente al 2,5% de media que tenían las muestras), y las bajas cantidades de Cu y Zn.

Si se toman los resultados de las enmiendas orgánicas:

Tabla 4.17: Resultados de los cationes analizados por ICP-MS en las enmiendas orgánicas

Código	P	K	Ca	Fe	Mn	Co	Cu	Zn
A1	207,95	37261,08	4268,62	0,59	1,36	355,77	0,25	0,17
A2	154,93	16620,89	2247,72	0,26	1,74	610,05	0,19	0,13
C1	188,53	4733,10	4458,00	0,07	1,62	431,46	0,17	0,15
C2	190,96	5101,91	4842,78	0,07	1,64	517,02	0,16	0,17

En las enmiendas orgánicas, en comparación con los suelos, hay una cantidad muy superior en el K y Ca, mientras que en el resto son valores bajos o similares a los anteriores. Esto indica que las enmiendas poseen una cantidad de estos elementos suficiente como para ser utilizada en los cultivos de interés, sobre

todo el estiércol de cabra (Muestra A1) y el *bokashi* (Muestra A2) por encima de los dos compost facilitados por ENDA PRONAT.

5. CONCLUSIONES.

Se ha hablado anteriormente de la relevancia de los suelos para el desarrollo de la agricultura en Senegal, por tanto, las conclusiones obtenidas de este estudio pueden suponer una aportación significativa a su mejora. Concretamente, se concluye que:

-Los suelos estudiados presentan un porcentaje bajo de materia orgánica, tal como que ha comprobado en los estudios de CNH y en el espectro infrarrojo. Este hecho impide que los distintos cultivos tengan una fuente orgánica de la que tomar sus nutrientes, lo que disminuye sensiblemente su desarrollo. Además, la falta de materia orgánica provoca que parámetros como la capacidad de cambio o la conductividad se vean afectados, aumentando los efectos negativos anteriores.

-A su vez, las enmiendas orgánicas utilizadas como apoyo a estos suelos no suponen un aporte suficiente, ya que su contenido orgánica es bajo, en comparación a otras enmiendas orgánicas, y por lo tanto sería conveniente una revisión de los sistemas y precursores de dichas enmiendas.

6. BIBLIOGRAFÍA.

1. Altisent, J. M. D., Parra, N. R., & Yugueros, R. M. (2009). Influencia del pH en los sistemas de cultivo. *Agricultura: Revista Agropecuaria y Ganadera*, 915, 142-145. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2880273>
2. Atlas, R. M., & Bartha, R. (2001). *Ecología microbiana y microbiología ambiental* (4ª ed., R. Guerrero Moreno, Trad.). Addison-Wesley Iberoamericana España. Páginas 2-3.
3. Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. In *Geoderma* (Vol. 147, Issues 3–4); <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>. Páginas 159-171.
4. Bazán, R. T. (1996). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA “LA MOLINA.” Páginas 15-20; 32-39
5. Bianchi, S. R., Miyazawa, M., de Oliveira, E. L., & Pavan, M. A. (n.d.). BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY Relationship between the Mass of Organic Matter and Carbon in Soil. *Braz. Arch. Biol. Technol.* v, 51(2), 263–269.
6. Bleha R, Třešnáková L, Sushytskyi L, Capek P, Čopíková J, Klouček P, Jablonský I, Synytsya A. Polysaccharides from Basidiocarps of the Polypore Fungus *Ganoderma*

- resinaceum*: Isolation and Structure. *Polymers* (Basel). 2022 Jan 8;14(2):255. doi: 10.3390/polym14020255. PMID: 35054662; PMCID: PMC8778809.
7. Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I., & Aguirre-Gómez, A. (2021). Soil quality evaluation: Generation and interpretation of indicators. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.698>
 8. Colín-Navarro, V., Castelan-Ortega, O. A., & García-Martínez, A. (n.d.). PROPIEDADES QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL ESTIÉRCOL DE CAPRINO DURANTE EL COMPOSTAJE Y VERMICOMPOSTAJE <https://www.researchgate.net/publication/33215319>.
 9. Cortés, D., Pérez, J., & Camacho Tamayo, J. (2013). Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401–408. <https://doi.org/10.31910/rudca.v16.n2.2013.912>.
 10. Dasgupta, S., Pate, S., Rathore, D., Divyanth, L., Das, A., Nayak, A., Dey, S., Biswas, A., Weindorf, D. C., Li, B., Silva, S. H. G., Ribeiro, B. T., Srivastava, S., & Chakraborty, S. (2024). Soil Fertility Prediction Using Combined USB-microscope Based Soil Image, Auxiliary Variables, and Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Soil Advances*, 2, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100016>.
 11. Díaz, R., Ricarte, A., Pereyra, D., & Guzmán, L. (2020). Estimación del contenido de nitrógeno, fósforo y potasio del estiércol de cabra. *Estación Experimental Agropecuaria La Rioja*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/338690532>
 12. Doran, John. W; Coleman D.C; Bezdicek, D.F; Stewart B.A; (1994); Defining and assesing soil quality. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>; extraído de: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, Volume 35; capítulo 1.
 13. FAO. 2020. The Voluntary Guidelines: securing our rights - Senegal River Basin. Rome
 14. García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138. <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>
 15. Garrido Valero, M.S., 1994. Interpretación de Análisis de Suelos, Hojas divulgadoras nº 5/93 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, Madrid, 40 pp
 16. González Corchón, C. (2023). *Tecnología agrícola en Senegal*. Oficina Económica y Comercial de España en Dakar, ICEX España Exportación e Inversiones. <https://www.icex.es>
 17. Gondek, M., Weindorf, D. C., Thiel, C., & Kleinheinz, G. (2020). Soluble Salts in Compost and Their Effects on Soil and Plants: A Review. *Compost Science & Utilization*, 28(2), 59–75. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2020.1772906>
 18. Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O. Zougmore, R. (Eds.). (2013). Soil Atlas of Africa. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/52319>. Páginas 50-61; 64-66.

19. Landon, J. (1991). Booker Tropical Soil Manual. <https://doi.org/10.4324/9781315846842>. Capítulo 7.
20. Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I. *et al.* The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ* **1**, 544–553 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
21. Madejová, J. (2002). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, **31**(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/s0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s0924-2031(02)00065-6)
22. Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M. T., Landi, L., Pietramellara, G., & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal Of Soil Science*, **54**(4), 655-670. <https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0556.x>
23. Navarro, G. Pérez-Lucas, G. & Navarro, S (2022). Análisis de suelos y aguas: aplicación agrícola: (1º ed). Dextra Editorial. <https://elibro.net/es/lc/ujaen/titulos/228505>.
24. Ramos, F. T., De Carvalho Dores, E. F., Weber, O. L. D. S., Beber, D. C., Campelo, J. H., & De Souza Maia, J. C. (2018). Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, **98**(9), 3595-3602. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>
25. Rewald, B., & Meinen, C. (2013). Plant roots and spectroscopic methods – analyzing species, biomass and vitality. *Frontiers In Plant Science*, **4**. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00393>
26. Rob, V., Giovanni, B. L., Kostas, S., Boyd, H., Aysen, T., Martin, P., Linda, A., Aikaterini, K., Marc, M., Dominik, W., Dubravka, B., Andrea, C., Garcia, C. J., Michael, C., Piero, C., Andre, C., Charlotte, D., Valentina, F., Ileana, G. Mulu, K. (2017). The future of food and agriculture. <https://hal.inrae.fr/hal-04567070>.
27. Rodríguez P, Wilson; García R, Paola A; Fajardo O, Alberto. (2016). Aplicaciones de técnicas espectroscópicas para el análisis de suelos. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, **12**(2), 228-251. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2030>.
28. Sánchez-Sánchez, A., Cerdán, M., Jordá, J. D., Amat, B., & Cortina, J. (2019). Characterization of soil mineralogy by FTIR: application to the analysis of mineralogical changes in soils affected by vegetation patches. *Plant And Soil*, **439**(1-2), 447-458. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04061-6>.
29. South Dakota Soil Health Coalition. (2020,). *Soil Electrical Conductivity* South Dakota Soil Health Coalition. <https://www.sdsoilhealthcoalition.org/technical-resources/chemical-properties/soil-electrical-conductivity/>.
30. Shunfeng, Xu, H., Ji, M., & Jiang, Y. (2013). Characteristics of Soil Organic Carbon, Total Nitrogen, and C/N Ratio in Chinese Apple Orchards. *Open Journal Of Soil Science*, **03**(05), 213-217. <https://doi.org/10.4236/ojss.2013.35025>
31. L. M. Usuga-Manco, A. López-Valdivieso y M. O. Bustamante-Rúa, “Estudio de la hidrofobicidad de la caolinita de La Unión, Antioquia”, Tecno Lógicas, vol. 18, no. 35, pp. 71-81, 2015.

32. Vásquez-Mora, Carlos; (2015); IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS PRESENTES EN BIENES CULTURALES MEDIANTE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA FTIR-ATR. Expuesto en la conferencia LASMAC 2015.
33. Vera Silva, Luca Montanarella, Arwyn Jones, Oihane Fernández-Ugalde, Hans G.J. Mol, Coen J. Ritsema, Violette Geissen; (2018); Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union; Science of The Total Environment, Volumen 628, Páginas 1352-1359, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.093>.
34. Washaya, S., Washaya, D.D. Benefits, concerns and prospects of using goat manure in sub-Saharan Africa. *Pastoralism* **13**, 28 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13570-023-00288-2>.