

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Tesis presentada en opción al título académico de Master en Ingeniería Agrícola

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES QUÍMICAS DE SUELOS PARDOS
MULLIDOS MEDIANAMENTE LAVADOS MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DE
REFLECTANCIA VIS/NIR**

Autor: Ing. Josiel Rodríguez Cabrera

Tutores: Dr. C. Ahmed Chacón Iznaga

Dr. C. Miguel Rodríguez Orozco

Santa Clara
2015

Pensamiento



Una nación que destruye su suelo se destruye a si misma....

Franklin D. Roosavelt

Agradecimientos



A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a mi formación profesional y, en especial a:

-Dr.C. Ahmed Chacón Iznaga: por tutelar esta investigación, por su apoyo incondicional, por su dedicación y empeño.

-A Yaniseydi, mi novia, por su comprensión y apoyo en las buenas y en las malas.

-A mi familia en general por todo su apoyo incondicional.

-A mis colegas de trabajo por brindarme su amistad y compartir juntos momentos buenos y malos.

Dedicatoria



Con amor:

- A Joseito y Bertica, mis padres: a quien debo no solo la existencia, sino la razón y el sentido de mi vida.
- A Tomás y Clotilde, mis abuelos: por guiarme por el camino correcto, por comprenderme y apoyarme.
- A la Revolución Cubana.

Resumen



RESUMEN

Con el objetivo de determinar propiedades químicas de suelos Pardos mullidos medianamente lavados mediante espectroscopia de reflectancia VIS/NIR de la Estación Experimental Agrícola “Álvaro Barba Machado”, se realizó un muestreo en la etapa comprendida entre los meses de septiembre y diciembre del 2013. Se tomaron dos áreas agrícolas, una de 90 x 110 m para la calibración y otra de 40 x 110 m para la validación del modelo VIS/NIR. Para la colecta de las muestras de suelo se empleó el método de grilla, mediante el cual las áreas se subdividieron en celdas de 10 x 10 m, de las cuales se tomaron 88 y 33 muestras en las líneas de intersección de cada celda, en las áreas de calibración y validación respectivamente. Las muestras fueron analizadas para las propiedades químicas materia orgánica por el método de Walkley-Black, fósforo asimilable y potasio asimilable por el método de Oniani . Como resultados principales se obtuvieron los histogramas de distribución de frecuencias absolutas las propiedades químicas del suelo, además se comprobó que en el contenido de materia orgánica y de K_2O presentaron los mayores coeficientes de variación en ambas áreas analizadas, con valores superiores a 30 y 40%, a la vez que entre el K_2O y el P_2O_5 se observaron las más altas correlaciones significativas positivas con coeficientes de 0,63 y 0,35 para el área de calibración y validación respectivamente. En todas las propiedades químicas se obtuvo una predicción VIS/NIR menos fiable.

Tabla de contenidos



Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
1.1. Variación en la fertilidad del suelo	7
1.1.1. Funciones de la materia orgánica en el suelo.....	8
1.1.2. Métodos para la determinación de la materia orgánica en el suelo.....	10
1.1.3. Contenido y forma del fósforo en el suelo	12
1.1.4. El fósforo en las plantas.....	13
1.1.5. El potasio en el suelo	14
1.2. Espectrofotómetros Vis/ NIR	15
1.2.1. Empleo de las técnicas espectroscópicas VIS/NIR.....	16
1.2.2. Principio de funcionamiento de la espectroscopia Vis/NIR.....	17
1.2.3. Espectroscopia VIS/NIR una técnica prometedora para el análisis del suelo in situ y on-line	17
1.2.4. Métodos estadísticos empleados en las mediciones	19
1.2.5. Estudios de suelo empleando el VIS-NIR	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1. Análisis químico de las propiedades de suelo por métodos convencionales.....	27
2.2. Metodología empleada para la realización de los análisis químicos del fósforo y el potasio	28
2.3. Metodología empleada en el Espectrofotómetro VIS- NIR	28
2.4. Proceso de obtención de los datos espectrales	31
2.5. Procesamiento estadístico de las muestras	31
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
3.1. Análisis químico de las propiedades de suelo por métodos convencionales.....	33
3.2. Distribución de frecuencia de los parámetros de fertilidad del suelo dentro de un campo.....	34
3.3. Correlación entre las propiedades químicas del suelo	37
3.4. Variabilidad espacial y correlación entre las propiedades químicas del suelo.....	38
3.5. Reflectancia espectral de las muestras de suelo	42
3.6. Predicción Vis/NIR de las propiedades químicas de suelo	43
3.7. Comparación del modelo de predicción VIS/NIR con otro calibrado en suelos Pardos mullidos medianamente lavados en la provincia de Villa Clara	44
3.8. Validación del modelo de predicción Vis/NIR con respecto al calibrado en suelos Pardos mullidos medianamente lavados en la provincia de VC.....	45

CONCLUSIONES	47
RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
ANEXOS	48

Introducción



INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial no solo aumenta la necesidad de los cultivos agrícolas para una suficiente nutrición equilibrada del hombre, sino que además conduce a la degradación de los recursos naturales y la contaminación ambiental debido al mal uso del mismo. El recurso natural que ha sido sometido a la contaminación y la degradación más severa es el suelo, medio fundamental para la producción agrícola.

Un elevado porcentaje del fondo de suelos de Cuba se encuentra afectado por procesos de carácter natural o antrópico, acumulados en el transcurso de los años; con una marcada preponderancia del segundo, que han conducido a que los procesos erosivos afecten más de 2,5 millones de hectáreas, que un alto grado de acidez afecte 3,4 millones de hectáreas, que la elevada salinidad y sodicidad ejerzan su influencia sobre 1 millón de hectáreas aproximadamente, así como que la compactación incida en unos 2,5 millones de hectáreas, mientras que los problemas de drenaje se contabilicen en 2,7 millones de hectáreas y que el 60 % de la superficie agrícola del país se encuentre afectada por estos y otros factores, incluso por más de un factor a la vez, que pueden influir en procesos de desertificación (Suelos, 2001).

La nutrición vegetal, básica para el desarrollo óptimo de los cultivos, depende de la capacidad del suelo para suministrar cada uno de los elementos nutritivos, en forma, cantidad y el momento adecuado que lo requieran. De ahí que se le denomina fertilidad del suelo a la capacidad del mismo para abastecer las necesidades de las plantas con los diferentes elementos nutritivos (Báscones, 2010).

La fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo, cuya capacidad es la de poder suministrar las condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Es por ello que resulta importante para

el estudio de génesis, clasificación y fertilidad de los suelos, la determinación de la materia orgánica, fósforo y el potasio. Estos últimos constituyen dos de los tres macronutrientes — además del nitrógeno— más importantes para un crecimiento óptimo de las plantas.

El total de fósforo (P) de la capa arable de un suelo agrícola, que es la suma del fósforo orgánico e inorgánico, no está relacionado directamente con la disponibilidad del mismo. Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo tomando de esta una concentración muy pequeña del nutriente, para satisfacer las necesidades de los vegetales durante el periodo de crecimiento. En este sentido el suelo debe suministrar una cantidad de fósforo, varias veces mayor que la cantidad presente en la solución del suelo en un momento dado. Para que esto sea posible tiene que existir un equilibrio dinámico entre las diferentes formas de fósforo del suelo (Sanzano, 2013).

Las plantas también pueden absorber elevadas cantidades de potasio (K^+) por vía radicular a partir de la solución del suelo, sin observar variaciones significativas del rendimiento de los productos, en relación con lo obtenido para menores cantidades de potasio absorbido. Debido a su baja carga y pequeño radio iónico, la absorción se efectúa con facilidad y pueden absorberse cantidades de K superiores a las necesidades de la planta, originando lo que se denomina consumo de lujo. Debido a un claro efecto opuesto del calcio y el magnesio frente al potasio, da lugar a situaciones de deficiencias potásica por exceso del calcio activo o de magnesio asimilable (Báscones, 2010).

La contribución de la materia orgánica a la productividad de los suelos ha sido reconocida en la agricultura tradicional ya que es la base de su fertilización, de allí la importancia de cuantificar su contenido en el suelo.

La materia orgánica es considerada el indicador por excelencia para medir la sustentabilidad del agro ecosistema. De ella depende en gran medida una buena estabilidad hídrica de los agregados y por tanto una construcción adecuada del sistema suelo.

La materia orgánica de los suelos es toda la biomasa viva y los residuos orgánicos de plantas, animales y microorganismos, así como los productos de su metabolismo y, muy importante, son las sustancias orgánicas específicas que se forman en el suelo como productos finales del proceso de transformación y descomposición de los materiales originales. A esas últimas sustancias se les denomina humus del suelo, y es la fracción que le confiere estabilidad a su fertilidad, a sus propiedades físicas, químicas y biológicas y a los rendimientos de los cultivos en un ciclo relativamente largo (Alcaide, 1999).

La materia orgánica mejora muchas propiedades químicas, físicas y microbiológicas que favorecen el crecimiento de las plantas. Los suelos con menos de 2% de materia orgánica tienen bajo contenido, y de 2 a 5% es un contenido medio; siendo deseable que el valor sea superior a 5%, así garantiza una buena relación aire-agua para el crecimiento y desarrollo de los cultivos agrícola.

Ante ello prevalece la necesidad de determinar el contenido de materia orgánica, fósforo y potasio que presentan los suelos pardos mullidos medianamente lavados, del campo 1c de la Estación Experimental “Álvaro Barba” de Las Antillas, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV), área de siembra del Departamento de Agronomía y del Centro de Investigación Agropecuaria (CIAP) para diferentes tipos de gramíneas y leguminosas de diversas investigaciones. Siendo esto necesario para evaluar una serie de parámetros de rendimiento de las mismas. Además, conocer el contenido de estos nutrientes para la fertilización del campo y así lograr mejores rendimientos.

Se impone el análisis de esta tipología de suelo, mediante los tradicionales métodos convencionales como el Walkley-Black para la determinación de la MO, siendo este el más utilizado hasta el momento en la esfera internacional por su fiabilidad y el método Oniani para la determinación del fósforo y el potasio.

En el contexto de la agricultura de precisión, que es un conjunto de técnicas orientado a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola, esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo (Bongiovanni *et al.*, 2006). La utilización de este criterio puede comenzar, a partir de la cosecha con el mapa de rendimiento o a partir del conocimiento de la variabilidad del suelo representada en los mapas de rendimiento y/o fertilidad del suelo, respectivamente.

Espectroscopia Vis/NIR podría ser una alternativa para agilizar el análisis en el laboratorio y por lo tanto, aumentar el número de muestras a analizar; además es una herramienta analítica de respuesta rápida, para la determinación de parámetros de fertilidad del suelo. También, yacería la posibilidad de llevar el instrumento Vis/NIR al sitio del campo (in situ análisis) donde existe la posibilidad de analizar más muestras por campo.

Para el desarrollo de este trabajo se dispone del instrumento (Espectrofotómetro Carl Zeiss) y del equipamiento necesario para analizar los factores precisos e indispensables en un corto tiempo, con bajo costo, con menos recursos y mayor productividad, lo que permite analizar y tomar decisiones al momento en el manejo de los cultivos agrícolas; además a la hora de aplicar los fertilizantes que realmente lleva el suelo, proporciona menor daño ambiental y evita los gastos en reactivos para procesar las muestras por métodos convencionales. Este instrumento tiene una vida útil muy amplia, de multiuso; es decir se utiliza para determinar diferentes parámetros en cultivos, suelos, etc.; que comparándolos con los demás métodos para la determinación del contenido de materia orgánica, fósforo (P) y potasio (K) tendría muchas más ventajas que desventajas. Este estudio permitirá el desarrollo de modelos matemáticos que permitirán determinar las variables de fertilidad del suelo estudiado por una nueva técnica.

La mayoría de los trabajos sobre análisis espectrales para la cuantificación de las propiedades del suelo se ha centrado en espectroscopia VIS/NIR, un método analítico simple y no destructivo que se puede utilizar para predecir varias propiedades simultáneamente (Chang *et al.*, 2001; McCarty *et al.*, 2002; Viscarra *et al.*, 2006; Nduwamungu *et al.*, 2009; Stenberg *et al.*, 2010; Volkan *et al.*, 2010). El espectro recoge tanto la información química como la física, lo que nos permite determinar el contenido de materia orgánica, fósforo (P) y potasio (K) por lo cual nos planteamos el siguiente,

Problema científico

¿Cómo correlacionar las propiedades químicas de un suelo pardo mullido medianamente lavado de un área agrícola no cultivada, con las lecturas de reflectancia espectral obtenidas mediante la técnica de espectroscopia VIS/NIR?

Para ello se parte de la siguiente **Hipótesis**

La combinación de métodos convencionales de análisis químico y la técnica de espectroscopia VIS/NIR, permitirá el desarrollo de modelos matemáticos que correlacionen la reflectancia espectral con las propiedades químicas de suelo, facilitándose su predicción.

Objeto de estudio

Contenido de materia orgánica, potasio y fósforo en los suelos pardos con carbonato.

Objetivo general

Determinar propiedades químicas de suelos pardos mullidos medianamente lavados mediante espectroscopia de reflectancia VIS/NIR.

Objetivos específicos

1. Evaluar la variabilidad espacial y la correlación entre algunas propiedades químicas en el suelo de un área agrícola no cultivada.

2. Determinar mediante la técnica de espectroscopia VIS/NIR la variabilidad de los espectros de reflectancia de muestras de suelo en diferentes longitudes de onda.
3. Correlacionar las propiedades químicas de suelo con las lecturas de reflectancia espectral VIS/NIR en diferentes longitudes de onda.
4. Evaluar la precisión de un modelo de calibración obtenido a partir de muestras de suelo colectadas en diferentes campos de la provincia de Villa Clara, cuando se valida en una nueva área agrícola.

Revisión bibliográfica



CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Variación en la fertilidad del suelo

De acuerdo con las consideraciones de Haneklaus (2006) los suelos no son estáticos ni homogéneos en el espacio y el tiempo. Esto influye directamente en la concentración de la disposición de nutriente de las plantas, en este sentido, la aplicación uniforme de fertilizantes provoca inevitablemente un exceso o un déficit de nutrientes en el suelo que no es ecológica ni económicamente viable.

La variabilidad espacial de cultivos puede ser responsable de las diferencias observadas dentro de un campo y una cosecha de la campaña. Según Guimarães *et al.* (1997) y Bai y Wang (2011), el patrón de distribución espacial de los parámetros de fertilidad del suelo es importante para determinar las limitaciones del suelo, para la nutrición vegetal, la gestión adecuada de los recursos del suelo en áreas cultivadas y para optimizar la fertilización.

Según Hummel y Birrell (1998) los atributos del suelo son más importantes para un lugar determinado o series de suelos, además investigadores y científicos de los cultivos, han sido capaz de recoger datos específicos de sitios para una serie de atributos del suelo durante un número de años.

Por lo tanto, el suelo debe ser caracterizado químicamente con el propósito de determinar el potencial de fertilidad antes de establecer el cultivo. Por eso, antes de afirmar cómo la fertilidad del suelo es mantenida, y las causas de la disminución de la fertilidad del suelo, se deberán realizar algunos pasos; primero, tomar muestras de suelo de los campos de cultivo, almacenamiento y procesamiento de ellos antes de realizar los análisis de referencia o los métodos convencionales.

En teoría, el análisis del suelo debe asegurar que la cantidad correcta de fertilizante, se aplica al suelo para satisfacer las necesidades de nutrientes del cultivo. De ese modo se contribuye también

a evitar cualquier riesgo con el medio ambiente, evitando el exceso de fertilización. Sin embargo, se ha demostrado por De León *et al.* (2004) que hay una diferencia entre las tasas de fertilizantes aplicados basado en presente recomendaciones y los requerimientos de los cultivos reales. Esto implica pérdidas significativas en producción de diferentes cultivos y puede afectar los patrones de variabilidad de los parámetros de fertilidad del suelo.

1.1.1. Funciones de la materia orgánica en el suelo

La materia orgánica representa, aproximadamente, el 5% en el volumen de un suelo ideal. A pesar de ser un porcentaje relativamente pequeño, su presencia es altamente importante en el crecimiento de las plantas. La adición de residuos orgánicos al suelo, provenientes de plantas y animales y su posterior descomposición por los microorganismos, establecen dos procesos que determinan el nivel al cual se acumula materia orgánica en los suelos.

La materia orgánica disponible en el suelo facilita los mecanismos de absorción de sustancias peligrosas como los plaguicidas. Por ejemplo, se sabe que la capacidad del suelo para adsorber compuestos químicos como clorofenoles o cloroanilinas aumenta con el contenido en materia orgánica (Vangestel, 1996). La aplicación de enmiendas orgánicas también aumenta la degradación de fumigantes como el 1,3-D, bromuro de metilo y el isotiocianato metilo disminuye la volatilización de estos tres pesticidas, cuando la enmienda se aplica en los primeros 5cm del suelo (Gan, 1998). Los pesticidas con materiales catiónicos son firmemente adsorbidos por los coloides del suelo; en cambio, con los pesticidas ácidos hay muy poca adsorción, por lo tanto, se concentran en la solución suelo y en las fases gaseosas (Cremlyn, 1991).

El contenido de materia MO de los suelos es muy variable. Un típico suelo de pradera (Molisol) puede contener 5 a 6% de MO en los 15 cm. superiores, mientras que un suelo arenoso aproximadamente 1%. En tanto que un suelo pobremente drenado a menudo tiene contenidos de MO próximos al 10% o más y los suelos tropicales (Oxisoles) son conocidos por sus bajos

contenidos de MO. El nivel de MO en los suelos es proporcional al contenido de nitrógeno (N). La relación C/N de la materia orgánica generalmente cae en el rango de 10 a 12, aunque valores mayores no son inusuales (Silva, 1995).

Kononova (1982) plantea que las tres fases de la materia orgánica del suelo son:

1. Materia orgánica bruta, constituida por residuos animales y vegetales, frescos y parcialmente descompuestos.
2. Humus en formación, integrado por productos de la descomposición avanzada de los residuos orgánicos y productos resintetizados por microorganismos carbohidratos, ácidos orgánicos, compuestos nitrogenados, ligninas etc.)
3. Humus estable, formado por las sustancias estrictamente húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, húmicos, etc.) la mayoría unidas a la parte mineral del suelo.

Las sustancias húmicas aumentan la liberación de potasio fijado a las arcillas. La mayor parte del nitrógeno almacenado en el suelo se encuentra en forma orgánica, por lo tanto, la disponibilidad de materia orgánica influye directamente en la disponibilidad de nitrógeno.

Es importante señalar que aunque muchas veces se utilizan indistintamente los términos materia orgánica y humus, éstos tienen significados diferentes; el humus es la fracción de materia orgánica del suelo totalmente descompuesta y relativamente estable con gran influencia en las propiedades químicas del suelo.

La materia orgánica se concentra mayormente en los primeros centímetros del suelo y disminuye drásticamente con la profundidad, esto debido a que la mayor parte de los restos orgánicos solo son depositados en la superficie del suelo. Existen varios factores que determinan la distribución de la MO en el perfil del suelo (Corbella, 2006).

A) Tipo de vegetación: Las raíces de las gramíneas son fuente importante de MO la cual se concentra en la horizonte "O", mientras que en suelos boscosos, la mayor fuente de materia son

las hojas y restos de tallos que se concentran en el horizonte "O", las raíces no son buena fuente de MO ya que éstas perduran por varios años a diferencia de las raíces de las gramíneas.

B) El drenaje: suelos con alto contenido de humedad y poca aireación tienen mayor concentración de MO debido a que en ausencia de oxígeno la mineralización de ésta es reducida.

C) Condiciones climáticas: climas secos y con altas temperaturas reducen el crecimiento de las plantas y aceleración su descomposición, mientras que climas húmedos y con buena humedad retardan la mineralización de la materia orgánica, conservando su contenido en el suelo.

D) La topografía: también es importante en la distribución de la MO. En suelos con pendiente elevada, la escorrentía de las aguas causa erosión del suelo, arrastrando la materia orgánica de la superficie y distribuyéndola a otras partes del terreno.

E) Cambio de vegetación natural por vegetación de cultivo: cuando un suelo es virgen, toda su vegetación es incorporada nuevamente al suelo, pero en caso de que se elimine esa vegetación del terreno para cultivar, ésta última no regresa en su totalidad al suelo sino que es consumida por el hombre. Esta situación provoca una disminución del contenido de materia orgánica.

1.1.2. Métodos para la determinación de la materia orgánica en el suelo

Existen varios métodos para la determinación del contenido de materia orgánica en el suelo tales como el método de calcinación, el método de oxidación por peróxido de hidrogeno (agua oxigenada) y el método de Walkley-Black.

Según Burés (2004) el método de calcinación se determina por el contenido total de materia orgánica que posee el suelo completo o en alguna de sus fracciones. Debe tenerse presente que con este método se obtienen valores más altos en el contenido de materia orgánica del suelo, ya que con él se volatizan todas las formas de carbono orgánico (CO) presentes en la muestra.

Burés (2004) plantea que el método de oxidación por peróxido de hidrogeno (agua oxigenada) es recomendado para eliminar materia orgánica de muestras de suelos que están siendo sometidos a

análisis textural y que presentan dificultades para dispersar debido a que tienen un alto contenido de ella, también es útil si se quiere cuantificar el contenido de materia orgánica en un suelo en que el contenido de ella sea bajo. En esta determinación debe tenerse mucha precaución al hacer las adiciones del peróxido de hidrógeno ya que la reacción puede ser muy violenta y puede causarle quemaduras al operario, así como pérdida de material de la muestra, invalidándose la determinación.

El método de Walkley-Black está basado en la oxidación del carbono de la materia orgánica del abono orgánico por la acción del dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en solución sulfúrica. Es requisito indispensable, para obtener resultados confiables, que en la determinación se utilice exceso de solución de $K_2Cr_2O_7$ y que el ácido sulfúrico (H_2SO_4) sea concentrado. La oxidación del carbono es activada por el desprendimiento del calor que se produce al añadir el H_2SO_4 concentrado sobre la solución de $K_2Cr_2O_7$, lo cual debe ser aprovechado al máximo porque de ello depende la eficiencia de la reacción oxidación-reducción. Con este método se obtienen valores confiables y correlacionan bien con los obtenidos con otros procedimientos. Este método es de uso universal y es recomendado por la mayoría de los especialistas en el mundo (Adamchuk *et al.*, 2004).

Teniendo en cuenta los métodos analizados y tomando como ejemplo el de Walkley-Black, ya que el mismo es el más utilizado a nivel mundial y recomendados por la mayoría de los autores por su confiabilidad de los datos y por lo bien que correlacionan con otros procedimientos. Este método será comparado con una nueva técnica, espectroscopia VIS/NIR, que es capaz de realizar estos análisis con menos recursos, menos costos, más productividad, lo que permite analizar y tomar decisiones al momento en el manejo de los cultivos.

1.1.3. Contenido y forma del fósforo en el suelo

El fósforo se encuentra en los suelos tanto en formas orgánicas como inorgánicas. Entre el 50 y 80% del fósforo orgánico lo constituye el ácido fítico (Richardson, 1994). Las plantas absorben el fósforo casi exclusivamente en la forma soluble, representadas por aniones fosfatos, generalmente HPO_4^{-2} Y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$. Las concentraciones de estos aniones en solución se encuentran alrededor de 1 y 10 μM en equilibrio con la fase sólida del suelo. De esta manera, el fósforo inorgánico disuelto satisface la demanda de los cultivos por unas pocas horas durante el período de crecimiento (Richardson, 1994), considerando que estas cantidades son extremadamente pequeñas en comparación con las necesarias para los procesos biológicos asociados al crecimiento óptimo de las plantas.

Según Sánchez (2007) los suelos de las regiones tropicales contienen 0,02 – 0,38% de fósforo total. Para los suelos de la antigua URSS Avdonin (1982) reporta un contenido de P total que oscila entre 0,05-0,1%, localizándose las mayores acumulaciones en el horizonte superior; por su parte, Villegas (1983) informa que en Cuba el contenido de P total en los suelos Ferralíticos es como promedio de 0,38% y en los Sialíticos y Vertisuelos la media es de 0,13% de P.

A medida que el contenido de fósforo en la capa superficial del suelo se incrementa, la absorción relativa del fósforo proveniente del fertilizante disminuye. A contenidos altos de P en el suelo, la adición de fertilizante tiene poco efecto en la absorción de este elemento. Esto parece simple, pero la concentración de P en el suelo a la cual no hay respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfatados varía de suelo a suelo y de año en año; sin embargo, se puede decir, con cierta seguridad, que la probabilidad de respuesta a la aplicación de fertilizante fosfatado disminuye a medida que la concentración de fósforo en el suelo se incrementa. Las fluctuaciones en la liberación de fósforo de la materia orgánica pueden en parte ser responsables de esta variabilidad en la respuesta. La concentración de fósforo en el subsuelo puede incidir en la respuesta a la

aplicación de fósforo si existe suficiente desarrollo de las raíces en el suelo (Fixen, 1997; Fonseca *et al.*, 1997).

La longitud total y la distribución relativa de la parte aérea de la planta es probablemente uno de los factores más importantes en la determinación de la concentración de fósforo en el suelo necesario para rendimientos óptimos según Fixen (1994), así como de la respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfatados. Una planta con mayor cantidad de raíces en relación a la parte aérea, requiere de una concentración de P en el suelo considerablemente menor, para un óptimo crecimiento que cuando el crecimiento de las raíces es limitado. Los resultados de investigaciones y la práctica han demostrado que los contenidos de P total en los suelos no pueden ser empleados como un criterio único para predecir la efectividad de los fertilizantes fosfóricos.

1.1.4. El fósforo en las plantas

El fósforo es el segundo elemento (después del nitrógeno) más importante para el crecimiento de las plantas, la producción de los cultivos y su calidad; además, es uno de los elementos que más limita la producción agrícola en las sabanas (Lozano *et al.*, 2012).

La agricultura moderna depende del P derivado de roca fosfórica, la cual es un recurso no renovable y cuyas reservas mundiales actuales podrían agotarse en 50-100 años (Cordell *et al.*, 2009; Dawson y Hilton, 2011), por lo que aumentar aún más el uso de fertilizantes fosforados, en el contexto de una creciente demanda mundial de productos agrícolas, no parece una opción viable (Hinsinger, 2001). Un manejo agrícola sostenible debe ir encaminado a utilizar mejor las fuentes de P del suelo, ya sea a través de la selección de cultivares más eficientes o de la utilización de estrategias de manejo para optimizar su biodisponibilidad (Lambers *et al.*, 2006).

Las plantas absorben P en forma de iones fosfato (H_2PO_4 ó HPO_4^{2-}) (Murrel, 1998). Una vez dentro de la planta, el P inorgánico es almacenado en las raíces o se mueve rápidamente hacia

otras partes de la planta donde se incorpora en los compuestos orgánicos como enzimas, ácidos nucleicos y proteínas. Algunos de los procesos químicos en la planta que requieren P son: fotosíntesis, respiración, almacenaje y transporte de energía y crecimiento de la célula. El P juega también un papel importante en la transferencia de las características hereditarias de una generación a otra.

El fósforo ayuda a que las raíces y la plántula se desarrollen más rápidamente, mejora la eficiencia del uso del agua, mejora la resistencia a las enfermedades en algunos cultivos, acelera la maduración y es vital en la formación de la semilla, todos estos son factores importantes en el rendimiento y en la calidad del cultivo como han reportado (Ballard y W., 1966; Ardenson, 1995) citado por (Barroso, 1999).

1.1.5. El potasio en el suelo

Después del nitrógeno y el calcio, el potasio es el elemento absorbido en mayores cantidades por las plantas. El potasio del suelo puede perderse por lavado y por erosión. También puede ser fijado por los minerales arcillosos, quedando disponible lentamente. Las pérdidas por lavado dependen del clima y de la naturaleza del suelo. Los suelos con gran capacidad de cambio tienen menores pérdidas que los arenosos. Las funciones que desempeña en las plantas no están bien definidas, ya que no se ha encontrado formando parte de compuestos estructurales, pero se sabe que desempeña papel importante en el metabolismo de carbohidratos y proteínas, regula la transpiración y el contenido de agua de las células, es cofactor enzimático e interviene en la fotosíntesis. El contenido en la planta varía de 0,6 a 6%. En general suelos derivados de rocas básicas y suelos muy intemperizados son los que tienen menores contenidos (Roldán *et al.*, 2004).

Las cantidades de K encontradas van de 1 a 3% del cual entre el 90-98% forma parte de minerales primarios, de 1 a 10% se encuentra fijado entre las láminas de arcilla 2:1 y de 1 a 2%

corresponde a las formas intercambiables y solubles. La determinación del potasio del suelo, disponible para las cosechas, y de su velocidad de cesión, es fundamental para el cálculo de programas de fertilización (Roldán *et al.*, 2004).

1.2. Espectrofotómetros Vis/ NIR

La instrumentación VIS/NIR no es distintivamente diferente de cualquiera ultravioleta visible (UV) o espectroscopia infrarroja, según Kawata *et al.* (2002). Tradicionalmente, los instrumentos dispersivos, disponibles desde la década de 1940, se utilizaron para obtener espectros infrarrojos. Con la introducción de luz de fibra óptica en la década de 1980 y mediados de la década de 1990, VIS/NIR se convirtió en una herramienta más poderosa para la investigación científica. El rango de longitud de onda es uno de los componentes principales que afectan a la medición con precisión VIS/ NIR (Mouazen *et al.*, 2006).

El espectrofotómetro Vis/NIR está compuesto por una fuente, un detector, y un elemento dispersivo que permite la intensidad a longitudes de onda diferentes para ser grabados y luego procesados. Stuart (2004) plantea que Fourier-Transform espectrómetros infrarrojos utilizan un interferómetro que ha sido frecuentemente utilizado y han mejorado la adquisición de infrarrojos especialmente para espectros de longitudes de onda por encima de aproximadamente 1000 nm.

Según Forment y Hanselaer (2010) hay otros instrumentos VIS/NIR que son monocromadores individuales y espectrógrafos, que no son capaces de proporcionar una precisión satisfactoria debido al rechazo de la luz. Por lo tanto, se utilizan a menudo monocromadores dobles y el principal inconveniente de un sistema monocromador de doble análisis son la necesidades del movimiento sincronizado y el enfoque de exploración consume mucho tiempo, esto lo hace poco práctico en el lugar y en el campo de estudio.

1.2.1. Empleo de las técnicas espectroscópicas VIS/NIR

Mouazen *et al.* (2006) evaluó el desempeño de dos espectrofotómetros disponibles comercialmente con longitudes de onda diferentes (diodo array) con un rango de longitud de onda corta (SWR) de 300-1700 nm y una combinación de una matriz de diodos y escaneo monocromador con una longitud de onda completa (FWR) de 350-2500 nm] para medición de atributos del suelo seleccionados.

Dependiendo de la muestra, el espectro se puede medir ya sea en reflexión o transmisión. Los vendedores de equipos espectroscopia VIS/ NIR proporcionan una amplia variedad de línea y en línea de ondas de transmisión y reflexión difusa diseñados para la medición de líquidos y sólidos, que lo convierten en una técnica muy práctica para el análisis rápido y no destructivo. Como el agua es un absorbedor mucho más débil en el NIR que en el MIR y UV, espectroscopia NIR también se puede utilizar para la medición de soluciones acuosas en las cubetas de unos pocos milímetros (Chacón, 2014).

Kuang y Mouazen (2012) indican que hay un debate sobre el tamaño óptimo de la muestra para así poder construir modelos de calibración con la mayor exactitud posible. VIS/NIR es una técnica de medición prometedora disponible para brindar información rápida sobre propiedades físicas y químicas del suelo, incluyendo la humedad, carbono, nitrógeno, fósforo y calcio.

La mayoría de los trabajos sobre análisis espectrales para la cuantificación de las propiedades del suelo se ha centrado en espectroscopia VIS/NIR, un método analítico simple y no destructivo que se puede utilizar para predecir varias propiedades simultáneamente (Chang *et al.*, 2001; Viscarra *et al.*, 2006; Nduwamungu *et al.*, 2009; Stenberg *et al.*, 2010; Volkan *et al.*, 2010). El espectro recoge tanto la información química como la física lo que nos permite determinar el contenido de materia orgánica.

1.2.2. Principio de funcionamiento de la espectroscopia Vis/NIR

La espectroscopia VIS/NIR se basa en el envío de la luz en la longitud de onda con rango de 400 – 2500 nm sobre la muestra, y midiendo después la luz que proviene de la muestra a longitudes de onda diferentes. Esto cubre el visible (380 – 780 nm) del infrarrojo cercano 780 – 2500 nm región apoyándonos en la idea de Rehbein y Oehlenschlager (2009). La absorción de la luz en el rango de 700 – 2500 nm regiones principalmente por hidróxido (OH) y carbono orgánico (CH), por lo que es especialmente útil para la medición de las sustancias orgánicas. La aplicación de reflectancia en el infrarrojo visible y cercano VIS/NIR como un destructivo método de ensayo con las ventajas de repetitividad, el ahorro de tiempo y costo efectivo (Lv y Yang, 2011). Este método tiene el potencial de facilitar una rápida evaluación de los parámetros de fertilidad del suelo.

1.2.3. Espectroscopia VIS/NIR una técnica prometedora para el análisis del suelo in situ y on-line

Hoy en día existe la necesidad de determinar los parámetros de fertilidad del suelo por métodos más económicos y con una respuesta más rápida para agilizar los análisis químicos en laboratorios.

VIS/NIR ofrece una amplia variedad en línea y en la línea de transmisión y reflexión difusa de ondas diseñadas para la medición de líquidos y sólidos (Siesler *et al.*, 2002). Apoyando la idea anterior, Chang *et al.* (2001) plantea que esta técnica se utiliza ampliamente en la industria debido a su simplicidad, rapidez, y la necesidad de poco o ninguna preparación de la muestra. Por tanto, VIS/NIR está siendo considerado cada vez más como una posible alternativa para complementar o reemplazar los métodos en laboratorios químicos convencionales y se utilizarán para los análisis de suelo en sitio y en línea. El seguimiento en sitio ofrecería una mayor densidad de concentración de nutrientes del suelo, con la oportunidad de mediciones relativamente de

costos más bajos. Esto permitiría una asignación eficiente de la variabilidad de nutrientes para facilitar variables de tasas de aplicación de nutrientes.

La implementación de programas de manejo de nutrientes utilizando tecnologías de sensores potencialmente, promueve el cuidado del medio ambiente, manteniendo la productividad de los cultivos y la rentabilidad. Por lo tanto permite avances significativos en el área de alimento de producción con la aplicación de insumos agrícolas, como fertilizantes, semillas, plaguicidas, entre otros, en tasa variable dentro de un campo, de acuerdo con los requisitos o potencial productivo de varios sectores homogéneos (Chacón, 2014).

La información de la muestra en la región del infrarrojo cercano se recoge generalmente como un espectro de absorción a través de medidas de transmisión o las mediciones de reflectancia difusa con un espectrofotómetro VIS/NIR. Los métodos de reflectancia se pueden dividir en dos categorías: medidas internas de reflectancia en contacto con la muestra y las medidas externas de reflectancia que implican un haz de luz reflejado directamente desde la superficie de la muestra (Stuart, 2004).

Por ejemplo, Volkan *et al.* (2010) reveló que la reflectancia del suelo disminuye con el aumento de la materia orgánica del suelo y (Viscarra, 2008) mostro sus resultados con mediciones indirectas de carbono orgánico del suelo (CO) y el contenido de hierro (Fe), utilizando el color del suelo. Los colores negros y oscuros absorben más luz que los colores claros o blancos. En estos suelos, oscuros tienden a ser más cálido que los suelos ligeros de color cuando el sol brilla o cuando la atmósfera está caliente y el suelo es capaz de absorber energía de el (Akinrinde, 2006). En VIS/NIR las mediciones de reflexión difusa o dispersión de la luz en la muestra son más comúnmente detectadas. En ambos casos, la superficie de la muestra es iluminada y la luz dispersada está en la muestra o en un amplio rango de ángulos, de modo que la introducción de toda la luz en el espectrofotómetro es difícil (Kawata *et al.*, 2002).

Una de las ventajas de la tecnología VIS/NIR no sólo es evaluar las estructuras químicas a través del análisis de los enlaces moleculares en el espectro VIS/NIR, sino también para construir una característica espectro que representa la huella dactilar de la muestra (Cozzolino y Murray, 2004). Espectroscopía NIR se puede aplicar a diversos tipos de materiales, materiales a granel, fino o grueso polímeros, las tabletas, los cuerpos humanos, y así sucesivamente. Es particularmente poderosa en lo no-invasivo, y no destructivo, (Ozaki, 2012).

1.2.4. Métodos estadísticos empleados en las mediciones

La Quimiometría es la disciplina que utiliza métodos matemáticos y estadísticos para la selección de los procedimientos experimentales óptimos y los tratamientos apropiados de los datos en los análisis químicos e incluye tres grupos principales de técnicas compiladas como (I) (pre-tratamiento), donde la reflectancia espectroscópico es pre-procesada (Nduwamungu *et al.*, 2009), (II) métodos de clasificación, son las muestras del grupo de acuerdo con su espectro y (III) métodos de regresión, para relacionar el espectro con algunas propiedades cuantificables de las muestras.

Un espectro NIR se obtiene generalmente mediante el paso de radiación infrarroja a través de una muestra y determina qué fracción de la radiación incidente es absorbida en una banda de frecuencias determina (Stuart, 2004). Estos están dominados por los tonos débiles y combinaciones de CHNH, y los enlaces OH para que las bandas de vibraciones fundamentales estén situados en la mitad de la región infrarroja. Estas características espectrales divergentes pueden esperarse que tenga una influencia en la capacidad de obtener información cuantitativa de los datos espectrales. Por lo tanto los avanzados métodos estadísticos multivariados son necesarios para capturar la relación entre variación espectral y la variación en los componentes y/o propiedades de interés.

En los espectros de tratamiento previo se utilizan técnicas para eliminar cualquier información irrelevante que no puede ser manejada adecuadamente por las técnicas de modelado (Schirrmann y Domsch, 2011). Por lo tanto, las funciones matemáticas, tiene que ser usadas para manipular o eliminar tales interferencias de las señales espectrales primas.

El tratamiento previo más comúnmente usado para las técnicas VIS/NIR en el suelo son $\log(1/R)$, los derivados, suavizado, la corrección multiplicativa de dispersión (MSC), normalización, la variante normal estándar (SNV) y Media Center. Las transformaciones más utilizadas lineales incluyen $\log(1/R)$, que comúnmente se denomina absorbancia, donde R es la reflectancia relativa. Si una matriz absorbe a las mismas longitudes de onda del análisis, $\log(1/R)$, sea una mejor opción para la reflectancia en relación a la concentración. Esta transformación es básicamente muy adecuada para espectros NIR de reflectancia difusa de las mezclas con absorción de matrices. Los gráficos de R frente a la concentración suelen ser menos lineal que las parcelas de $\log(1/R)$ frente a la concentración (Ulmschneider y Roggo, 2008).

Los derivados se calculan generalmente de acuerdo con el algoritmo de Savitzky-Golay y típicamente sólo la primera y segunda derivada se utiliza. La primera derivada se utiliza a menudo para eliminar tales cambios y picos superpuestos y segundo derivado puede corregir localmente los efectos aditivos y efectos multiplicativos (Naes *et al.*, 2002).

Con el fin de evitar algunos ruidos suavizados se ha de incorporar espectros derivados en el cálculo de la derivada. Por lo tanto, mediante la aplicación suavizada, es posible reducir el ruido aleatorio en la señal instrumental y mantener variación útil (Nduwamungu *et al.*, 2009).

Las técnicas de calibración multivalente también realizan alguna acción suavizante y por lo tanto el valor añadido de suavizado espectral, en términos de predicción de rendimiento, es generalmente muy limitado. La Corrección Esparcida Multiplicativa (MSC) es un método de corrección de dispersión, donde se calcula la dispersión de la luz para cada muestra de espectro

con respecto a un espectro de referencia, que es típicamente el espectro medio. Cada espectro se corrige entonces de tal manera que todas las muestras parecen tener el mismo nivel de dispersión como el espectro de referencia.

El Signo Ortogonal de Corrección (OSC) es un tratamiento espectral que permite que la porción de información espectral ortogonal a cambios en las concentraciones del analito, deba ser eliminada. OSC no elimina de forma efectiva la información correlacionada con el parámetro objetivo, lo que disminuye sustancialmente el número de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS) y los componentes necesarios para construir modelos de calibración. Esto, sin embargo, no hace aumentar la capacidad predictiva porque no toda la variabilidad no correlacionada con la concentración del analito diana es ortogonal a la misma Orthogonalización de Proyección Externa (EPO), trata del caso donde el parámetro externo no se puede medir en línea. Los espectros pre-procesados por la proyección en la ortogonal al espacio le ocurren alteraciones inducidas por parámetros externos (Chacón, 2014).

La normalización se usa típicamente para obtener todos los datos en aproximadamente la misma escala, o para obtener una distribución más uniforme de las varianzas y los valores medios. Además puede clasificar al máximo, la media y la normalización del rango (Barnes *et al.*, 1989).

La normalización máxima es un proceso alternativo que divide cada reflectancia por el valor absoluto de la reflectancia máxima disponible en cada fila de la matriz del espectro. El valor máximo se convierte en 1 y el valor mínimo se convierte en -1. La normalización media consiste en dividir cada fila de una matriz de espectro por su promedio, neutralizando así la influencia del factor oculto. Por último, en la normalización de rango, cada fila se divide por su rango, el rango es el valor máximo menos el valor mínimo (Cox, 2008).

La Variante Normal Standard (SNV) elimina la variación de la pendiente a partir de espectros, causados por la dispersión y variación de tamaño de partícula (Barnes *et al.*, 1989). La

transformación se aplica a cada espectro individual restando el espectro de la media y la ampliación de la desviación típica del espectro (Jorgensen, 2000).

Los métodos de regresión incluyen la regresión de componentes principales PCR (Componente Principal de Regresión), que utiliza los análisis de componentes principales PCA (Análisis Principales de Componentes) para proyectar las variables originales en un número menor o combinaciones lineales ortogonales (componentes principales) antes de la estimación de la regresión coeficientes. Esto se hace para evitar los problemas de colinealidad múltiples que se derivan de tener un gran número de variables de longitud de onda altamente correlacionada. PLS (Mínimos Cuadrados Parciales) de regresión se aplica a una proyección similar a combinaciones lineales ortogonales, pero busca las combinaciones lineales (variables latentes) que explican la covarianza máxima entre los espectros y el componente de interés, en lugar de buscar los que explican la varianza máxima en el espectros, como PCA lo hace. Así, que PCR, PLS equilibra los dos objetivos de respuesta explicando la variación de predicción (Viscarra *et al.*, 2006).

PLS es el método estadístico multivariante en la calibración de reflectancia del suelo más comúnmente usado en los parámetros individuales del suelo (Volkan *et al.*, 2010). En este sentido (Viscarra *et al.*, 2006) informó, que la solidez de los modelos PLS y sus predicciones puede mejorarse aún más mediante la combinación de la aplicación de PLS con agregación de arranque o "bolsa", que tiene como objetivo reducir la varianza de las predicciones mediante la agregación de un número de modelos obtenidos en el curso de un nuevo muestreo.

También se puede utilizar reformulaciones al Apoyo Vector de Máquina (SVM) estándar, como Mínimos Cuadrados Máquinas de Vectores Soporte (LS-SVM) (Suykens, 2002; Kovačević *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2010; Prasad, 2011).

Donigian (2002) considera la calibración y validación de modelos como los pasos necesarios y críticos en cualquier aplicación del modelo. La calibración es un procedimiento interactivo de

evaluación de parámetros y refinamiento, como resultado de la comparación de los valores simulados y observados de interés. La validación del modelo es en realidad una extensión del proceso de calibración. Su propósito es asegurar que el modelo calibrado evalúe correctamente todas las variables y condiciones que pueden afectar los resultados del modelo, además demostrar la capacidad de predecir las observaciones de campo separadas del esfuerzo de calibración.

Modelo de rendimiento y calibración / validación se evalúan a través de medidas cualitativa y cuantitativa, que implican ambas comparaciones gráficas y pruebas estadísticas. De ahí que el desempeño del modelo es a menudo basado principalmente en las presentaciones visuales y gráficos. Varias estadísticas se pueden utilizar para cuantificar la capacidad predictiva de los modelos de calibración. El coeficiente de determinación R^2 mide la proporción de la variación total en el Y-variable explicada por el modelo. En la Media del Error Cuadrado de la Raíz (RMSE) que es el error estándar absoluto en las predicciones que pueden ser calculados para las muestras de calibración La Media del Error Cuadrado de la Raíz de Calibración (RMSEC) o el conjunto de prueba de predicción La Media del Error Cuadrado de la Raíz de Predicción (RMSEP) (Donigian, 2002).

1.2.5. Estudios de suelo empleando el VIS-NIR

Arrieche *et al.* (2010) comparan dos métodos (M1 y M2) para la determinación de materia orgánica de los suelos (MO), en laboratorios de suelos de seis instituciones: UCV-Agronomía, INIA-Yaracuy, CIESA-UNERG, EDAFOFINCA, INIA-Guárico y AGRI de Venezuela, con la finalidad de unificar criterios y bajar la dispersión en los resultados analíticos de la MO entre laboratorios. Los métodos están basados en la digestión húmeda con ácido sulfúrico y dicromato de potasio, y cuantificados por espectrofotometría UV-Visible. Las diferencias fundamentales entre métodos, fueron el peso de muestra 0,1 g y 0,5 g; longitud de onda de 650 y 590 nm; y tiempo de reacción de 3 y 24 horas para M2 y M1 respectivamente. Se utilizaron dos muestras

controles con niveles de MO bajo y alto. El análisis estadístico arrojó mayor variabilidad en M2, y mayor precisión en M1, por lo que se recomienda adoptar este último método en los laboratorios de suelos con fines de fertilidad.

Según Chacón (2014) en estudios realizados en la provincia de Villa Clara con la técnica VIS/NIR, los resultados indicaron que existe una variabilidad espacial significativa de todos los parámetros de fertilidad de suelos estudiados, tanto en el contexto de los suelos de diferentes campos, como dentro de un campo específico, sin embargo el contenido de materia orgánica mostró menor variabilidad que los contenidos de fósforo y potasio. Además, todos los modelos de regresión (PLS, LWR y SVM) mostraron buenas correlaciones entre el espectro de suelo y la materia orgánica. Donde las mejores precisiones se obtuvieron con los modelos de regresión no lineales y en la predicción de los parámetros de fertilidad de suelo Cambisol en el contexto de la provincia, los mejores resultados fueron obtenidos en la materia orgánica, ($0,90 \leq R \leq 0,93$; $0,12 \leq RMSEP \leq 0,14$), seguido por el potasio ($0,76 \leq R \leq 0,78$; $3,49 \leq RMSEP \leq 3,67$), fósforo Olsen ($0,69 \leq R \leq 0,81$; $0,27 \leq RMSEP \leq 0,35$) y fósforo Oniani ($0,64 \leq R \leq 0,65$; $3,54 \leq RMSEP \leq 3,61$). En este mismo contexto los resultados obtenidos en Vertisol para la materia orgánica ($0,81 \leq R \leq 0,87$; $0,16 \leq RMSEP \leq 0,22$), para el potasio ($0,83 \leq R \leq 0,87$; $2,17 \leq RMSEP \leq 2,40$), fósforo Olsen ($0,76 \leq R \leq 0,80$; $0,55 \leq RMSEP \leq 0,67$) y fósforo Oniani ($0,74 \leq R \leq 0,81$; $2,86 \leq RMSEP \leq 3,10$). En la predicción de los parámetros de fertilidad de suelo Cambisol dentro de un campo específico mostró altas correlaciones entre el espectro de suelo y la materia orgánica ($0,89 \leq R \leq 0,92$; $0,14 \leq RMSEP \leq 0,17$).

Según la bibliografía leída y el análisis de estos estudios, estoy de acuerdo con Ahmed 2013 donde se puede determinar el contenido de materia orgánica, fósforo y potasio en suelos pardos mullidos medianamente lavados por técnicas espectroscópicas ya que todos los modelos de

regresión (PLS, LWR y SVM) mostraron buenas correlaciones entre el espectro de suelo de la materia orgánica fósforo y potasio.

Materiales y métodos



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio y toma de muestras del suelo analizado

Las muestras de suelo pardo con carbonatos se colectaron en un área de la universidad Central Marta Abreu de las Villas ubicada a 22°,26' y 13,20" latitud norte y 79°,54' y 23" longitud oeste, en la municipio de Santa Clara provincia de Villa Clara en la carretera de Camajuani km 5½. Este suelo es de perfil A (B) C, de evolución sialítica en un medio rico en carbonato de calcio, donde existe un predominio de minerales arcillosos del tipo 2:1, principalmente en montmorillonita.

Para el estudio de este suelo se tuvieron que coleccionar 121 muestras de suelo en 1 ha por el método de la grilla. Para tener una mayor representatividad del campo, y así lograr un mapa de la fertilidad de la materia orgánica, P y K lo más preciso posible para la hora de fertilizar el campo. Se cuadrículó el terreno utilizando cordeles y estacas de madera, para poder extraer de forma uniforme las 121 muestras de suelo. Estas fueron extraídas con un pico, a una profundidad de 20 cm (ver Figura 1), ya que, a esta profundidad se encuentra la mayor concentración de materia orgánica, P y K en el suelo, necesaria para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Todo este suelo fue embazado en bolsas de nylon con una capacidad de 1 kg, después se trasladaron hacia el local donde se pusieron a secar al aire libre y lograr un secado total de todas las muestras. Secadas las mismas se trasladaron hacia el Centro de Investigación Agrícola (CIAP) donde fue molino y tamizado a 0,5 mm para dejar el suelo en óptimas condiciones para realizar los análisis químicos convencionales.



Figura 1. Extracción de las muestras a una profundidad de 20 cm con un pico

Las muestras de suelo recogidas se analizaron para obtener el contenido de materia orgánica, P y K presente en el suelo. Los análisis químicos se realizaron en los laboratorios de química analítica en el CIAP, perteneciente a la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

2.1. Análisis químico de las propiedades de suelo por métodos convencionales

Para el análisis de la materia orgánica por el método de Walkley-Black lo primero que se hace es pesar 1 g de suelo seco previamente pasado por un tamiz de 0,5 mm y se hecha en erlenmeyer de 500 ml, a esto luego se le añade 20ml de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) uno normal y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) para que se produzca la oxidación de la materia orgánica, después se debe dejar en reposo durante 30min para dar tiempo a que se produzca la reacción entre el dicromato y el ácido sulfúrico, en todo ese tiempo las muestras están dentro de la campana que no es más que la encargada de recoger los gases tóxicos que desprenden las muestras. Pasado los 30 mn se le añaden a cada muestra 200 ml de agua destilada y se deja en reposo otra vez durante 1 hora, luego se filtra a través de un papel de filtro y se le realiza la lectura en un equipo llamado fotocolorímetro con una longitud de onda de 6,50 nm, ya obtenida la lectura de cada una de las muestras en transmitancia se busca en una tabla que fue confeccionada

mediante una curva que se hace previamente para conocer las diferentes concentraciones; este resultado se da en %.

2.2. Metodología empleada para la realización de los análisis químicos del fósforo y el potasio

En ambos casos se determinó P_2O_5 y K_2O por el método de Oniani. Solución extractiva de ácido sulfúrico (0,1 N). El P_2O_5 se determinó colorimétricamente y el K_2O por fotometría de llama.

2.3. Metodología empleada en el Espectrofotómetro VIS- NIR

Para el análisis de las muestras de suelo en el laboratorio, se configura los espectros VIS/NIR de reflectancia, este es ilustrado en la (Figura 2). Se compone de un espectrofotómetro de red de diodos (corona plus distancia VIS/NIR Zeiss, Jena, Alemania) y un OMK500-H cabezal de medición conectado a un haz de fibra óptica.

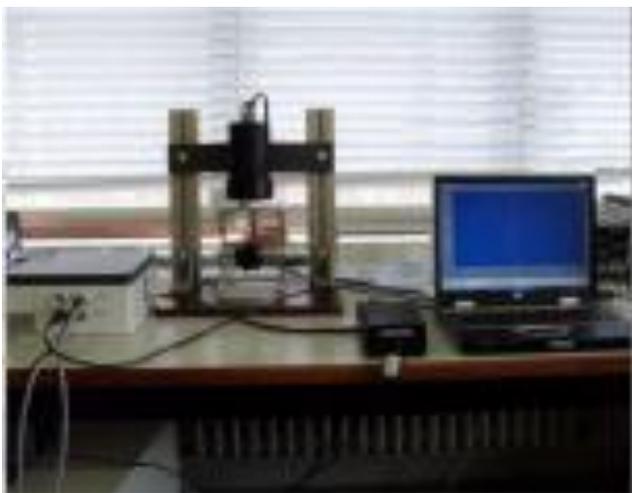


Figura 2. Espectrofotómetro de red de diodos, a la izquierda se encuentra la corona plus distancia VIS/ NIR Zeiss, Jena, Alemania y en el centro está el cabezal de medición conectado a un haz de fibra óptica OMK500-H y a la derecha la PC.

La cabeza de medición 500-H OMK (Figura 3) ha sido diseñado para la medición de dispersión densa y para muestras relativamente heterogéneas en el modo de reflectancia difusa. Es

especialmente adecuado para muestras on-line, la medición de la reflectancia difusa con variación continua y una distancia entre la cabeza de medición y la superficie de la muestra.

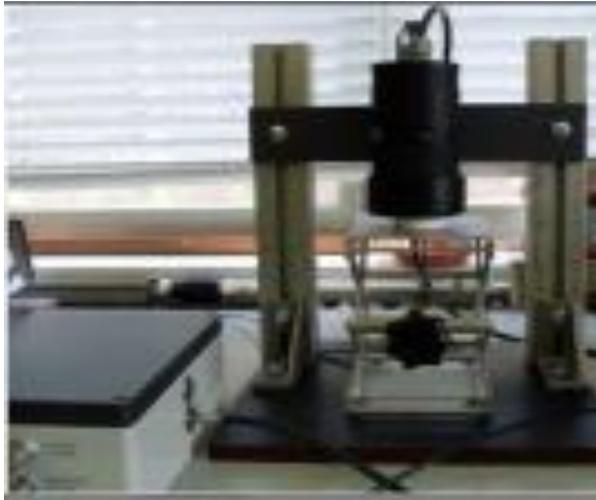


Figura 3. Cabezal de medición OMK500-H

Las especificaciones del OMK 500-H-NIR cabezal de la medición se resumen en la Tabla 1. Contiene una lámpara halógena de 10W, alimentado por una fuente de alimentación de 5V a través de un cable eléctrico. Un sistema proporciona iluminación óptica de la muestra a 0° en un haz casi paralelo. En el cabezal de medición del color, 15 fibras ópticas individuales están dispuestas de manera uniforme en un anillo de observación de la muestra a 45° .

Tabla 1. Los datos técnicos del OMK 500-H-NIR cabezal de la medición.

OMK 500 cabezal de medición	Propiedades
Componentes	
Rango espectral	270 ... 1701,9nm
Tiempo de medición de la muestra	< 2 s
rango de la medida	378,87-1701,9nm
% de ruido	$\Delta R < 0,04 \% R$
Sensibilidad variante a la distancia	$X \pm 1 \text{ mm } dR < 0,2 \%$
Tiempo de la integración para la desviación de la balanza llena	< 100 ms
fuelle ligera	lámpara de halógeno 5 V, 10 W, estabilizada
vida de lámpara	aprox. 3 000 horas
conector de fibra	2x Zeiss-conector
Vista geométrica	15 x 24° circular bajo 45°
ángulo iluminando	0°
tamaño de la mancha	aprox. 20 mm
La longitud de fibra óptica	1 m ... 10 m
peso	1,3 kg
Dimensiones	100 mm x 100 mm x 197 mm (Lx A x H)
Protección del acercamiento	IP 55

Las fibras se encuentran agrupadas por una guía de luz que está conectado al espectrofotómetro.

Además la conexión de guía de luz para el canal de medición se encuentra en la parte frontal del

instrumento. El ordenador (PC) está conectada al espectrofotómetro a través de un Ethernet interfaz. La configuración mínima se determina por el software utilizado (Aspect-plus suministrada por Carl Zeiss Jena). No hay operaciones en que se requiera de otro dispositivo, ya que el control se maneja a través del software, en la PC. Varios paquetes de software están disponibles para este sistema de medición.

2.4. Proceso de obtención de los datos espectrales

El VIS / NIR de reflectancia espectral fueron adquiridos en el laboratorio para todas las muestras tomadas en el terreno pardo con carbonato, recogidas en el campo 1 c de las Antillas. Todos los espectros se obtuvieron utilizando los mismos ajustes del instrumento: medida en el modo de reflexión, longitud de onda 378,87-1701,9 nm. Los tiempos de integración fueron: para el Vis (143,5 nm) y los NIR (200 nm). Una pequeña cantidad de la muestra de suelo (aproximadamente 12 g) se colocó en una placa de Petri de 10 mm de profundidad y 35 mm de diámetro. El suelo en la placa de Petri se pulsa primero y luego se estabilizó cuidadosamente para obtener una superficie lisa para reducir la variación debida a la empaquetadura del suelo. Cada placa de Petri con 12 g de la muestra de suelo se coloca debajo del sensor en el centro del punto de coordinación. Luego se tomaron tres espectros de reflectancia sobre la zona central de la placa de Petri, a una rotación de la muestra de aproximadamente 120° entre las adquisiciones espectrales posteriores. Los tres espectros de cada muestra de suelo se promediaron para obtener un espectro promedio por muestra. Cada espectro se guarda como archivos individuales (.Csv) y, a continuación fueron transportados para el Excel.

2.5. Procesamiento estadístico de las muestras

Se utilizó el software MATLAB 7.9 (R2009b), el cual es una herramienta integral de análisis de datos para Estadística Exploratoria, Análisis Multivariado, Clasificación, Predicción y Diseño de Experimentos.

Se partió del análisis de la distribución de frecuencia y de correlación de los datos correspondientes a las propiedades MO, K₂O y P₂O₅ y sus respectivos estadígrafos descriptivos.

Se aplicaron técnicas quimiométricas con el empleo del modelo regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para la calibración y validación VIS/NIR.

Como método de pre-procesamiento se utilizó la corrección de señal multiplicativa (MSC), 1ra derivada de Savitzky-Golay, suavizado medio, centrado medio.

Resultados y discusión



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis químico de las propiedades de suelo por métodos convencionales

Los estadísticos descriptivos de las propiedades químicas de suelo, obtenidos del procesamiento de los datos, analizados mediante métodos convencionales, a partir de las muestras tomadas de las áreas muestreadas para la calibración y validación, se muestran en la tabla 2 y 3 respectivamente.

Tabla 2 Estadísticos descriptivos de las concentraciones de las propiedades químicas de las muestras de suelo para la calibración.

Propiedad química	Media	Min ^a	Max ^b	DE ^c	Clasificación
MO	1,69	0,57	3,78	0,78	Bajo
P ₂ O ₅	8,01	1,71	22,32	5,07	Mediano
K ₂ O	24,26	11,66	48,42	8,18	Muy alto

MO en %; K₂O en mg K₂O 100 g⁻¹ s.s, P₂O₅ en mg P₂O₅100 g⁻¹ s.s

^a Min- mínimo valor observado ^b Max- máximo valor observado;

^c DE- desviación estándar en los datos de referencia.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de las propiedades químicas de las muestras de suelo para la validación.

Propiedad química	Media	Min ^a	Max ^b	DE ^c	Clasificación
MO	1,53	0,57	3,51	0,67	Bajo
P ₂ O ₅	15,35	7,63	21,75	3,46	Muy alto
K ₂ O	21,14	10	52,63	6,91	Muy alto

MO en %; K₂O en mg K₂O 100 g⁻¹ s.s, P₂O₅ en mg P₂O₅100 g⁻¹ s.s

^a Min- mínimo valor observado ^b Max- máximo valor observado;

^c DE- desviación estándar en los datos de referencia.

En ambos casos los valores de MO se clasifican como bajos, y los de K₂O como muy altos, mientras que los de P₂O₅ fueron medianos en el área de calibración y muy altos en la de validación.

El bajo contenido de materia orgánica podría estar influenciado por los efectos de las prácticas agrícolas, precipitaciones y los vientos que azotan los suelos cuando estos no son sembrados después de la preparación de la parcela quedando prácticamente al interperie por un periodo prolongado. Este último factor se ha podido apreciar en esta área.

Al respecto, la cantidad de MO presente en estos campos agrícolas es el resultado de la incorporación o la pérdida de MO a través de la descomposición. Un equilibrio positivo de MO es difícil de lograr, esto significa que si se pierden grandes cantidades de MO, resulta difícil restaurar su nivel en el suelo. Incluso en condiciones favorables y con un buen manejo de los cultivos, esto puede tomar varias décadas.

3.2. Distribución de frecuencia de los parámetros de fertilidad del suelo dentro de un campo

Los histogramas de las propiedades químicas de las muestras de suelo tomadas en el campo muestreado para la calibración se ilustran en la Figura 4. En todos los casos se obtuvo un histograma sesgado o asimétrico positivo dado que la cola de la curva imaginaria en forma de campana que describe a ambos lados del máximo central es más larga hacia la derecha.

La distribución de frecuencia de la MO mostró un máximo de 28 muestras en el intervalo de 0,89 – 1,22%, lo que representa el 31,8% del total. El coeficiente de asimetría fue de 1,02, mientras que el coeficiente de curtosis fue de (0,03).

Por otra parte, la distribución de frecuencia de P_2O_5 mostró un máximo de 20 muestras en el intervalo de 3,75 – 5,8 mg P_2O_5 100 g⁻¹ s.s, lo que representa el 22,7 % del total. El coeficiente de asimetría fue de 1,07, mientras que el coeficiente de curtosis fue de (0,39).

Finalmente la distribución de frecuencia de K_2O mostró un máximo de 24 muestras en el intervalo de 19 – 22,7 mg de K_2O 100 g^{-1} s.s, lo que representa el 27,3% del total. El coeficiente de asimetría fue de 0,91, mientras que el coeficiente de curtosis fue de (0,74).

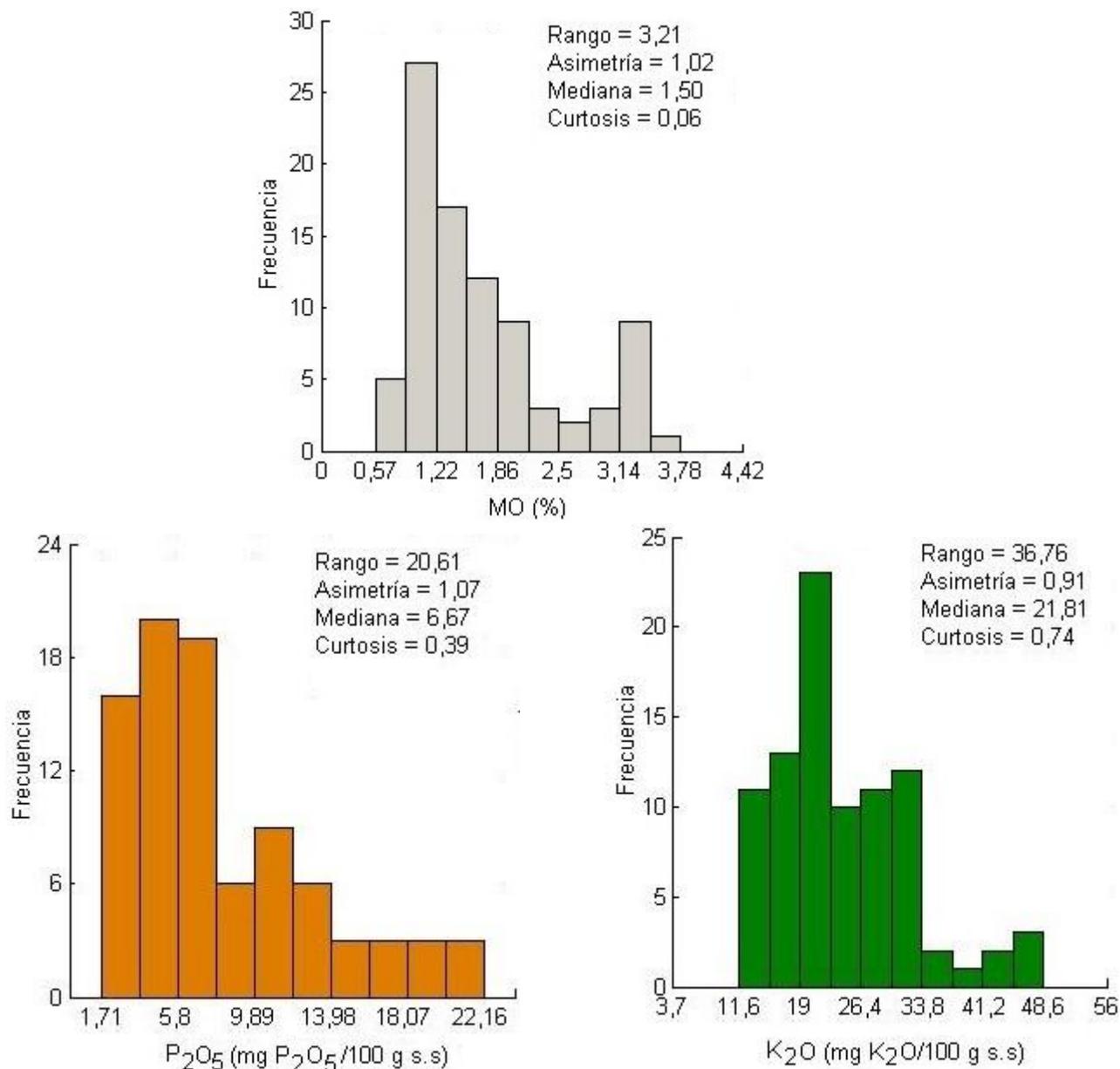


Figura 4. Distribución de la frecuencia absoluta de las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la calibración.

Los histogramas de las propiedades químicas de las muestras de suelo tomadas en el campo muestreado para la validación se ilustran en la Figura 5. En todos los casos se obtuvo más de un máximo diferenciado.

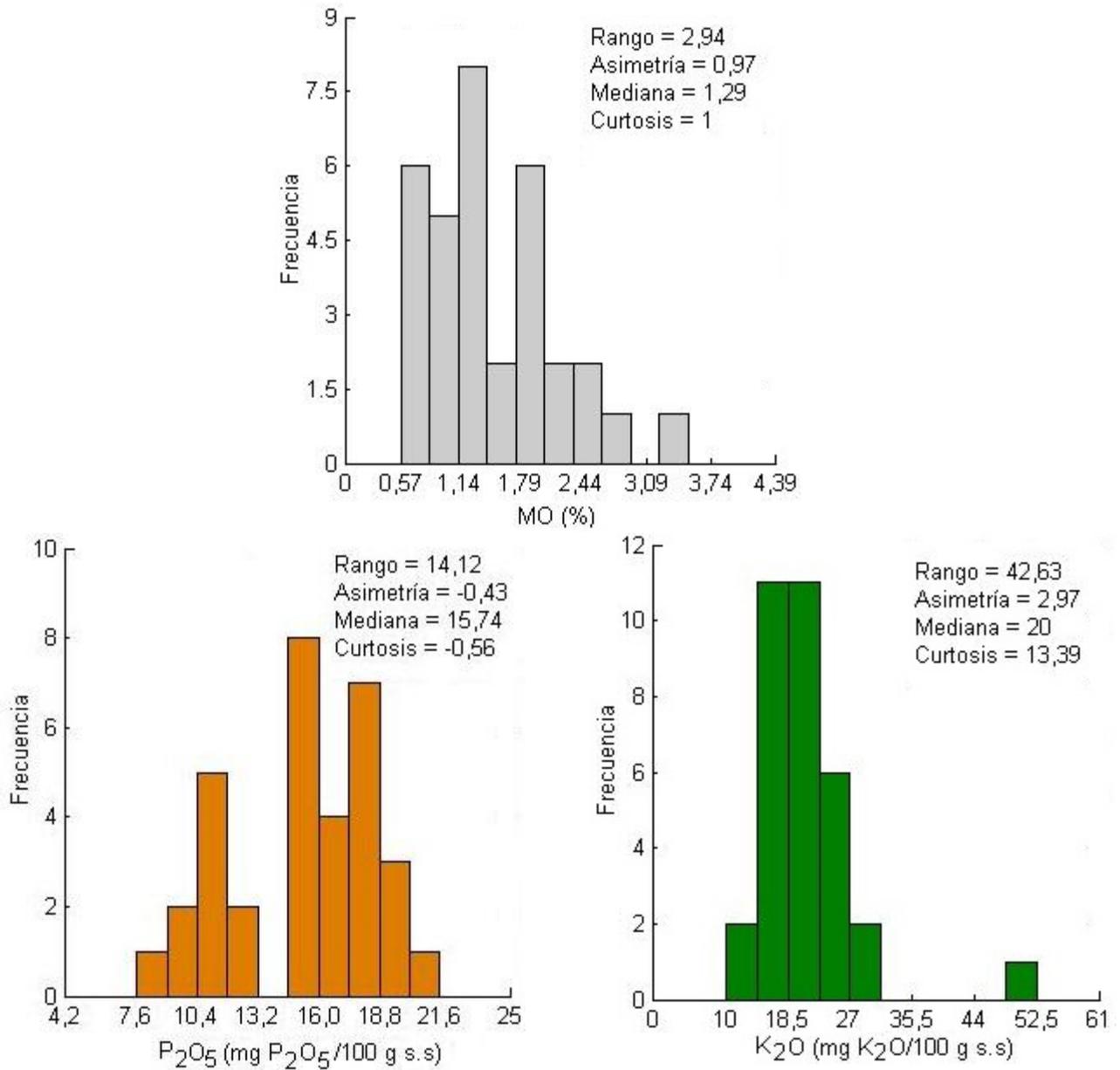


Figura 5. Distribución de la frecuencia absoluta de las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la validación.

3.3. Correlación entre las propiedades químicas del suelo

En el campo muestreado para la calibración se observaron correlaciones positivas entre todas las propiedades químicas de suelo. La MO mostró correlaciones significativas a diferentes niveles (Pearson), con las propiedades P_2O_5 y K_2O , con coeficientes de 0,37 y 0,27 respectivamente. Otro aspecto significativo fue que el mayor coeficiente de correlación (0,63) correspondió a K_2O cuando se correlacionó con P_2O_5 (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlación entre las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la calibración.

	MO	P_2O_5	K_2O
MO	1,00	0,37**	0,27*
P_2O_5		1,00	0,63***
K_2O			1,00

*Nivel de significación de Pearson: $*0,05 > P > 0,01$; $**0,01 > P > 0,001$; $***P < 0,001$.

Por otra parte, en el campo muestreado para la validación se observaron diferencias con respecto al de calibración, dado que la MO presentó una correlación negativa y no significativa con respecto al P_2O_5 con un coeficiente de -0.24.

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la calibración.

	MO	P_2O_5	K_2O
MO	1,00	-0,24	0,11
P_2O_5		1,00	0,35*
K_2O			1,00

*Nivel de significación de Pearson: $*0,05 > P > 0,01$; $**0,01 > P > 0,001$; $***P < 0,001$.

De igual forma con respecto a K_2O la correlación tampoco fue significativa. Sin embargo entre P_2O_5 y K_2O se observó la correlación más alta y significativa al igual que en el campo de calibración con un coeficiente de 0,35 (Tabla 5).

Los resultados anteriores están en correspondencia con lo reportado por Whitbread (1995) respecto a que generalmente se acepta que la MO tiene efectos beneficiosos en las propiedades químicas del suelo y a su vez influye sobre la capacidad productiva del suelo. Además la MO es un contribuyente mayor del fósforo así como de otros nutrientes necesarios para las plantas.

3.4. Variabilidad espacial y correlación entre las propiedades químicas del suelo

En el campo muestreado para la calibración los mayores coeficientes de variación (CV) se observaron en K_2O (49,64%), seguido por la MO (39,61%) y P_2O_5 (31,22%). En base a la escala de clasificación utilizada en esta investigación todas las propiedades mostraron una variabilidad espacial moderada ($25 < CV < 50\%$). No obstante, los % de variabilidad resultan elevados lo que proporciona la oportunidad de proponer estrategias de manejo de fertilización por sitio-específico para reducir las diferencias en cuanto al nivel de las diferentes propiedades dentro del área agrícola seleccionada (Figura 6). A diferencia de lo anterior, en el campo muestreado para la validación (Figura 7) los mayores CV correspondieron a la MO (44,02%), seguida por K_2O (32,70%). Al respecto, ambas propiedades mostraron una variabilidad espacial moderada ($25 < CV < 50\%$). Sin embargo, P_2O_5 tuvo el menor CV (22,57%), lo cual implica que esta propiedad tuvo una baja variabilidad dentro del $CV < 25\%$.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Corwin *et al.* (2003), respecto a que la variabilidad espacial influye sobre el tamaño y número de muestras de suelo necesarias para la caracterización de las propiedades químicas de suelo dentro de una área de interés agrícola.

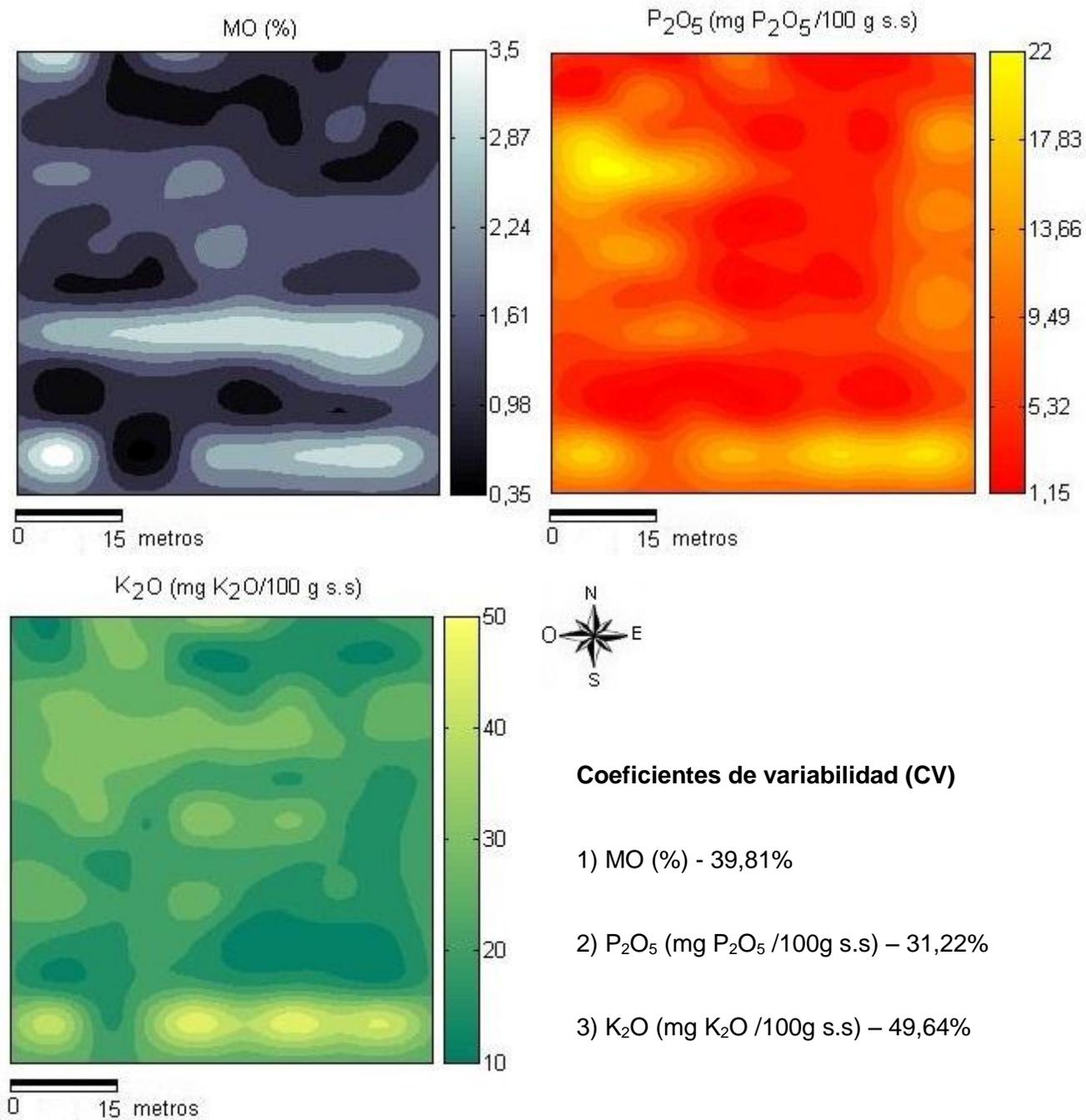


Figura 6. Mapas de variabilidad espacial de las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la calibración.

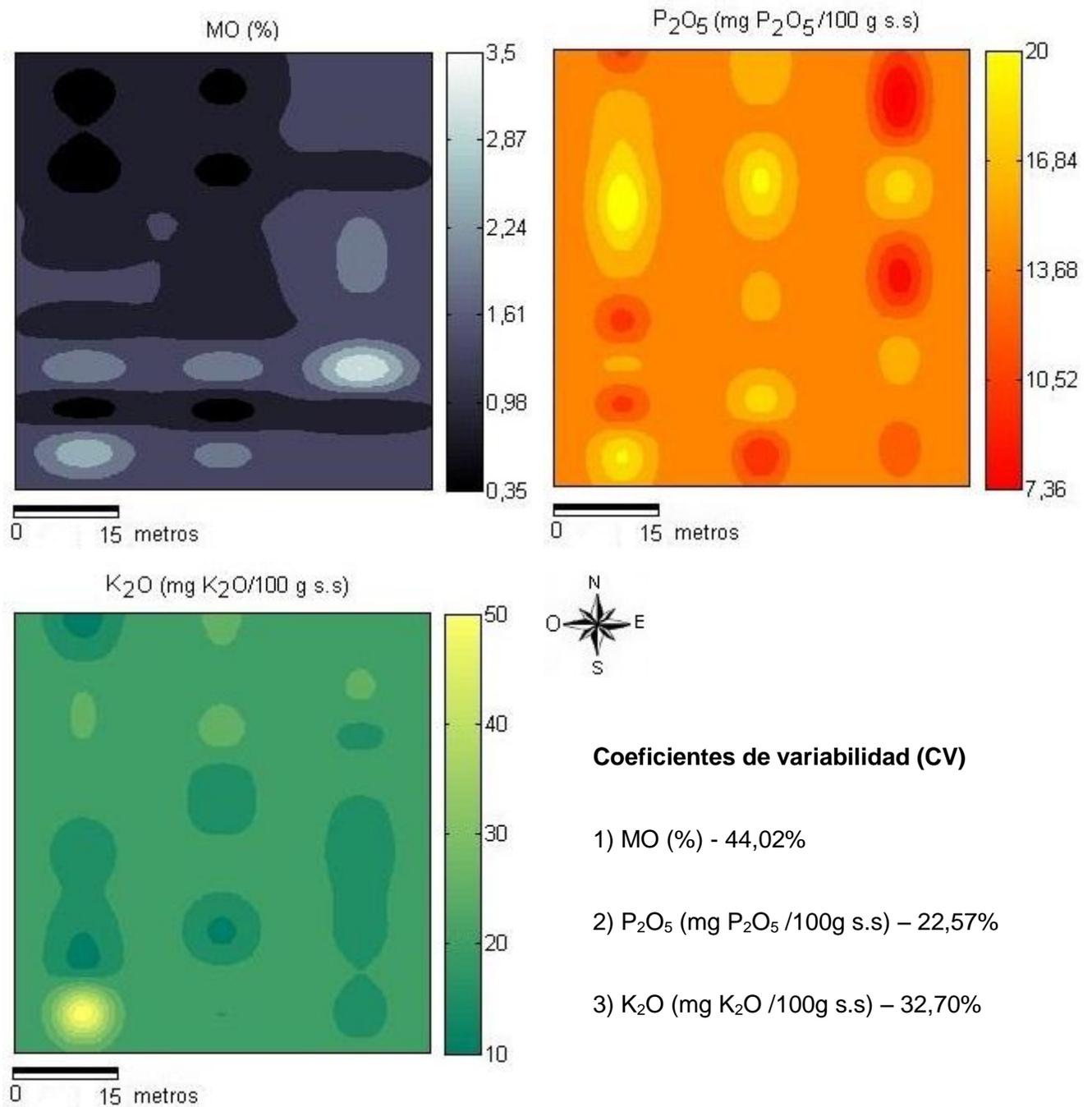


Figura 7. Mapas de variabilidad espacial de las propiedades químicas de suelo en el campo muestreado para la validación.

En correspondencia con lo anterior García (2002) plantea que desde el punto de vista del manejo de la fertilidad de suelos y nutrición de cultivos, la agricultura de precisión ofrece la posibilidad de realizar aplicaciones de dosis variables de fertilizantes según las necesidades del cultivo en cada sitio y momento para alcanzar una mayor eficiencia del recurso fertilizante, optimizándose el beneficio económico, reduciéndose el impacto ambiental y mejorándose la eficiencia de uso de los otros factores involucrados en la producción agrícola.

Por otra parte, la variabilidad en los campos agrícolas se debe a varios factores naturales y antropogénicos. El factor natural más importante es el tipo de suelo cuyas características están definidas por el material parental y la topografía.

En coincidencia con Brouder *et al.* (2001) la actividad humana promueve la variabilidad a través de la distribución de residuos afectándose la acumulación de materia orgánica con las consecuentes implicaciones. Además, son factores importantes en la variabilidad antropogénica la distribución de fertilizantes, la diferente remoción de nutrimentos causada por distintos tipos de cultivos, así como rotaciones y el efecto significativo de la erosión.

El impacto que tiene la variabilidad espacial de propiedades de suelo a nivel práctico tiene implicaciones directas en los análisis experimentales, por lo cual debe tenerse en cuenta en los centros dedicados a la actividad científica agropecuaria.

3.5. Reflectancia espectral de las muestras de suelo

Las curvas de reflectancia son una representación gráfica de la reflectancia espectral de las muestras de suelo, como una función del rango de longitud de onda utilizado, comprendido en la región VIS/NIR. En la figura 8 pueden distinguirse los espectros de reflectancia de este tipo de suelo, tanto para el campo muestreado para la calibración, como el muestreado para la validación.

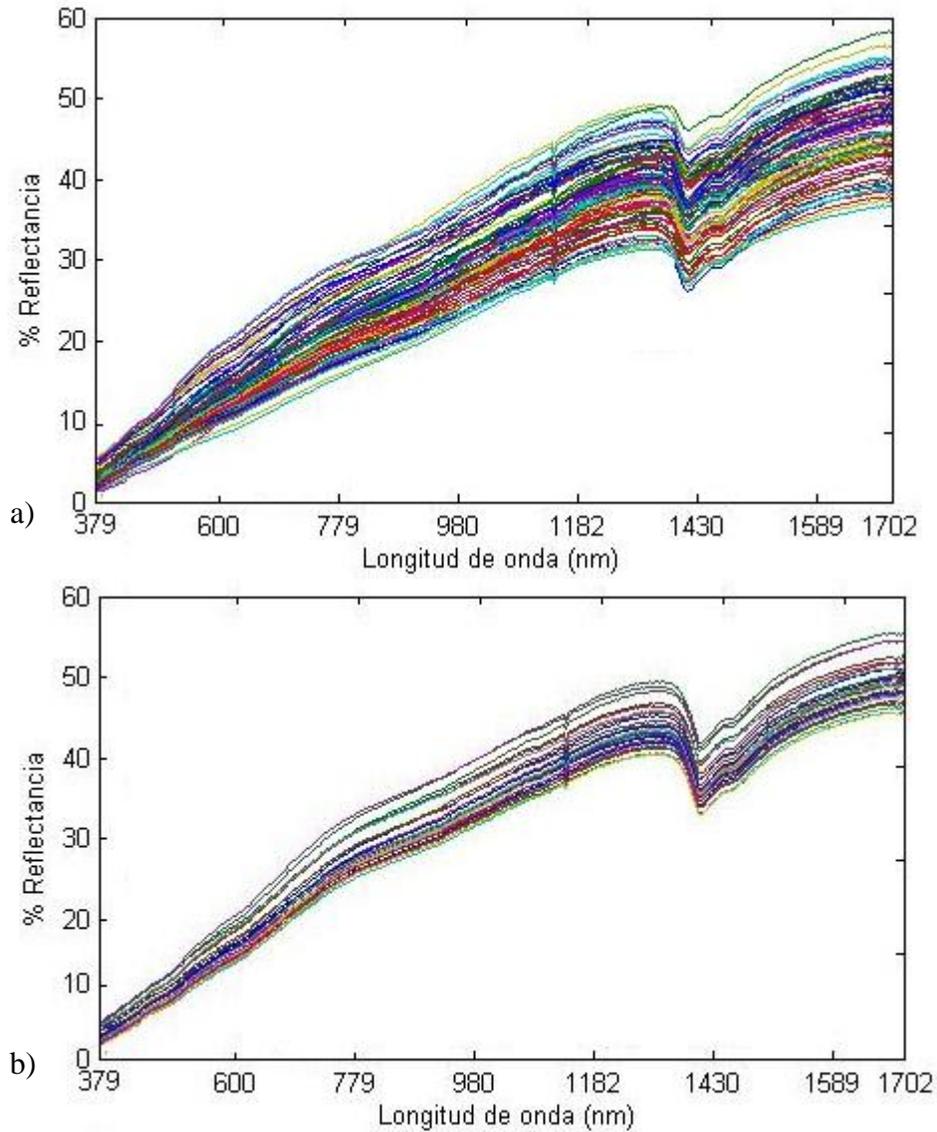


Figura 8. Reflectancia espectral de las muestras de suelo.

a) Campo muestreado para la calibración; b) Campo muestreado para la validación

En ambos casos se observó que en la región visible (399 - 780 nm) la reflectancia fue menor que en la región de NIR (780 - 197 nm). También, los valores máximos de reflectancia se observaron en la longitud de onda de 1702 nm.

Por otra parte, alrededor de la longitud de onda de 1430 nm se observó un pico de decrecimiento, que consecuentemente se incrementa nuevamente alrededor de la misma longitud de onda. Esto se debe fundamentalmente a bandas de absorción de agua (H₂O), además a enlaces O-H, C-H y N-H. Incluso secas, las muestras de suelo arcilloso contienen moléculas de agua en su composición química, que no son removidas totalmente mediante el proceso de secado al aire. Estos resultados conciden con los de (Choudhury *et al.*, 2009).

3.6. Predicción Vis/NIR de las propiedades químicas de suelo

Los resultados de los modelos de predicción VIS/NIR se observan en la tabla 6, donde se ilustran las correlaciones entre los valores obtenidos por métodos convencionales y los correspondientes a la predicción VIS/NIR.

Tabla 6. Resultados de la predicción VIS/NIR de las propiedades químicas del suelo

Propiedad química	Modelo de regresión	R ² P ^a	RMSEP ^b	RPD ^c	RER ^d	P Bias ^e
MO	PLS	0,66	0,71	2,72	20,21	-0,04
P ₂ O ₅	PLS	0,39	5,32	1,20	18,62	-0,63
K ₂ O	PLS	0,46	7,64	1,80	22,55	-0,00

Leyenda:

PLS- Mínimos cuadrados parciales

a R² P- coeficiente de determinación de la predicción;

b RMSEP- raíz cuadrada media del error de predicción;

c RPD- proporción de la desviación del resultado;

d RER- proporción del rango de error;

e P Bias- desviación sistemática de la predicción

En ninguna de las propiedades químicas investigadas se logró una predicción exitosa, sino que por el contrario está fue menos fiable. En la MO se observaron los mayores valores, con el R² más alto de predicción (0,66) y el RMSEP más bajo (0,71). En correspondencia con lo reportado por Stenberg *et al.* (2010), la MO es uno de las propiedades fundamentales del suelo que tiene una bien-reconocida absorción en la región de VIS/NIR.

3.7. Comparación del modelo de predicción VIS/NIR con otro calibrado en suelos Pardos mullidos medianamente lavados en la provincia de Villa Clara

Los estadísticos para la comparación entre los modelos de predicción VIS/NIR con otro calibrado mediante la utilización de muestras de suelo de diferentes zonas de la provincia de Villa Clara se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la validación del modelo de predicción VIS/NIR con respecto al calibrado en el contexto de la provincia

Campos	Propiedad química	Modelo de regresión	R ² P ^a	RMSEP ^b	RPD ^c	RER ^d	P Bias ^e
1	MO	PLS	0,92	0,14	3,22	8,88	-0,08
2	MO	PLS	0,66	0,71	1,72	6,21	-0,04
1	P ₂ O ₅	PLS	0,70	2,52	1,76	6,50	0,26
2	P ₂ O ₅	PLS	0,39	5,32	1,20	5,62	-0,63
1	K ₂ O	PLS	0,61	5,88	1,56	5,66	4,30
2	K ₂ O	PLS	0,46	7,64	1,40	4,55	-0,00

Leyenda:

PLS- Mínimos cuadrados parciales

^a R² P- coeficiente de determinación de la predicción;

^b RMSEP- raíz cuadrada media del error de predicción;

^c RPD- proporción de la desviación del resultado;

^d RER- proporción del rango de error;

^e P Bias- desviación sistemática de la predicción.

En todos los casos, la predicción del modelo obtenido en la presente investigación fue más baja que la obtenida por (Chacón, 2014).

En estos resultados pudo haber influido que independientemente que uno de los tipos de suelo que este autor evaluó en su investigación está relacionado con el del presente estudio, no tienen el mismo comportamiento e historial de campo, ya que los de Chacón (2014) son suelos cañeros de la provincia los cuales son sometidos a prácticas agrícolas mucho más severas que las de estos suelos no cañeros.

3.8. Validación del modelo de predicción Vis/NIR con respecto al calibrado en suelos Pardos mullidos medianamente lavados en la provincia de VC

La validación del modelo del modelo obtenido por Chacón (2014) con base en las muestras obtenidas en la presente investigación en el área muestreada con este fin se observa en la tabla 8. Esta mostró una predicción menos fiable para la MO con un coeficiente R^2 de 0,55 con relación al R^2 de 0,92 que se clasifica como exitoso.

Los resultados obtenidos para P_2O_5 tampoco coinciden dado que el R^2 fue de 0,32, mientras que el obtenido por Chacón (2014) fue de 0,70 equivalente a un modelo moderadamente útil. Finalmente, en K_2O hubo una coincidencia en que ambos modelos fueron menos fiables, sin embargo el resultado de la presente investigación fue menor con R^2 de 0,40.

Los resultados pudieron estar influenciados en parte por el factor humano en la toma de muestras y en el análisis de las mismas. Además, el grupo Cambisol que evaluado por Chacón (2014), además de los estos suelos Pardos mullidos medianamente lavados, incluye otros tipos como el Pardo con carbonatos plastogénico, Pardo con carbonato gleysoso y otras agrupaciones.

Tabla 8. Resultados de la validación del modelo de predicción VIS/NIR con respecto al calibrado en el contexto de la provincia

Campos	Propiedad química	Modelo de regresión	R ² P ^a	RMSEP ^b	RPD ^c	RER ^d	P Bias ^e
1	MO	PLS	0,92	0,14	3,22	8,88	-0,08
2	MO	PLS	0,55	0,82	0,82	3,91	-0,00
1	P ₂ O ₅	PLS	0,70	2,52	1,40	8,54	0,30
2	P ₂ O ₅	PLS	0,32	6,20	1,08	4,42	-0,00
1	K ₂ O	PLS	0,61	5,88	1,56	5,66	4,30
2	K ₂ O	PLS	0,40	8,72	1,34	5,55	-0,00

Leyenda:

PLS- Mínimos cuadrados parciales

^a R² P- coeficiente de determinación de la predicción;

^b RMSEP- raíz cuadrada media del error de predicción;

^c RPD- proporción de la desviación del resultado;

^d RER- proporción del rango de error;

^e P Bias- desviación sistemática de la predicción

Conclusiones



CONCLUSIONES

1. Las propiedades químicas MO, K₂O y P₂O₅ mostraron un alto % de variabilidad espacial en las áreas seleccionadas, con coeficientes de variabilidad superiores al 30 y 40%.
2. Las propiedades químicas K₂O y P₂O₅ presentaron las correlaciones más significativas en ambas áreas agrícolas seleccionadas con coeficientes de 0,63 y 0,35 para la calibración y validación respectivamente.
3. Las lecturas de reflectancia variaron con la longitud de onda y hubo un incremento de la misma de la región visible (399 - 780 nm), a la del infrarrojo cercano (780 - 1697 nm).
4. En general los resultados derivados del modelo obtenido en el área agrícola seleccionada y los de la comparación con otro modelo calibrado en suelos de Villa Clara fueron menos fiables con $R^2 < 0,70$.

Recomendaciones



RECOMENDACIONES

1. Proponer una estrategia para el manejo de nutrientes por sitio específico, con base en la variabilidad espacial de las propiedades químicas de suelo determinada en esta área agrícola de la Estación experimental.
2. Comprobar la exactitud y precisión de los modelos VIS/NIR desarrollados para la predicción de propiedades químicas, en otros suelos agrícolas del área objeto de estudio.
3. Replicar esta investigación en otro tipo de suelo de importancia agrícola de la provincia de Villa Clara, con la inclusión de estas y otras propiedades químicas de suelo.

Referencias bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMCHUK, V. I.; J. W. HUMMEL; M. T. MORGAN y S. K. UPADHYAYA: "On-The-Go de suelo sensores para la agricultura de precisión Computadoras y Electrónica en la agricultura", 44: 71-91, 2004.
- AKINRINDE, E. A.: *Soils Nature, fertility conservation and management*, 2006.
- ALCAIDE, J. F.: "Impacto sobre el medio ambiente": 1999.
- ARDENSON, D.: "La caña de azúcar y el fósforo", *Inf. Agronómicas INPOFOS*, 18: 6, 1995.
- ARRIECHE, I.; M. RUÍZ; C. E. CARRILLO DE CORI; M. LEÓN; L. M. AULAR; R. MORA; L. CASTILLO; M. R. TOVAR; A. MARTÍNEZ; H. BAPTISTA; T. DÍAZ; C. SILVA; J. CRUZ; A. M. REVERON y N. ALFONZO: "COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE ANÁLISIS EN LA DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS": 1-6, 2010.
- AVDONIN, N. S.: Agroquímica. *En*: Moscú, U. d. (ed.). pp. 342. 1982.
- BAI, Y. y Y. WANG: "Spatial variability of soil chemical properties in a Jujube Slope on the Loess Plateau of China", *Soil Science*, 176: 550-558, 2011.
- BALLARD, E. G. y B. G. W.: "Mineral nutrition of plant", *Ann. Rev. Of Plant Physiol*, 17: 77-112, 1966.
- BARNES, R. J.; M. S. DHANOA y S. J. LISTER: "Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra", *Applied Spectroscopy*, 43(5): 772-777, 1989.
- BARROSO, R. A.: *La roca fosfórica de Trinidad de Guedes: una alternativa en la fertilización de suelos ácidos bajos en fósforo*, 51pp., Camagüey, 1999.
- BÁSCONES, E.: "ANÁLISIS DE SUELO Y CONSEJOS DE ABONADO": 2010.
- BONGIOVANNI, R.; E. CHARTUNI; S. BEST y A. ROEL: 2006. *AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*, Disponible en: www.iica.int.
- BROUDER, S.; B. HOFMANN y H. F. REETZ: "Evaluating spatial variability of soil parameters for input management", *Better Crops*, 85(8-11): 2001.
- BURÉS, S.: "La Descomposición de la Materia Orgánica": 2004.
- CORBELLA, R.: "*Materia Orgánica del Suelo*": 2006.
- CORDELL, D.; J. O. DRANGERT y S. WHITE: "The story of phosphorus: global food security and food for thought", *Global Env. Change*, 19: 292-305, 2009.
- CORWIN, D.; S. R. KAFFKAB y J. W. HOPMANS: "Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil", *Geoderma*, 1952: 1-29, 2003.
- COX, S.: "Pharmaceutical sciences encyclopedia drug discovery, development, and manufacturing": 2008.
- COZZOLINO, D. y I. MURRAY: "Identification of animal meat muscles by visible and near infrared reflectance spectroscopy", *Lebensm.-Wiss. u.-Technol*, 37: 447- 452, 2004.
- CREMLYN, R. J.: "Agrochemicals preparation and mode of action", *John Wiley & Sons Ltd. England*: 396, 1991.
- CHACÓN, A.: *Vis/NIR spectroscopic measurement of selected fertility parameters of Cuban agricultural soils*, 189pp., PhD, KU Leuven, Belgium, 2014.
- CHANG, C. W.; D. W. LAIRD; M. J. MAUSBACH y C. R. HURBURGH: "Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties", *Soil Science Society of America*, 65: 480-490, 2001.

- CHOU DHURY, S.; C. DEEPANKAR y S. CHOU DHURY: "An Introduction to geographic information technology", *I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi, India*, 300: 2009.
- DAWSON, C. J. y J. HILTON: "Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus", *Food Policy*, 36: 14-22, 2011.
- DE LEÓN, M., E.; J. CAMPOS; G. BETANCOURT; I. MACHADO y L. SOLER: Generalización de Lotes Controles del Servicio de Recomendaciones de Fertilizantes y Enmiendas, vía para incrementar el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. En, pp., Ciudad de la Habana. XV FORUM de Ciencia y Técnica, 2004.
- DONIGIAN, A. S.: Watershed model calibration and validation The HSPF experience Water Environment Federation National TMDL. En, pp. Science and Policy, 2002.
- FIXEN, P.: "Dinámica suelo- cultivo del fósforo y manejo de los fertilizantes fosfatados. Parte I", *Inform. Agron. INPOFOS*, 16: 3-5, 1994.
- : "Cuál es la mejor forma de aplicar fósforo al suelo", *Inf. Agroquímicas. INPOFOS*, 27: 1-4, 1997.
- FONSECA, D. M.; J. A. GOMIDE y V. H. ALVAREZ: "Fatores que influencian os niveis criticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras", *Revista Brasileira do Ciencia do Solo*, 21: 31-40, 1997.
- FORMENT, S. y P. HANSELAER: "Stray light performance of a combined monochromator-spectrograph UV irradiance measuring instrument Meas", *Sci. Technol*, 8(21): 2010.
- GAN, J.: "Acceleration of 1, 3-dichloropene degradation by organic amendments and potential application for emissions reduction", *Journal of Environmental Quality*, 27: 408 - 414, 1998.
- GUIMARÃES, E.; A. STEIN y E. KLAMT: "Large area spatial variability of soil chemical properties in central Brazil", *Agric. Ecosyst. Environ*, 66(2): 139-152, 1997.
- HANEKLAUS, S.: "Site-specific nutrient management: objectives, current status and future research needs. In: Srinivasan a Handbook of precision agriculture: principles and applications": 9-34, 2006.
- HINSINGER, P.: "Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review", *Plant Soil*, 237: 173-195, 2001.
- HUMMEL, J. W. y S. J. BIRRELL: *Real-time close-range Sensors for soil attributes*. pp. 1998.
- JORGENSEN, A.: Clustering excipient near infrared spectra using different chemometric methods. University of Helsinki, pp. 2000.
- KAWATA, S.; H. W. SIESLER; Y. OZAKI; S. KAWATA y H. M. HEISE: "Instrumentation for Near-Infrared Spectroscopy Near-infrared spectroscopy. Principles, instruments, applications", *Wiley-VCH Verlag, Weinheim*: 43-73, 2002.
- KONONOVA, M.: *Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación [en línea]. vol. no. Barcelona Oikos-Tau*.
- KOVAČEVIĆ, M.; B. BAJAT y B. GAJIĆ: "Soil type classification and estimation of soil properties using support vector machines", *Geoderma*, 154(3-4): 340-347, 2010.
- KUANG, B. y M. MOUAZEN: "Influence of number of samples on prediction error of visible and near infrared spectroscopy of selected soil properties at farm scale", *European Journal of Soil Science*, 63(3): 421-429, 2012.
- LAMBERS, H.; M. W. SHANE y M. D. CRAMER: "Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits", *Ann. Bot*, 98: 693-713, 2006.

- LOZANO, Z.; R. M. HERNÁNDEZ; C. BRAVO; C. RIVERO; M. TORO y M. DELGADO: "Disponibilidad de fósforo en un suelo de las sabanas bien drenadas venezolanas , bajo diferentes coberturas y tipos de fertilización", *Interciencia*, 37(11): 820-827, 2012.
- LV, G. y H. YANG: "Discrimination of different brands of Nescafé coffee using Vis/NIR spectroscopy and comparative study", *Advances in Biochemical Engineering*, (1-2): 163-166, 2011.
- MCCARTY, G.; J. B. REEVES; V. B. REEVES; R. F. FOLLETT y J. M. KIMBLE: "Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement", *Soil Science Society of America Journal*, 662: 640-646, 2002.
- MOUAZEN, A. M.; R. KAROUI; J. DE BAERDEMAEKER y H. RAMON: "Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra", *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1295-1302, 2006.
- MURREL, S.: "Preguntas más comunes sobre los fertilizantes portadores de fósforo", *Inf. Agron INPOFOS*, (33): 32, 1998.
- NAES, T.; T. ISAKSON; T. FEARN y T. DAVIES: "A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification NIR", *Chichester, UK*: 2002.
- NDUWAMUNGU, C.; N. ZIADI; G. F. TREMBLAY y L. PARENT: "Near-infrared reflectance spectroscopy prediction of soil properties Effects of sample cups and preparation", *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1896-1903, 2009.
- OLIVEIRA, S. S.; M. FLORES y M. VALADARES: "Application of LS-SVM-NIR spectroscopy for carbon and nitrogen prediction in soils under": 2010.
- OZAKI, Y.: "Near-Infrared Spectroscopy-Its Versatility in Analytical Chemistry", *ANALYTICAL SCIENCES*, 28: 545-563, 2012.
- PRASAD, R.: "Classification of fields having different soil moisture content by SVM technique using bistatic scatter meter": 2011.
- REHBEIN, H. y J. OEHLENSCHLAGER: "Fishery products: Quality, safety, authenticity": 2009.
- RICHARDSON, A. E.: "Soil microorganisms and phosphorous availability. In Soil biota: management in sustainable farming systems", *CSIRO Victoria, Australia*: 13, 1994.
- ROLDÁN, M. F.; C. A. VENIALGO y N. C. GUTIÉRREZ: "Potasio disponible, de reserva y energía de reemplazamiento en suelos y el nivel foliar en rye-grass", *Comunicaciones Científica y Tecnológicas*, A-072(1): 1-3, 2004.
- SÁNCHEZ, V. J.: "Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas ": 2007.
- SANZANO, A.: "El fósforo del suelo": 2013.
- SCHIRRMANN, M. y H. DOMSCH: "Soil pH-mapping with an on-the-go sensor Sensors", 11: 573-598, 2011.
- SIESLER, H. W.; Y. OZAKI; S. KAWATA y H. M. HEISE: 2002. *Near- espectroscopia de infrarrojos. Principios, instrumentos, aplicaciones*, Ed. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- SILVA, A.: "La materia organica del suelo": 1995.
- STENBERG, B.; R. A. VISCARRA R; A. M. MOUAZEN y J. WETTERLIND: "Visible and near infrared spectroscopy in soil science", *Advances in Agronomy*, 107(10): 163-215, 2010.
- STUART, B. H.: 2004. *Infrared spectroscopy fundamentals and applications*, Chichester, UK.
- SUELOS, I. D.: *Programa Nacional de mejoramiento y conservación de suelos*. Ministerio de la Agricultura, Agrinfor, pp. 38, 2001.
- SUYKENS, J. K.: "Least squares support vector machines", *World Scientific*: 2002.
- ULMSCHNEIDER, M. y Y. ROGGO: "Pharmaceutical Manufacturing Handbook", *John Wiley & Sons, Hoboken NJ*: 353-410, 2008.

- VANGESTEL, C. A.: "Phytotoxicity of some chloroanilines and chlorophenols in relation to bioavailability in soil", *Water, Air and Soil Pollution*, 88(1-2): 119-132, 1996.
- VILLEGAS, R.: El Fósforo en la Agricultura de Cuba. *Ponencia Ira Reunión Nacional de Agroquímica*. Academia de Ciencias de Cuba, pp. 69. 1983.
- VISCARRA, R. R. A.: "Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents", *Biosyst. Eng*, 100: 149-159, 2008.
- VISCARRA, R. R. A.; D. J. WALVOORTB; A. B. MCBRATNEYA; L. J. JANIKC y J. O. SKJEMSTADC: "Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties", *Geoderma*, 131: 59-75, 2006.
- VOLKAN, A.; H. M. VAN ES; F. AKBAS; A. DURAK y W. D. HIVELY: "Visible near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey", *Arid Environments*, 74: 229-238, 2010.
- WHITBREAD, A.: Soil organic matter: its fractionation and role in soil structure. Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture. *ACIAR Proceedings*. R. D. B. Lefroy, G. J. Blair, and E. T. Craswell: Thailand, ACIAR: Canberra, pp. 24-26. 1995.

Anexos



ANEXOS

Anexo 1. Evaluación de la materia orgánica del suelo

% de Materia Orgánica	Categorías
< 2.0	Bajo
2.0 – 4.0	Mediano
4.1 – 6.0	Alto
> 6.0	Muy alto

Fuente: MINAGRI (1984)

Anexo 2. Evaluación del Fósforo y Potasio, por método de Oniani

P₂O₅ y K₂O (mg 100g⁻¹) por el método de Oniani para suelos no cañeros, sólo para otros cultivos		
P₂O₅	K₂O	Categoría
< 6	< 7	Bajo
6 – 11	7 – 14	Mediano
11 – 15	14 – 20	Alto
> 15	> 20	Muy alto

Fuente: Fundora y Yepis, (2000)

Anexo 3. Asignación de bandas NIR a grupos orgánicos. Fuente: (Peguero, 2010)

