BICENTENARIO DE BOLIVIA

ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA
MINISTERIO DE DESARROLLO RURAL Y TIERRAS

INIAF
Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal

MANUAL METODOLÓGICO DE ANÁLISIS DE SUELOS

Proyecto Hortalizas

Versión: 01

AUTORIDADES

M. Sc. Luis Alberto Arce Catacora
PRESIDENTE DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

Lic. David Choquehuanca Céspedes
VICEPRESIDENTE DEL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

Ing. Juan Yamil Flores Lazo
MINISTRO DE DESARROLLO RURAL Y TIERRAS

Windson July Martinez Ph.D.
DIRECTOR GENERAL EJECUTIVO INIAF-BOLIVIA

AUTORIDADES DEL INIAF

Windson July Martinez, Ph. D.
DIRECTOR GENERAL EJECUTIVO INIAF-BOLIVIA

Rogelio Maydana Apaza, Ph. D.
DIRECTOR NACIONAL DE INNOVACIÓN

M. Sc. Ramiro Fernando Figueredo Quisbert
DIRECTOR NACIONAL DE SEMILLAS

M. Sc. Jose Luís Quispe Guanca
DIRECTOR NACIONAL DE PRODUCCIÓN Y SERVICIOS

Ariel Santivañez Aguilar, Ph. D.
RESPONSABLE NACIONAL DEL PROYECTO HORTALIZAS

Equipo técnico INIAF Proyecto "Desarrollo de Tecnologías para Mejorar la Productividad de Hortalizas en Regiones Productoras de Bolivia"

M. Sc. Ariel Santivañez Aguilar Ph. D.
Ing. Marco Antonio Varias Alvarez
Ing. José Antonio Orellana Ricaldez
Ing. Henrry Murillo Guzmán
Ing. Irene Mercedes Gutierrez Limachi
Ing. Raul Villegas Sanabria
Ing. Ran Wara Onishi Gutierrez
Ing. Milka Orellana Huarachi
Ing. Edgar Brayan Castillo Pimienta
Ing. Anai Maritza Espejo Olmos
Ing. Cesar Hernan Guerrero Cocasapa
Ing. José Marcelo Reguerin López
Ing. Viviana Mujica Belmonte
Ing. Oscar Orlando Meneces Arias
Ing. Celso Simón Mamani Flores
Ing. Deborah Ruth Mayta Quispe
Ing. Martin Rolf Uyardo Torrico
Ing. Misael Fernández Pacheco
Ing. Roger Ernesto García Vallejos
Ing. Wilber Castro Sandoval
Ing. Fernando Fabricio Villca Quiroga
Ing. Yerco Milivoy Pozo Rocha
Ing. Ernesto Vasquez Ledezma
Ing. Erick Gonzalo Ortega
Lic. Andrea Ninoska Riveros Rossel
Lic. Catucia Velasquez Albornoz
Tec. Sup. Franz Rubén Ávila Berrios
Vladimir Alex Caspa Copa
Nely Flavia Cutipa Copa
Melissa Graciela Arispe Jaldín
Mayra Shirley Vallejos Soliz
Yessica Sanga Tinta
Fernanda María Torrez Suzaño
Cesar Angel Ledezma Jamira
Cristhian Daniel Cuba Aduviri

IMPRESIÓN Y DIAGRAMACIÓN: INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGROPECUARIA Y FORESTAL - PROYECTO HORTALIZAS.
ISBN: 978–9917–9653–9-8
Deposito Legal: 4-1-656-2025 P.O.

Cochabamba - Bolivia

Índice

Presentación 7
Introducción 1
Objetivo 1
SECCIÓN 1 ..... **2**
1. TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LA MUESTRA DE SUELO **2**
1.1. Recepción y descripción de la muestra 2
1.2. Preparación de las muestras 2
Materiales, equipos y elementos de protección: 3
Procedimiento: 3
1.3. Acondicionamiento y secado para el almacenamiento 4
1.3.1. Secado natural en ambiente controlado 5
Materiales, equipos y elementos de protección: 5
Procedimiento: 5
1.3.2. Secado termo-controlado en estufa 6
Materiales, equipos y elementos de protección: 6
Procedimiento: 7
1.4. Fragmentación mecánica y eliminación de contaminantes 9
1.4.1. Separación de fracciones gruesas 9
Materiales, equipos y elementos de protección: 9
Procedimiento: 9
1.5. Submuestreo 11
1.5.1. Submuestreo a mano (cuarteo) 12
Materiales, equipos y elementos de protección: 12
Procedimiento: 12
3.6. Molienda 14
3.7. Tamizado 15
3.8. Homogeneización por agitación mecánica 15
3.9. Determinación gravimétrica de la masa 16
3.8. Protocolo para Almacenamiento en Condiciones Estándar 16
SECCIÓN 2 ..... **18**
2. ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO **18**
2.1. Determinación de la densidad aparente (Da) mediante método de cilindro 18

Materiales, equipos y elementos de protección: 19
Procedimiento: 19
Cálculos: 22
2.1.1. Densidad aparente por técnica de recubrimiento con parafina 24
Materiales, equipos y elementos de protección: 24
Procedimiento: 25
2.2. Cuantificación de la densidad real (Dr) mediante picnómetro de agua 25
Materiales, equipos y elementos de protección: 26
Procedimiento: 26
2.3. Determinación gravimétrica del contenido de humedad por secado 28
Materiales, equipos y elementos de protección: 29
Procedimiento: 29
2.4. Textura del suelo (determinación del tamaño de partículas) 33
2.4.1. Ley de Stokes 34
2.4.2. Análisis granulométrico por sedimentación: método del hidrómetro de bouyoucos 35
Materiales, equipos y elementos de protección: 36
Reactivos 36
Procedimiento: 36
Cálculos: 40
SECCIÓN 3 43
3. ANÁLISIS DE PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO 43
3.1. Cationes intercambiables del suelo (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}) por 43
3.1.1. Fundamentos de Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) 44
Materiales, equipos y elementos de protección: 44
Reactivos: 45
Procedimiento: 45
3.2. Materia orgánica método por titulación de Walkley – Black 49
Materiales, equipos y elementos de protección: 50
Reactivos: 50
Procedimiento: 51
Cálculos: 52
3.3. Medición potenciométrica del pH en suspensión 53

Interferencias 54
3.3.1. Preparación de la muestra de suelo y medición de pH 55
Materiales, equipos y elementos de protección: 55
Procedimiento: 55
3.4. Determinación conductividad eléctrica (CE), método conductimétrica 56
Interferencias: 57
Materiales, equipos y elementos de protección: 58
Reactivos: 58
Procedimiento: 58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

Presentación

El Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) es una institución pública descentralizada de Bolivia, dependiente del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT)**,** encargada de promover la investigación, la innovación tecnológica, la validación y la transferencia de conocimientos en los sectores agropecuario y forestal. Su labor está orientada a fortalecer la productividad, la seguridad alimentaria y el manejo sostenible de los recursos naturales del país. Entre sus principales funciones se encuentran el desarrollo de tecnologías agrícolas, la gestión y producción de semillas (CNPSH), la conservación de recursos genéticos, la capacitación a productores y técnicos, y la prestación de servicios especializados como el análisis de suelos a través de sus laboratorios técnicos distribuidos en distintos departamentos del país con fines investigativos.

El presente manual, elaborado por el Ing. QMC Martin R. Uyardo Torrico, en colaboración con el equipo técnico del Proyecto Hortalizas, tiene como objetivo principal estandarizar los procedimientos analíticos para el análisis de suelos en el laboratorio del INIAF ubicado en instalaciones del CNPSH, con el fin de unificar criterios técnicos y asegurar la calidad y trazabilidad de los resultados generados. Los protocolos aquí descritos han sido validados y adecuados específicamente a las condiciones operativas de nuestra institución (equipos, reactivos y personal), sirviendo como el documento de consulta para el desarrollo técnico. Si bien este manual constituye una robusta base metodológica de referencia, es imperativo señalar que la validación de cualquier metodología debe desarrollarse y ajustarse bajo las condiciones particulares de cada laboratorio que aspire a implementarla, garantizando así la confiabilidad de sus resultados.

En este sentido, mediante la gestión del Proyecto Hortalizas perteneciente al INIAF encargado del manejo y gestión de las instalaciones del CNPSH, presenta el "Manual Metodológico de Análisis de Suelos" desarrollado con base a normativas vigentes en nuestro país, como instrumento para garantizar la excelencia técnica en nuestros servicios analíticos.

Windson July Martinez, Ph.D.
Director General Ejecutivo INIAF

PROYECTO NACIONAL HORTALIZAS

Introducción

La degradación del suelo es un proceso degenerativo ocasionado por diversos factores como la contaminación comercial, agrícola, industrial, pérdida de tierra de cultivo, sobrepastoreo y prácticas agrícolas inadecuadas, además del cambio climático a largo plazo (Maximillian et al., 2.019). En cuanto a las prácticas agrícolas en Bolivia, un inadecuado manejo de fertilización y/o intoxicación de iones en exceso sin remediación son factores principales para la infertilidad del suelo agrícola, ignorar estos factores con el trascurrir del tiempo tiene como consecuencia un suelo completamente improductivo, ya que su capacidad de suplir y mantener una cantidad adecuada de nutrientes se verá reducida y, por ende, las plantas cultivadas en dichas tierras no dispondrán de nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo.

El presente manual ha sido desarrollado con el propósito de establecer procedimientos estandarizados, confiables y técnicamente validados para la ejecución de análisis físico-químicos de muestras de suelos y aguas en el laboratorio del Proyecto Hortalizas perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF).

Está dirigido a los técnicos y profesionales que desempeñan su labor en el laboratorio, así como todos los actores involucrados en el uso y aplicación de los resultados analíticos.

Este documento constituye una herramienta fundamental para garantizar la calidad, la trazabilidad y la reproducibilidad de los resultados obtenidos, en el marco del fortalecimiento de la investigación y la producción sostenible del sector agropecuario, dando cumplimiento con lineamientos del Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras (MDRyT).

Este manual está basado en aplicar procedimientos para el trabajo en laboratorio cumpliendo con normas técnicas que aseguren la calidad en la determinación de los métodos de ensayo.

Objetivo

Estandarizar y normalizar los procedimientos analíticos para el análisis de suelos y aguas en el laboratorio del INIAF - Proyecto Hortalizas, mediante protocolos validados bajo sus condiciones operativas específicas, con el fin de garantizar la generación de resultados confiables, trazables y de calidad.

MANUAL METODOLÓGICO DE ANÁLISIS DE SUELOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS – PROYECTO HORTALIZAS
Desarrollo de tecnologías para mejorar la productividad de hortalizas (cebolla, tomate y zanahoria), en regiones productoras de Bolivia

SECCIÓN 1

1. TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LA MUESTRA DE SUELO

1.1. Recepción y descripción de la muestra

El analista debe mantener una comunicación rigurosa y constante con el productor, con el propósito de garantizar el llenado correcto del formulario de solicitud de análisis emitido por el laboratorio. Dicho formulario debe recopilar la máxima información posible respecto al origen de la muestra, así como las características relevantes del suelo muestreado. En consecuencia, el adecuado diligenciamiento de este documento proporcionará información preliminar valiosa a los analistas, lo cual facilitará la toma de acciones anticipadas incluso antes de la recepción física de la muestra.

Adicionalmente, junto con el formulario de solicitud, resulta crucial proporcionar al productor un protocolo detallado de muestreo e identificación de muestras. Esta medida aplica especialmente en los casos en los que no sea posible la participación directa del laboratorio en la etapa de muestreo.

Posteriormente a la recepción, se debe examinar la muestra en su estado original y registrar detalladamente sus características, incluyendo la presencia de materiales extraños, restos de vegetación, así como cualquier otra característica notable o relevante para el análisis.

1.2. Preparación de las muestras

Toda muestra de suelo, luego de su recepción, correcto muestreo y registro en laboratorio, debe ser sometida a un proceso de preparación, la cual es una etapa fundamental una vez ingrese al laboratorio. El objetivo de esta etapa, es el de acondicionar el material recolectado en campo, el cual tiene una representación total y homogénea de las características químicas, físicas y biológicas de la parcela origen. En el desarrollo de este proceso se debe eliminar factores de variabilidad como: tamaño de partícula, presencia de cualquier tipo de impurezas y

contenido de humedad. Los cuales influyen directamente en la precisión y repetibilidad de los resultados finales.

La muestra de suelo se analizará en su estado original, podría incurrir en errores al contener elementos extraños, impurezas detectables e indetectables como raíces, piedras, restos orgánicos gruesos, además, al tener variaciones en la distribución de humedad, afectan directamente en la representatividad del análisis mediante medición de parámetros como el peso real de la muestra, comprometiendo la trazabilidad metrológica y la validez de los datos obtenidos.

Para desarrollar este proceso es indispensable contar con materiales y equipos que garanticen la integridad física y química del material, así como la aplicación de los procedimientos desarrollados en laboratorio. Los procesos para desarrollar son los siguientes: desmenuzado de aglomerados de tierra, secado al aire o por convección forzada, molido de la muestra para la eliminación de aglomerados más pequeños, tamizado y almacenado con el correcto etiquetado e identificación de la muestra con los datos correspondientes al Manual de registro propio del laboratorio.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Trituradora, molino o mortero. • Tamiz, conforme a ISO 565 (malla 2 mm). • Balanza de precisión 0,01 g.	• Espátulas o cuchara de acero inoxidable. • Bandejas de acero inoxidable. • Bolsas de polietileno con sello hermético. • Etiquetas adhesivas. • Marcador indeleble.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o barbijo.

Procedimiento:

1. En varias etapas del procedimiento, el analista deberá tomar decisiones, especialmente si los diferentes tamaños de partícula deben combinarse o tratarse por separado, según al elemento que se desea analizar, la naturaleza del suelo y los objetivos del programa analítico. Luego de que la muestra es recepcionada, se debe verificar que esté identificada correctamente con el código según el protocolo de muestreo coordinado previamente con el productor.

2. Posteriormente se debe depositar la muestra en una de las bandejas de acero inoxidable correctamente identificadas con marcador indeleble o etiqueta adhesiva y desintegrar los aglomerados de tierra manualmente y con la ayuda de una espátula y las manos con guantes de nitrilo. De ser necesario utilizar un mortero para romper los terrones si son tamaño considerable o no ceden a la presión manual.

Figura 1: Muestras de suelo depositadas en bandejas.

3. Tome las medidas necesarias para el secado (extracción de aire, ventilación, etc.). Se debe tener cuidado para evitar la contaminación de la muestra a través del aire o por el polvo (atmósfera del laboratorio o entre muestras almacenadas o procesadas cerca unas de otras).

4. Se recomienda que el pretratamiento del material del suelo siempre se realice en una habitación utilizada sólo para este propósito, y se encuentre alejada de los lugares donde se realizan las mediciones analíticas de alta precisión.

Nota de seguridad: Utilice correctamente el EPP indicado. Extreme precaución con muestras de origen desconocido o potencialmente peligrosos evitando inhalación de polvo o contacto continuo con la piel.

1.3. Acondicionamiento y secado para el almacenamiento

El acondicionamiento de la muestra es importante para realizar su almacenamiento ya que es esta etapa donde se debe eliminar la humedad excesiva que contenga la muestra a su llegada. Un almacenamiento directo en bolsas herméticas de polietileno podría provocar degradación acelerada incidiendo en la materia orgánica de la masa. Por lo tanto, es importante realizar la eliminación cuidadosa de esta masa de agua contenida mediante un secado controlado a una temperatura mínima para evitar alteración en el contenido de materia orgánica de la muestra.

Además, la remoción periódica de la muestra en la etapa de secado es indispensable para un secado homogéneo, asegurando una distribución uniforme del calor entre partículas aglomeradas de la muestra. El secado puede realizarse mediante convección natural o en una

estufa hasta lograr masa constante. Una vez completado el proceso de secado, se debe determinar y registrar la masa total de la muestra seca.

El porcentaje de humedad, el espesor de la capa, el tipo de material y del aire, y la tasa de ventilación definen el tiempo de secado de la muestra de suelo. En una estufa, el tiempo de secado para suelos arenosos no suele ser superior a 24 horas, y para suelos arcillosos, más de 48 horas. Para suelos que contienen una gran proporción de materia orgánica fresca (por ejemplo, raíces de plantas, etc.), es posible que se requieran entre 72 y 96 horas. Estos periodos están considerados para condiciones de temperaturas que no superen los 40 a 45 °C.

1.3.1. Secado natural en ambiente controlado

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Sistema de ventilación. • Balanza de precisión 0,01 g. • Higrómetro o termohigrómetro.	• Espátulas o cuchara de metal inoxidable. • Bandejas de metal inoxidable. • Etiquetas adhesivas. • Marcador indeleble. • Vidrio de reloj. • Pilón de porcelana.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o barbijo. • Bata de laboratorio.

Procedimiento:

1. En un espacio libre de polvo, protegido de la luz solar directa y con humedad relativa baja menor al 60 % extender todo el material, en una capa no superior a 5 cm, sobre una bandeja de metal inoxidable y que no provoque contaminación.

3. Si es necesario, realizar trituración de aglomerados de suelo para un secado más homogéneo, con la ayuda de un pilón de porcelana.

2. Identificar la bandeja claramente con el código de muestra respectivo.

3. Revisar la muestra periódicamente y mezclarla con la ayuda de una espátula cada 6 horas. Si la muestra es secada por convección natural, revisarla periódicamente y mezclarla con la ayuda

de una espátula cada 6 horas para un secado homogéneo, teniendo mucho cuidado de evitar la contaminación.

4. El secado concluye cuando la muestra adquiere una consistencia quebradiza y no se percibe humedad al tacto. Dependiendo a la cantidad de agua, condiciones climáticas y condiciones en las que llegue la muestra al laboratorio, este proceso puede durar de 3 a 7 días.

Figura 2: Trituración de aglomerados de suelo.

1.3.2. Secado termo-controlado en estufa

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Sistema de ventilación. • Balanza de precisión 0,01 g. • Higrómetro o termohigrómetro.	• Espátulas o cuchara de metal inoxidable. • Bandejas de metal inoxidable. • Pilón de porcelana.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o barbijo. • Bata de laboratorio. • Guantes de algodón o para manejo de materiales calientes.

Procedimiento:

1. Haciendo uso de guantes de nitrilo, extender todo el material, en una capa no superior a 5 cm sobre una bandeja.
2. Precalentar la estufa y ajustar a una temperatura constante de 40 ± 2 °C, nunca sobrepasar esta la temperatura de 45 °C para no alterar el contenido de materia orgánica o la alteración de otras propiedades químicas.
3. Introducir la bandeja en la estufa, asegurándose de no sobrecargar y con circulación de libre de aire alrededor de la bandeja. Transcurrido un tiempo de 4 horas, se retira la bandeja del equipo y se procede a realizar el desagregue y homogenización de la muestra para romper grumos remanentes y dejar al descubierto nuevas áreas de calor.
4. Reingrese la bandeja por un tiempo de 4 horas adicionales o hasta alcanzar masa constante.

Figura 3: Secado de muestras en horno**.**

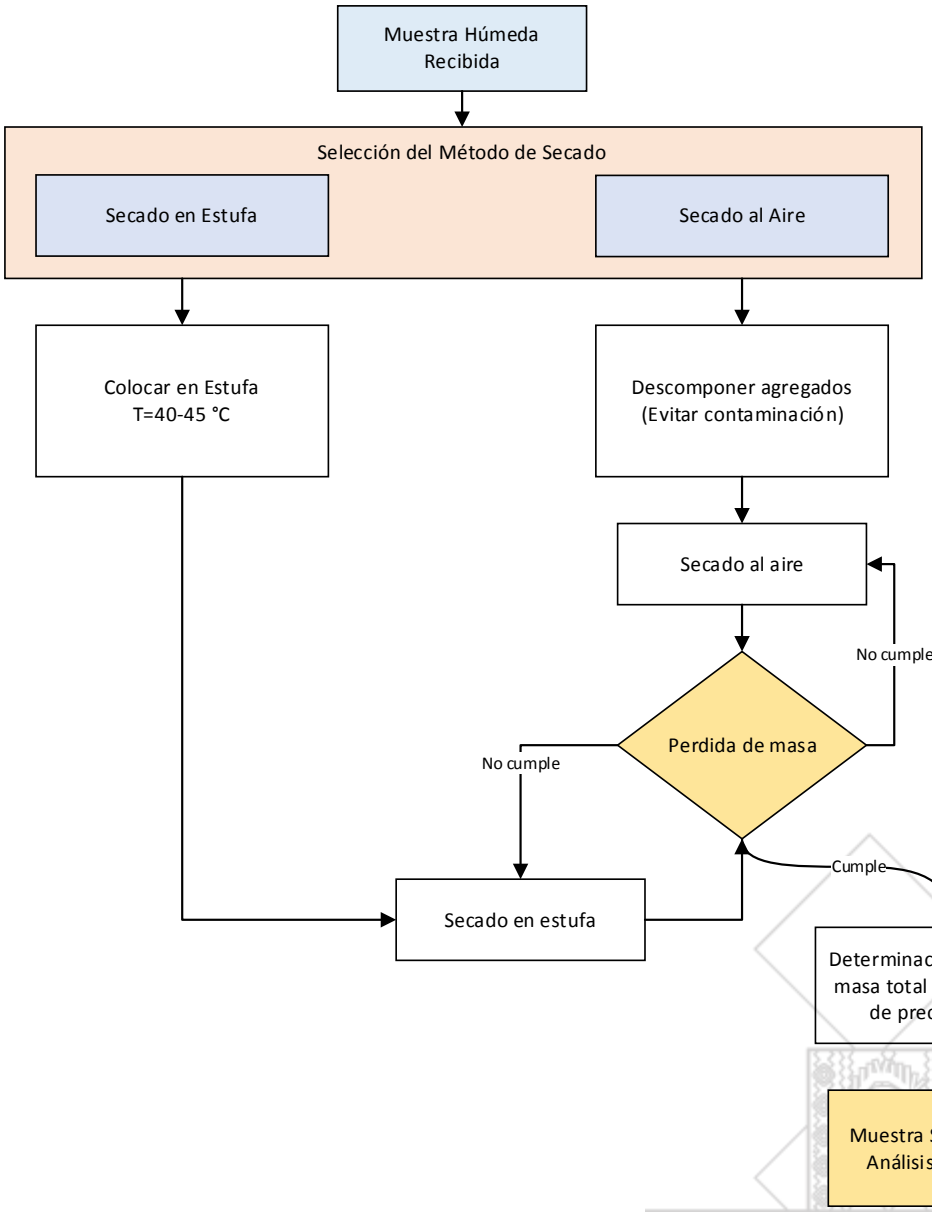


Figura 4: Diagrama de proceso del secado preliminar de una muestra de suelo.

1.4. Fragmentación mecánica y eliminación de contaminantes

1.4.1. Separación de fracciones gruesas

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Estufa de secado. • Tamiz de 5 mm. • Tamiz de 2 mm (No. 10 ASTM). • Mortero. • Balanza de precisión 0.01 g.	• Pinzas metálicas. • Espátulas de acero inoxidable. • Bandejas de acero inoxidable. • Bolsas herméticas de polipropileno de alta densidad (HDPE). • Etiquetas adhesivas. • Marcador indeleble.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o barbijo. • Bata de laboratorio.

Procedimiento:

Si el suelo se ha secado formando grandes agregados, será necesario triturar la muestra utilizando mortero y mano de caucho o plástico duro, evitando el uso de materiales metálicos que puedan alterar la composición química. En esta etapa, los materiales extraños como piedras, fragmentos de vidrio o basura deben retirarse cuidadosamente con pinzas o espátula. Este procedimiento puede facilitarse pasando la muestra por un tamiz de 5 mm, que permite retener los fragmentos de gran tamaño no edáficos y recuperarlos manualmente. Se debe tener cuidado de minimizar la pérdida de partículas finas adheridas a la materia extraña eliminada, y registrar la masa de todo material retirado.

Figura 5 y 6: Eliminación de aglomerados mediante el uso de un tamiz 5 mm.

Posteriormente, la muestra de suelo debe triturarse cuidadosamente con el fin de obtener una fracción homogénea. Seguidamente, el material resultante se tamiza a través de una malla de 2 mm (No. 10 ASTM), dado que la fracción menor a este tamaño, conocida como tierra fina, es la considerada representativa para la mayoría de los análisis físicos, químicos y biológicos. El tamizado permite eliminar partículas gruesas y materiales no edáficos que no participan en los procesos edáficos, garantizando así la comparabilidad de resultados entre laboratorios y la validez de los parámetros obtenidos. En el caso de muestras contaminadas, se deberán aplicar precauciones adicionales de seguridad en la manipulación y trituración, sin que esto modifique el requisito del tamizado a 2 mm.

Este proceso asegura la obtención de un tamaño de partícula uniforme y adecuado para los procedimientos analíticos posteriores. La fracción seleccionada debe almacenarse en una bolsa hermética de polipropileno de alta densidad (HDPE), debidamente identificada y conservada en un ambiente seco hasta su procesamiento.

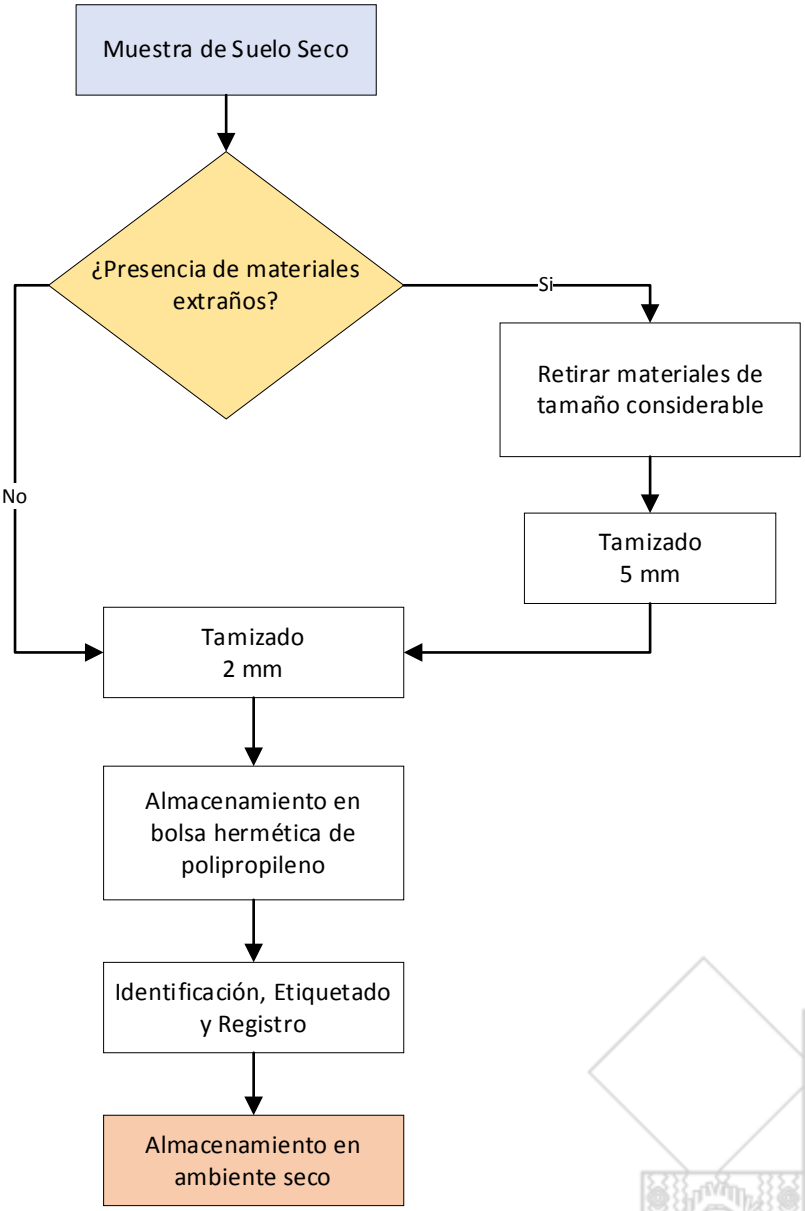


Figura 7: Diagrama de proceso sobre preparación de la muestra para su almacenamiento.

1.5. Submuestreo

El submuestreo es necesario cuando la muestra no puede almacenarse (muestra de laboratorio y muestra de archivo) o usarse (muestra analítica) por completo, debido a su tamaño. Para la preparación de una muestra de laboratorio, dividir la muestra seca, triturada y tamizada en porciones representativas de 200-300 g. Para la preparación de una muestra analítica, divida la muestra de laboratorio en porciones según parámetro a determinar. Evite la producción de polvo tanto como sea posible.

Figura 8: Separación de muestras para análisis posteriores o almacenamiento.

1.5.1. Submuestreo a mano (cuarteo)

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza de precisión 0,01 g.	• Bandeja plana y limpia. • Mortero con pilón. • Espátula metálica. • Etiquetas adhesivas. • Marcador permanente. • Bolsas plásticas tipo ziplock.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o barbijo. • Bata de laboratorio.

Procedimiento:

1. Extender la muestra de suelo previamente seca y tamizada sobre la bandeja plana en una capa fina y uniforme, con un espesor máximo de 2–3 cm. Esto facilita la manipulación y permite que la muestra se distribuya de manera homogénea. Antes de este paso, si la muestra

contiene agregados grandes, se debe triturar con mortero y mano, asegurando que los materiales extraños como piedras o fragmentos de residuos sean retirados.

2. Dividir visualmente la superficie de la muestra en cuatro partes iguales (cuadrantes). Esto se puede hacer mentalmente o con la ayuda de la espátula, asegurando que cada cuadrante contenga aproximadamente la misma cantidad de suelo. Este paso es fundamental para garantizar que la muestra reducida mantenga la representatividad de la original.

3. Retirar dos cuadrantes en diagonal y combinar los otros dos cuadrantes, conservando esta fracción para la siguiente reducción. Las porciones retiradas deben desecharse o almacenarse por separado si se requiere, registrando su masa. Este procedimiento permite reducir la muestra de manera sistemática, evitando la pérdida de representatividad.

4. Repetir los pasos (mezcla, extensión, división en cuadrantes y selección de porciones) hasta alcanzar la cantidad de muestra necesaria para los análisis de laboratorio. Cada repetición aumenta la homogeneidad y asegura que la fracción final sea representativa de la muestra original.

5. Colocar la fracción seleccionada en un recipiente limpio, con el peso registrado, etiquetado con información de la muestra (identificación, fecha, ubicación), y conservarla en condiciones secas hasta su procesamiento. Esto asegura que la muestra mantenga sus características físicas y químicas hasta el análisis.

Figura 9: Cuarteo de muestra de suelo.

3.6. Molienda

Si se va a tomar una muestra analítica menor a 2 g para el análisis químico, es preferible que toda la submuestra se muela hasta obtener un tamaño menor a 250 µm de partícula, antes de realizar una submuestra adicional para el análisis.

Se recomienda moler una submuestra de suelo preparado para ser nuevamente molida hasta que la submuestra íntegra pase por un tamiz de 250 µm, o de un tamaño especificado en la metodología elaborada en el laboratorio. Si se va a realizar más de un análisis, se triturará suficiente material hasta el tamaño de partícula más pequeño especificado, para permitir que todos los análisis se realicen en esta submuestra. El tamaño de partícula indicado es común en metodologías donde se requieran determinar el total de cationes contenidos en una muestra, el cual exige una digestión química inicial para una disociación correcta de los analitos.

Figuras 10 y 11: Molienda de la muestra haciendo uso de un mortero de porcelana.

Cabe mencionar que no se permite la molienda para determinar algunos parámetros con extracciones químicas porque aumenta la superficie de la muestra y, por tanto, su reactividad. Si es necesario, la fracción mayor a 2 mm se puede moler y mezclar con la fracción menor a 2 mm, antes de realizar el análisis químico.

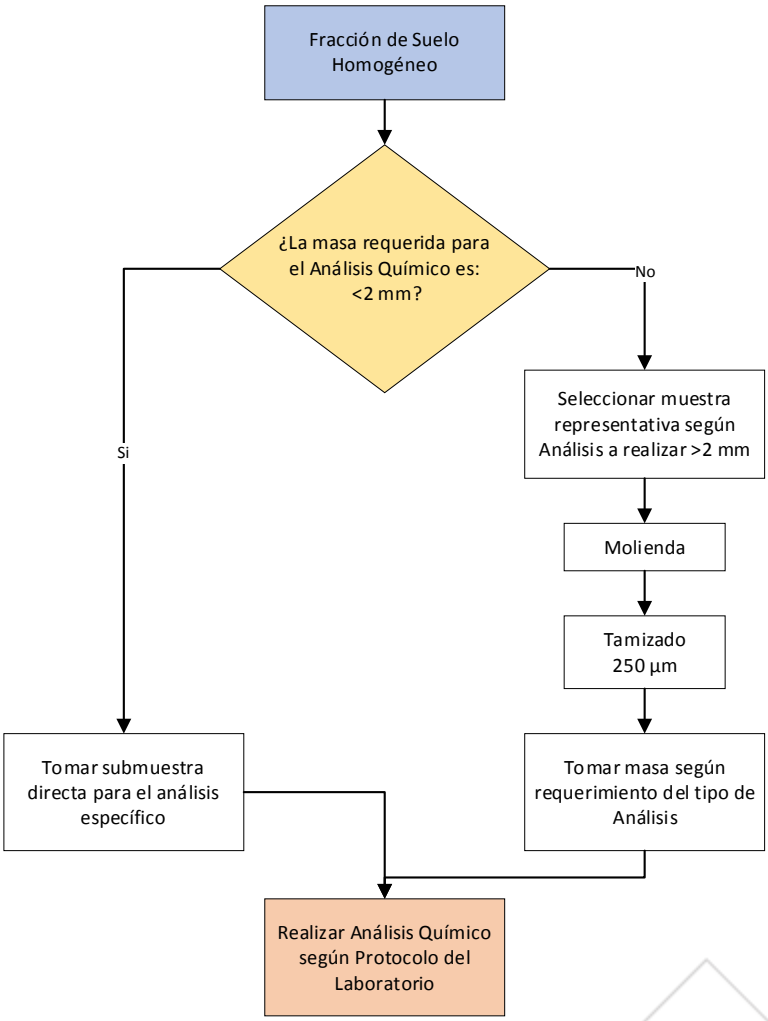


Figura 12: Diagrama de proceso del submuestreo para diferentes fines.

3.7. Tamizado

Una vez molido el suelo pasa por un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10). Cabe mencionar que, para hacer el diagnóstico de la fertilidad de suelo, el grado de fineza del tamizado es lo más requerido en la mayoría de los análisis.

3.8. Homogeneización por agitación mecánica

Esta fase del proceso es muy importante, ya que luego va al empaque y la muestra se encuentra en óptimas condiciones para ser analizadas posteriormente teniendo una representatividad y granulometría adecuada para los diferentes tratamientos al que se va a someter posteriormente.

El homogeneizado se realiza girando la muestra en diferentes direcciones por rotación mecánica con la ayuda de espátulas, de manera que se pueda observar que no existan zonas de mayor concentración de partículas mayores a los 2 mm. Adicionalmente a esto también pueden usarse métodos técnicos de vibración de la muestra total para separar o identificar estos mismos aspectos.

3.9. Determinación gravimétrica de la masa

La metodología menciona que, de la muestra de suelo debidamente tamizada y homogeneizada, se extrae la submuestra que va a ser analizada para cada determinación analítica (entre 200-300 g). Luego a esta submuestra extraída se pesa en la balanza analítica, todo ello teniendo en cuenta la magnitud de pesada a trabajar. Cabe recalcar que la balanza debe estar debidamente calibrada y con el respectivo certificado emitido por la entidad pertinente como el Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO).

Figura 13 y 14: Uso de balanza para la determinación de la masa de la muestra y submuestras.

3.8. Protocolo para Almacenamiento en Condiciones Estándar

Las muestras y submuestras previamente tratadas para su posterior análisis, son almacenadas como custodia para cualquier circunstancia de solicitud de pedido de repetición o estudio, para lo cual, los recipientes deben permanecer herméticamente cerrados y debidamente clasificados con datos cronológicos de recepción de la muestra. Se recomienda conservar el número o código de registro según el laboratorio.

La muestra almacenada puede sufrir cambios dependiendo al tiempo de conserva (tenerlo en cuenta en caso se desee volver a utilizar), para la prestación de un segundo servicio de análisis para la misma muestra según requerimiento del beneficiario es de importancia otorgarle esta información detallada de las condiciones óptimas y el tiempo de almacenamiento, ya que podría incidir en una mayor incertidumbre del resultado final. Para ello no olvidar indicar si el informe de ensayo pertenece a muestras recientes o almacenadas. Asimismo, se debe considerar las condiciones de almacenamiento en lugares adecuados y bajo fecha inicial de almacenamiento para poder identificar el tiempo de almacenamiento. Tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- Guardar la muestra en frascos de vidrio con tapa hermética, bolsas plásticas gruesas tipo ziplock o contenedores plásticos con cierre seguro.
- Evitar envases metálicos que puedan reaccionar con los componentes del suelo.
- Conservar en un lugar sin humedad relativa elevada (≤ 50%).
- Evitar la exposición a fuentes de agua o ambientes húmedos que puedan alterar las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Almacenar a temperatura ambiente controlada entre 20–25 °C.
- Proteger de cambios bruscos de temperatura que favorezcan condensación o degradación de componentes.
- Mantener la muestra en un sitio oscuro o dentro de un contenedor opaco, evitando la exposición directa a la luz solar que pueda modificar la materia orgánica o favorecer el crecimiento microbiano.
- Evitar el contacto con polvo ambiental, gases, solventes, plaguicidas o cualquier agente externo que pueda alterar la composición química.
- Cada muestra debe estar identificada con código, ubicación, fecha de muestreo y responsable.
- La etiqueta debe estar protegida con cinta transparente o adherida al envase de manera que no se borre.
- Para análisis rutinarios, se recomienda procesar las muestras dentro de los 30 días posteriores a su ingreso.
- Si se requieren análisis microbiológicos, el almacenamiento no debe superar los 7 días.

SECCIÓN 2

2. ANÁLISIS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

2.1. Determinación de la densidad aparente (Da) mediante método de cilindro volumétrico

La densidad aparente del suelo se define como una propiedad física fundamental que describe la relación entre la masa (suelo seco) y el volumen total de suelo seco. Esto incluye la fracción sólida y los espacios porosos abiertos (macroporos y microporos).

Indoria et al., 2020 define la densidad aparente como la masa o el peso de cierto volumen del suelo el cual influye en parámetros fisicoquímicos, como en la infiltración (velocidad de entrada de agua al suelo), la porosidad, la profundidad efectiva, la proliferación de las raíces y la disponibilidad de nutrientes.

La densidad aparente es un parámetro muy importante para describir la calidad del suelo y la función del ecosistema. Los valores de densidad aparente altos expresan un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como reducción de la velocidad de infiltración del agua. La densidad aparente depende de la materia orgánica, la textura del suelo, la densidad de las partículas minerales del suelo (arena, limo y arcilla) y su disposición. Como regla general, la mayoría de las rocas tienen una densidad de 2,65 g/cm3, por lo que idealmente, un suelo franco limoso tiene un espacio poroso del 50% y una densidad aparente de 1,33 g/cm^3.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza de precisión 0,01 g. • Estufa de secado (rango de temperatura hasta 105 °C ± 5 °C). • Desecador con sílica gel o equivalente. • Vernier o calibrador digital (0,01 mm). • Cronómetro o temporizador. • Probeta graduada (opcional, en caso de cilindro tipo probeta).	• Cilindro de volumen conocido (100 cm^3 – 250 cm^3) • Muestra de suelo preparada (2 mm). • Hoja de registro. • Papel absorbente o toalla de laboratorio. • Etiquetas adhesivas. • Marcador permanente.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla. • Bata de laboratorio. • Pinzas metálicas o guantes térmicos.

Procedimiento:

1. Es fundamental tener un área de trabajo limpia y libre de contaminantes, todos los equipos limpios, calibrados y en condiciones óptimas de funcionamiento, ya que esto influye en las medidas que afectan de manera significativa al resultado final o su incertidumbre.

2. El cilindro disponible, de medida conocida, tiene que encontrarse libre de humedad, caso contrario debe de secarse en estufa a temperaturas variables dependiendo del material.

3. Posteriormente se determina la masa del cilindro vacío, para ello el cilindro se pesa en una balanza de precisión 0,01 g. Este valor es anotado en la hoja de registro como masa de cilindro vacío.

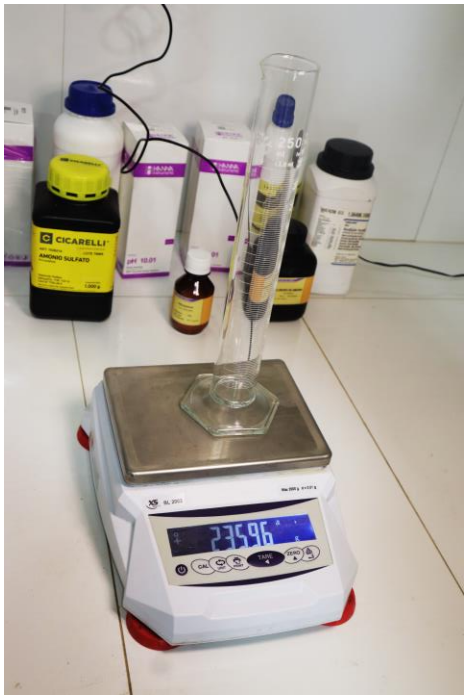


Figura 15: Determinación del peso de la probeta.

4. Posteriormente se realiza el registro del volumen interno del cilindro, expresado en ml. En caso de no contar con un certificado de fábrica del cilindro en uso, es necesario realizar las mediciones correspondientes del diámetro y altura internos del cilindro, esto con la ayuda de un instrumento de precisión Vernier. Valor de pi recomendado de 3,1416 para una aproximación de práctica adecuada.

$$r = 2D \quad ; \quad V = \pi \times r^2 \times h$$

5. En caso de disponer de un cilindro tipo probeta tener definido la unidad y escala de medición. Para la preparación de la muestra es necesario realizar el secado correspondiente, ya que es crucial eliminar cualquier rastro de humedad que se haya podido acumular durante su almacenamiento. Para ello, se introduce la muestra de suelo en el cilindro, llenado completamente hasta el volumen definido para posteriormente llevarlo a una estufa de secado con temperatura controlada de hasta 105°C ± 5 °C y un tiempo de 2 h. Esta acción se realizará hasta que el peso del cilindro lleno se mantenga constante y elimine en su totalidad la humedad higroscópica y capilar. Para confirmar que se ha alcanzado el peso constante, se recomienda realizar pesajes sucesivos en intervalos de dos horas; si la diferencia entre ambos no supera los 0,01 g, se considera que la muestra está completamente seca.

Figura 16 y 17: Secado de la muestra para eliminación de humedad absorbida.

6. Una vez logrado un peso constante en el sistema se deja enfriar en un desecador con el objetivo de evitar que el material absorba nuevamente humedad del ambiente, lo que podría incidir en la masa registrada. El tiempo de enfriado es de 30 min. Luego de cumplir con este periodo se procede a realizar el pesado del cilindro lleno, obteniendo así la masa del cilindro con suelo seco.

Figura 18: Determinación de masa de la probeta con la muestra secada.

Cálculos:

7. Con este dato y el peso del cilindro vacío obtenido al inicio, se calcula la masa de suelo seco mediante la fórmula:

$$m_{suelo\ seco} = m_{suelo\ seco+masa\ de\ cilindro} - m_{masa\ de\ cilindro}$$

Este valor representa exclusivamente la cantidad de materia sólida seca contenida en el volumen de muestra determinado por el cilindro. Finalmente, se calcula la densidad aparente (Da) aplicando la siguiente ecuación:

$$Da = \frac{Peso\ de\ suelo\ seco\ (g)}{Volumen\ del\ cilindro\ (cm^3)}$$

La unidad de resultado es gramos por mililitro (g/cm^3).

8. El resultado final debe registrarse en una hoja de datos del laboratorio, indicando el valor de densidad aparente con tres cifras decimales y anotando cualquier observación pertinente, como irregularidades en la muestra, presencia de raíces, alteraciones en la estructura o condiciones especiales durante el secado. Este procedimiento, realizado cuidadosamente, asegura que el valor de densidad aparente sea representativo y confiable para fines agronómicos, edafológicos o ambientales.

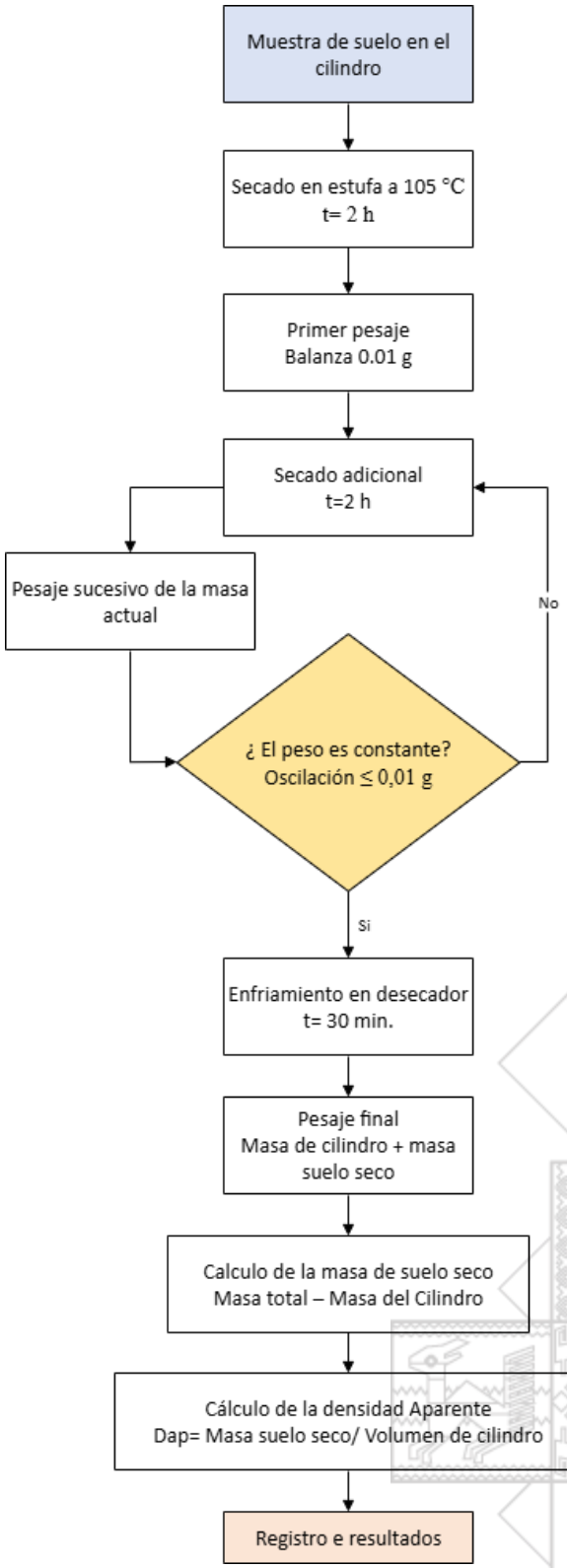


Figura 19: Diagrama de proceso de la determinación de la densidad aparente.

2.1.1. Densidad aparente por técnica de recubrimiento con parafina

El método de la parafina tiene la ventaja de no requerir la toma y el traslado de grandes masas de suelo, además de no requerir el uso de cilindros. También es útil si se desea conocer la densidad de los agregados de un tamaño determinado. El método consiste en recubrir un agregado de suelo con una película de parafina sólida que, mediante pesadas en aire y agua, se determina el volumen desplazado (Blake y Hartge, 1.986). En general se requieren al menos tres repeticiones por situación a analizar, es decir, aproximadamente 3 terrones dan la certeza obtenida con 1 muestra de cilindro. Es necesario conocer la densidad de la parafina sólida, la cual está entre 0,8 - 0,9 g/cm^3 (Sandoval et al., 2.012).

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza de precisión (± 0,01 g). • Hornilla con placa calefactora y termostato (46–68 °C). • Termómetro de laboratorio o sensor digital (precisión ± 0,5 °C). • Probeta graduada (250–500 ml). • Pinzas metálicas o soporte universal con anillo.	• Terrón de suelo intacto, sólido y seco. • Parafina sólida (grado de laboratorio). • Hilo delgado resistente (algodón, nylon o cáñamo). • Agua destilada. • Papel absorbente o toalla de laboratorio. • Recipiente resistente al calor. • Soporte metálico o pinza para manipular el terrón con hilo. • Etiquetas o marcador permanente. • Hoja de registro.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla. • Bata de laboratorio. • Pinzas metálicas o guantes térmicos.

Procedimiento:

1. El proceso debe iniciar con la parafina sólida, la cual se coloca en un recipiente resistente al calor y se funde en una fuente de calor controlada (baño maría o placa calefactora) hasta alcanzar una temperatura de 46–68 °C, medida con un termómetro de laboratorio.

2. Se debe seleccionar un terrón del suelo que sea sólido sin tendencia a desintegración, para posteriormente realizar un amarre de un hilo delgado en la parte media del terrón seleccionado. La masa inicial de todo el sistema se debe determinar haciendo uso de una balanza de precisión ± 0,01 g. Es de importancia que la muestra de terrón seleccionado pase anteriormente por un proceso de secado, ya que la presencia de humedad excesiva en el terrón seleccionado incide de manera considerable en el resultado final de la medición.

3. El terrón debe sumergirse dentro de líquido de parafina en fase líquida con ayuda de pinzas metálicas o un soporte universal, para facilitar su inmersión rápida y uniforme para forzar un descenso de temperatura y causar la solidificación de la parafina sobre la superficie del terrón, formando una película sellante. El recubrimiento es fundamental para impedir que el agua penetre en los microporos del terrón y de esta manera absorba el agua.

4. En cuanto se realiza el secado del recubrimiento de parafina, se procede a realizar una segunda medición de masa, igualmente en una balanza analítica, el nuevo registro de masa corresponde a la masa de del sistema compuesto (terrón seco, hilo y parafina retenida en el recubrimiento).

5. El sistema ya pesado se introduce en una probeta graduada con agua destilada hasta un valor determinado por el analista (250 – 500 ml), el cual permita sumergir el terrón sin tocar el fondo de la probeta. Una vez sumergido el terrón y a causa del principio de Arquímedes, se tiene un desplazamiento del volumen inicial del agua destilada. Este valor lo determinaremos posteriormente por diferencia de pesos.

2.2. Cuantificación de la densidad real (Dr) mediante picnómetro de agua (Método de desplazamiento de fluido)

Se define como la relación que hay entre la masa de la fracción sólida del suelo y el volumen que ocupan exclusivamente dichas partículas minerales, tomando en cuenta que se excluyen completamente los volúmenes de poros o espacios vacíos dentro de cada partícula. Expresado generalmente en g/ml. Este valor es prácticamente constante en la mayoría de los suelos, y oscila en torno a 2,60 - 2,75 g/ml. La posible variación de la densidad real del suelo se debe normalmente a la variación de la cantidad de materia orgánica en el suelo y a la composición mineralógica (cuarzo, feldespatos y micas). A diferencia de la densidad aparente, la densidad real toma en cuenta la unidad de volumen específicamente de cada partícula sólida.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza analítica ± 0,0001 g) • Fuente de calor controlada 80 °C. • Termómetro de laboratorio o sensor digital (± 0,5 °C) • Estufa de secado. • Desecador con agente desecante. • Pinzas metálicas o soporte universal.	• Picnómetro de vidrio con tapa hermética (capacidad estándar: 50 ml o 100 ml). • Muestra de suelo seca y tamizada (≈ 10 g). • Agua destilada. • Papel absorbente o toalla de laboratorio. • Etiquetas o marcador permanente. • Hoja de registro.	• Guantes de nitrilo. • Guantes térmicos. • Mascarilla. • Gafas de seguridad. • Bata de laboratorio.

Procedimiento:

1. Para la determinación de la densidad real se aplica el método del picnómetro, el cual requiere disponer de un picnómetro de vidrio limpio, seco y con su tapa correspondiente, el cual debe secarse en una estufa y enfriarse en desecador antes de iniciar, con el fin de evitar humedad residual. Este instrumento se caracteriza por su precisión volumétrica, su capacidad para minimizar la pérdida de líquido y el atrapamiento de burbujas de aire, así como por su facilidad de manipulación y su bajo margen de error.

2. El proceso inicia con la determinación de la masa del picnómetro vacío y su tapa, utilizando una balanza analítica con resolución de 0,0001 g. Este valor se registra como dato de referencia esencial para los cálculos posteriores. Es fundamental realizar un manejo adecuado del instrumento, considerando su limpieza y secado previo, así como las incertidumbres asociadas a los equipos de medición.

3. Posteriormente, se introduce en el picnómetro una muestra de suelo previamente secada para eliminar cualquier humedad residual que pueda afectar los cálculos. Para un picnómetro estándar, se recomienda una masa de aproximadamente 10 g, con el fin de contar con suficiente material sin exceder la capacidad del instrumento. Una vez cargado, se procede a pesar el conjunto (picnómetro, muestra) en la misma balanza analítica, manteniendo

condiciones consistentes de medición. Este valor se registra como la masa del sistema completo.

4. A continuación, se añade agua destilada hasta aproximadamente el 50% de la capacidad del picnómetro. Para eliminar el aire atrapado, el picnómetro se coloca en una fuente de calor controlada (baño maría o placa calefactora) hasta 80 °C, monitoreando la temperatura con un termómetro de laboratorio y evitando la ebullición violenta. Este paso es crítico, ya que la presencia de burbujas de aire altera el volumen del líquido, lo que genera errores en los resultados y aumenta la incertidumbre de la medición. La manipulación del picnómetro caliente debe realizarse con el EPP correspondiente (pinzas metálicas o guantes térmicos).

6. Una vez eliminadas las burbujas, se completa el llenado con agua destilada hasta el enrase, asegurando la correcta nivelación del líquido. Se determina y registra la masa del picnómetro en su estado completo (picnómetro, suelo, tapa y agua).

7. Finalmente, se vacía el contenido del picnómetro y se realiza una limpieza exhaustiva para eliminar cualquier residuo de suelo. Luego, se llena el picnómetro únicamente con agua destilada hasta el enrase, y se determina su masa. Simultáneamente, se registra la temperatura del agua destilada con un termómetro para aplicar las correcciones necesarias en los cálculos finales de la densidad real.

Cálculos:

$$Dr = \frac{Dw(Ws - Wa)}{(Ws - Wa) - (Wsw - Ww)}$$

Dónde:

Dr = Densidad real.
Dw =densidad del agua a la temperatura observada.
Ws =peso del picnómetro más el suelo.
Wa = peso del picnómetro vacío.
Wsw =Peso del picnómetro más suelo más agua.
Ww = peso del picnómetro más agua.

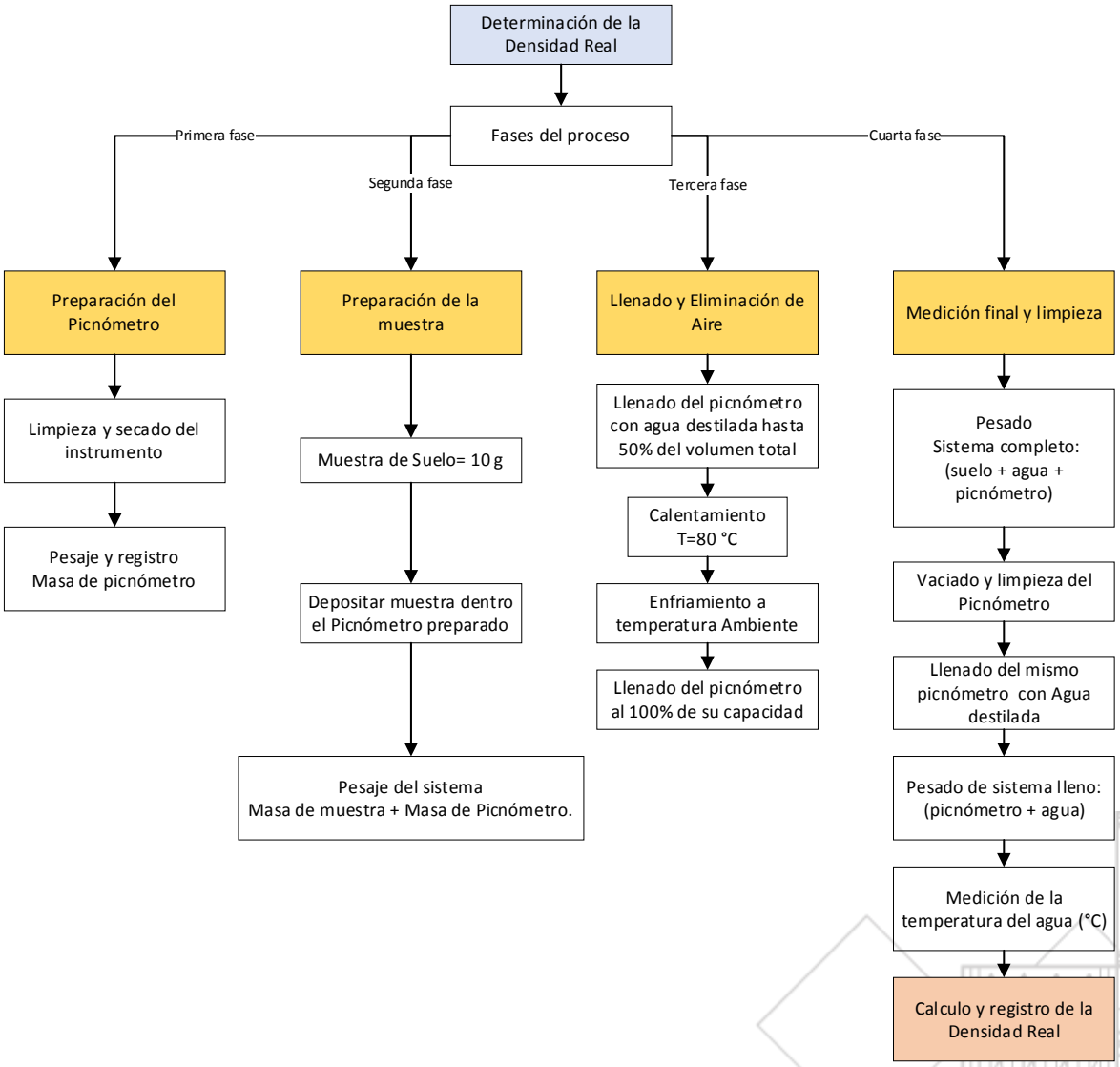


Figura 20: Diagrama de proceso de la determinación de la densidad real.

2.3. Determinación gravimétrica del contenido de humedad por secado

El contenido de humedad del suelo se define como la cantidad de agua, expresada en términos de masa o volumen, presente en una masa determinada de muestra de suelo. Su determinación se realiza generalmente mediante el método gravimétrico, el cual cuantifica la pérdida de peso de una muestra con humedad original tras ser secada en una estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante. Este parámetro es fundamental, dado que influye directamente en propiedades edáficas como la compactación, la aireación, la permeabilidad y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La metodología empleada en nuestro laboratorio será la gravimétrica, debido a su sencillez operativa y su alta precisión.

Para la implementación de esta metodología, es necesario considerar aspectos importantes descritos en la literatura especializada. En primer lugar, la pérdida de peso debe ser expresada en porcentaje con respecto al peso de la muestra seca (Porta et al., 2.003). Adicionalmente, se debe tener presente que la humedad edáfica presenta una elevada variabilidad espacial y temporal. Asimismo, durante el proceso de secado a 105 °C, pueden ocurrir procesos de descomposición de ciertas fracciones de la materia orgánica y de otros compuestos volátiles, por lo que la muestra no podrá ser reutilizada para otros ensayos posteriores (Bazán, 2.017).

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Estufa de secado calibrada y estabilizada (105 °C ± 2 °C) • Balanza analítica (± 0,01 g). • Desecador con agente desecante (sílica gel o equivalente). • Pinzas metálicas. • Cronómetro o temporizador.	• Cápsulas o crisoles (resistentes a 105 °C). • Muestra de suelo (30–50 g). • Etiquetas o marcador permanente. • Papel absorbente o toalla de laboratorio. • Hoja de registro.	• Guantes de nitrilo. • Guantes térmicos. • Mascarilla. • Bata de laboratorio

Procedimiento:

1. Para la determinación de humedad en una muestra de suelo, es imperativo considerar la limpieza y el secado correcto de los recipientes. Las cápsulas deben secarse en estufa a 105 °C durante 8 horas y enfriarse en un desecador con agente desecante antes de ser pesadas, evitando toda manipulación directa con las manos mediante el uso exclusivo de pinzas, lo que garantiza la eliminación de cualquier traza de humedad residual en el material.

Figura 21: Manipulación de crisoles para su secado en horno.

2. Posteriormente, y teniendo en cuenta los cuidados técnicos para prevenir la absorción de humedad ambiental, se procede al pesado de la cápsula utilizando una balanza analítica con una precisión de ± 0,0001 g este valor se registra como el peso de la cápsula vacía y seca, incluyendo la tapa.

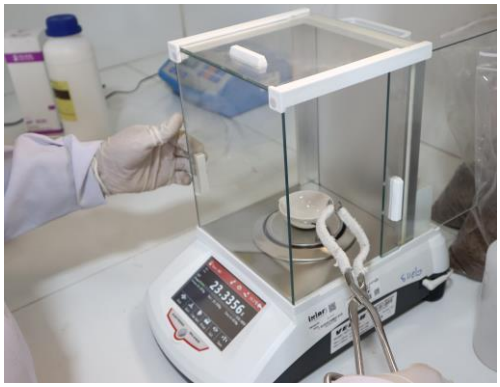


Figura 22 y 23: Determinación de la masa del crisol desecado en balanza analítica.

3. Por otra parte, la muestra de suelo debe tener una masa entre 30 y 50 g para asegurar su representatividad. Dicha muestra se deposita dentro de la cápsula con sumo cuidado para evitar pérdidas de material.

4. A continuación, se pesa la cápsula con la muestra húmeda, obteniendo así el valor correspondiente al peso de la cápsula más el suelo húmedo. Es crucial que todas las mediciones se realicen con meticulosidad para minimizar la introducción de errores significativos.

Figura 24 y 25: Pesaje de la muestra de suelo en balanza analítica.

5. La cápsula con la muestra se introduce entonces en el horno de secado, manteniéndose a una temperatura constante de 105 °C durante un período aproximado de 24 horas, tiempo necesario para asegurar la eliminación completa de toda traza de humedad libre.

Figura 26: Reingreso de la capsula con la muestra en el horno de secado.

6. Transcurrido este tiempo, las cápsulas deben retirarse exclusivamente con pinzas metálicas o guantes térmicos para evitar accidentes y contaminación y ser transportadas inmediatamente a un desecador para lograr un enfriamiento a temperatura ambiente, minimizando así su exposición a la humedad ambiental. Una vez fría, la cápsula se pesa inmediatamente después de ser retirada del desecador, registrando el peso de la cápsula más el suelo seco. Si las condiciones del laboratorio presentan una humedad relativa elevada, como en zonas tropicales, es necesario someter la cápsula a un calentamiento adicional en el horno por una hora y repetir el proceso hasta obtener una variación de masa inferior a 0,001 g entre pesadas consecutivas.

Figura 27: Determinación de la masa de la capsula con la muestra libre de humedad.

Cálculos:

$$Humedad\ (\%) = \frac{(Pc + Wsh) - (Pc + Wss)}{(pc + Wss) - pc} * 100\%$$

Donde:

Pc = Peso de la capsula (g).
Wsh = Peso de suelo Húmedo.
$Pc + Wsh$ =Peso de la capsula más el peso del suelo Húmedo (g).
$Pc + Wss$ = Peso de la capsula más el peso del suelo seco (g).

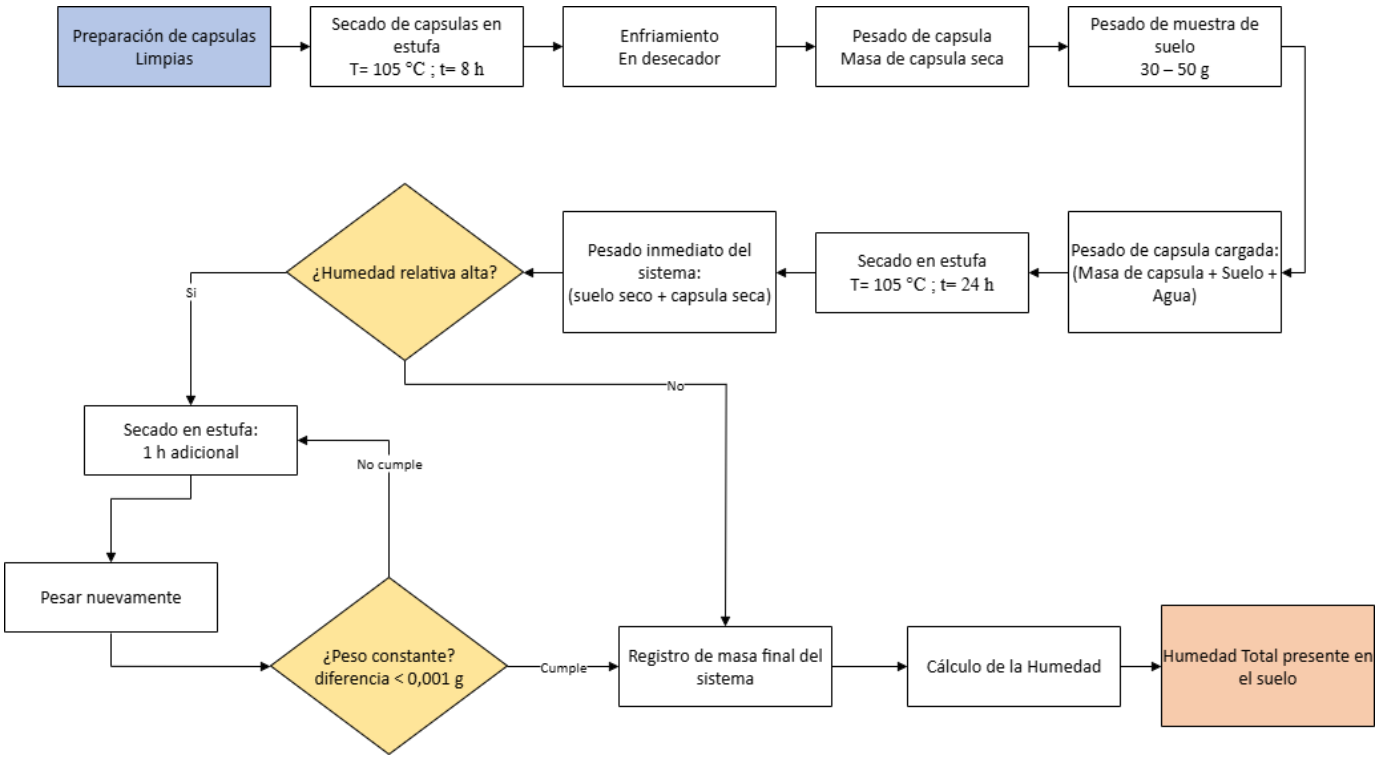


Figura 28: Diagrama de proceso de la determinación de humedad en la muestra.

2.4. Textura del suelo (determinación del tamaño de partículas)

De acuerdo con Bouyoucos (1.962), el método del hidrómetro se fundamenta en la ley de Stokes, la cual establece una relación directa entre el diámetro equivalente de las partículas y su velocidad de sedimentación. Este principio permite determinar la distribución de tamaños de partículas, un parámetro físico fundamental para caracterizar el comportamiento de las fracciones minerales del suelo.

La composición granulométrica considerada en este documento corresponde a la clasificación convencional en arena, limo y arcilla, ampliamente descrita en la literatura especializada. Dicha clasificación categoriza las partículas del suelo según su diámetro equivalente: la arena comprende partículas con un tamaño entre 0,05 mm y 2 mm; el limo se define en el intervalo de 0,002 mm a 0,05 mm; y la arcilla incluye aquellas partículas con diámetro inferior a 0,002 mm.

Estas fracciones granulométricas confieren propiedades distintivas al suelo, dado que su interacción con las moléculas de agua y otros componentes determina, en gran medida, su comportamiento físico-químico y su relación con el sistema radicular de las plantas.

2.4.1. Ley de Stokes

Para comprender el comportamiento de partículas en interacción con un líquido se debe tener en cuenta algunos conceptos definidos por la ley de Stokes, quien describe cómo actúa una partícula esférica a través de un fluido viscoso. En otras palabras, se define como una fuerza proporcional al radio de la partícula, la viscosidad del fluido y la velocidad relativa entre ambos.

Las partículas se evalúan por su velocidad de sedimentación de la suspensión en una solución de agua, lo cual es útil para cuantificar el tamaño de las partículas. Medina-González et al. (2.007) explican de forma más detallada que, sobre una partícula de suelo en una solución líquida, actúan dos fuerzas fundamentales. Una de las fuerzas, Fab (fuerza constante), dirigida hacia abajo, dada por diferencia de peso entre la partícula de suelo y el líquido desplazado:

$$Fab = g(m_s - m_l)$$

Donde:

g = Aceleración de la gravedad.
$m_s - m_l$ = Masa de las partículas del suelo menos Masa del líquido desplazado.
Fab = Fuerza constante

Considerando que la partícula tiene forma perfectamente esférica, la ecuación anterior puede ser escrita como:

$$Fab = \frac{1}{6} \times \pi \times g \times \chi_3(\rho_S - \rho_l)$$

Donde:

χ_3 = Diámetro de la partícula
ρ_S = Densidad del suelo
ρ_l = Densidad del líquido

La otra fuerza que actúa sobre la partícula es la fuerza de Stokes (Far), y está dirigida hacia arriba:

$$Far = 3\pi \times \chi \times \eta \times \upsilon$$

Donde:
η = Viscosidad del líquido.
υ = Velocidad de caída de la partícula
Far = Fuerza de Stokes

A medida que se incrementa la velocidad de la partícula como consecuencia de la fuerza de impulsión (Fab), se genera un aumento proporcional en la fuerza de resistencia viscosa (Far). Cuando ambas fuerzas alcanzan una condición de equilibrio, la partícula sedimenta con una velocidad constante, denominada velocidad terminal.

Mediante la igualación de ambas expresiones de fuerza, se deriva la ecuación que define la velocidad final de sedimentación. La aplicación de esta ecuación requiere el cumplimiento de cuatro postulados fundamentales: en primer lugar, que la velocidad (v) se alcanza de forma instantánea al iniciarse la sedimentación; en segundo término, que el proceso de decantación y la resistencia fluidodinámica están exclusivamente gobernados por la viscosidad del fluido; como tercera condición, que las partículas presentan una morfología lisa y esférica; y finalmente, que no existe interacción alguna entre las partículas circundantes.

$$v = \frac{g(\rho s - \rho l)X^2}{18\eta}$$

2.4.2. Análisis granulométrico por sedimentación: método del hidrómetro de bouyoucos

Como se definió previamente, la metodología se fundamenta en la ley de Stokes. No obstante, durante su aplicación se deben considerar diversas fuentes de error sistemático. Entre estas, se incluyen las fluctuaciones térmicas de la suspensión, las cuales afectan directamente la viscosidad del medio; el incremento en la densidad de la solución debido a la adición de agentes dispersantes; y el error de paralaje asociado a la lectura del menisco del líquido en el hidrómetro. La corrección de estos factores es indispensable para garantizar la precisión de los resultados en la determinación granulométrica.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza analítica (± 0,0001 g). • Placa calefactora con control de temperatura. • Agitador mecánico. • Cronómetro o temporizador. • Hidrómetro de Bouyoucos (graduación en g/L). • Termómetro de laboratorio (precisión ± 0,5 °C). • Campana extractora.	• Muestra de suelo (60 g en arcillosos, 120 g en arenosos) • Vasos de precipitado de 500 ml y de 250 ml. • Probeta graduada de 1 L o cilindro de Bouyoucos. • Agitador de madera. • Hidrómetro. • Parafilm. • Papel absorbente o toalla de laboratorio. • Etiquetas o marcador permanente. • Hoja de registro. • Pipeta graduada 20 ml.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla o respirador para vapores tóxicos. • Gafas de seguridad. • Bata de laboratorio. • Guantes térmicos.

Reactivos

• Agua oxigenada (H_2O_2) 8,82 M.
• Oxalato de sodio ($Na_2C_2O_4$) 0,224 M.
• Metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) 0,410 M.
• Hexametafosfato de sodio $(Na_3PO_3)_6$. 0,0817 M.

Procedimiento:

1. La metodología propuesta emplea una masa de suelo de 60 g para muestras de textura arcillosa, o de hasta 120 g para aquellas de aspecto grueso arenoso. La muestra, previamente pesada en una balanza analítica, se deposita en un vaso de precipitado de 500 ml.

2. Posteriormente, se adicionan 50 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) bajo agitación constante hasta la conclusión de la efervescencia. La manipulación de H_2O_2 debe realizarse bajo campana extractora y con el uso de EPP completo para evitar inhalación de vapores.

Figura 29 y 30: Depósito de Peróxido de Hidrógeno.

3. Para el proceso de secado, el vaso debe colocarse sobre la placa calefactora controlando la temperatura, utilizando guantes térmicos para manipularlo y papel absorbente para limpiar cualquier residuo, agregando posteriormente 40 ml adicionales de H_2O_2 tras 5 minutos de calentamiento a temperatura moderada. Este procedimiento se repite iterativamente hasta la completa desaparición de la efervescencia.

Figura 31 y 32: Adición de agua destilada y agitación en calor.

4. Una vez seca la muestra, se pesan 50 g (para suelos arcillosos) o 100 g (para suelos arenosos) del material tratado, transfiriéndolo a un vaso de precipitado limpio y seco de 250

ml. A este se le incorporan 70 ml de agua destilada, 5 ml de oxalato de sodio ($Na_2C_2O_4$) y 7 ml de metasilicato de sodio (Na_2SiO_3), con el objetivo de iniciar la dispersión de las partículas. Los volúmenes deben medirse cuidadosamente utilizando pipetas o probetas auxiliares limpias y secas.

Figura 33: Adición de reactivos preparados en matraces aforados a la muestra en reacción.

5. La solución se deja en reposo durante 15 a 30 minutos para permitir la reacción y dispersión efectiva. Transcurrido este período, se somete a agitación mecánica durante 5 minutos para garantizar la interacción completa de los reactivos con las partículas del suelo.

Figura 34: Agitación de la muestra en equipo de agitacón magnética.

6. Posteriormente, la suspensión se transfiere a una probeta graduada de 1 L o, idealmente, a un cilindro de Bouyoucos, enrasando con agua destilada hasta alcanzar el volumen final de 1 litro.

Figura 35: Muestra en suspensión para su posterior lectura.

7. Antes de iniciar las mediciones con el hidrómetro, la suspensión debe ser agitada vigorosamente durante 1 minuto para homogeneizarla, utilizando para ello un agitador de madera de longitud adecuada para evitar daños en el recipiente y favorecer la ruptura de agregados. Alternativamente, puede cerrarse la probeta con Parafilm y agitarse manualmente de forma continua durante el mismo tiempo.

8. Inmediatamente después de la homogenización, se introduce cuidadosamente el hidrómetro de Bouyoucos en la suspensión, manteniéndolo sumergido durante 40 segundos, al cabo de los cuales se registra el valor de densidad de la suspensión correspondiente a este tiempo inicial.

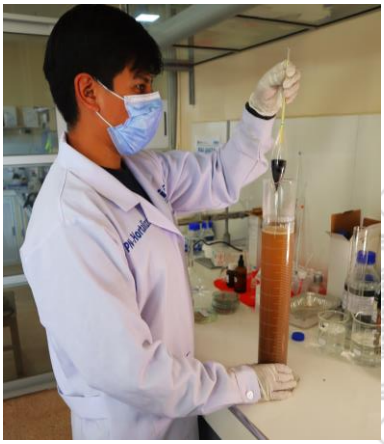


Figura 36: Lectura de la densidad de la suspensión de particulas.

9. Tras esta primera lectura, se retira el hidrómetro con sumo cuidado para evitar perturbaciones y se mide inmediatamente la temperatura de la suspensión, dato indispensable para las correcciones posteriores.

10. La suspensión se deja en reposo durante 2 horas para permitir la sedimentación de las partículas. Cumplido este tiempo, se realiza una segunda medición de densidad, con el mismo cuidado para evitar agitaciones bruscas. Se mide simultáneamente la temperatura de la suspensión con un termómetro de precisión ±0,5 °C, indispensable para la corrección de densidad.

11. La incertidumbre del método depende críticamente de la eficacia de la dispersión inicial de las partículas, por lo que esta etapa requiere especial atención para prevenir una sedimentación prematura y la obtención de mediciones erróneas.

Cálculos:

$$\%Arena = \frac{Primer\ lectura\ de\ la\ densidad}{Peso\ de\ la\ muestra} \times 100\%$$

$$\%Arcilla = \frac{Segunda\ lectura\ de\ la\ densidad}{Peso\ de\ la\ muestra} \times 100\%$$

$$\%Limo = 100 - (\%Arena + \%Arcilla)$$

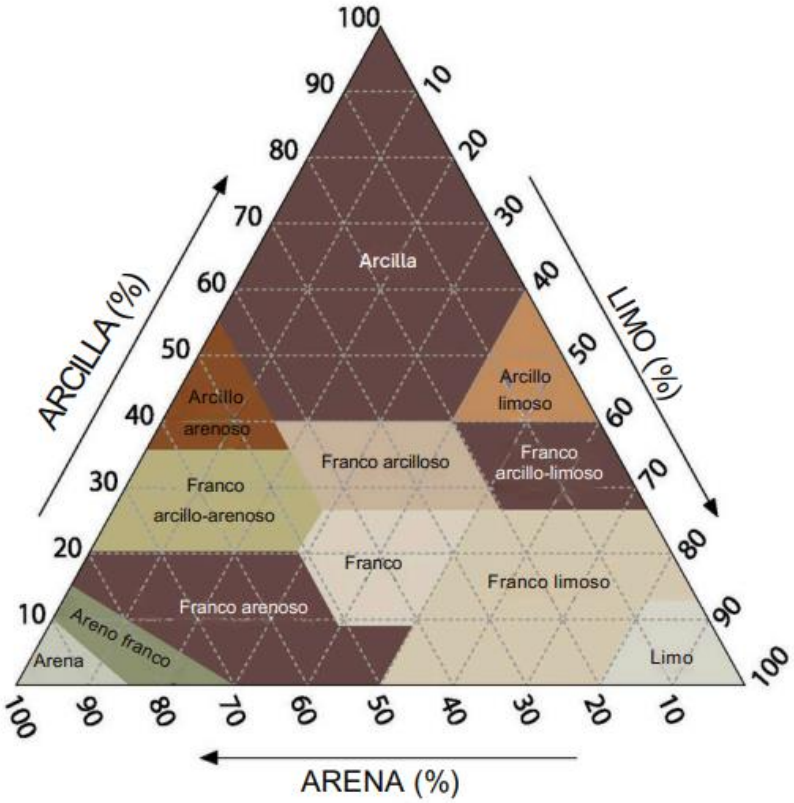


Figura 37. Triangulo textural (Soil Science Society of America (SSSA).

• Para determinar la clase textural, se utiliza el triángulo textural utilizando el porcentaje de arena, arcilla y limo.

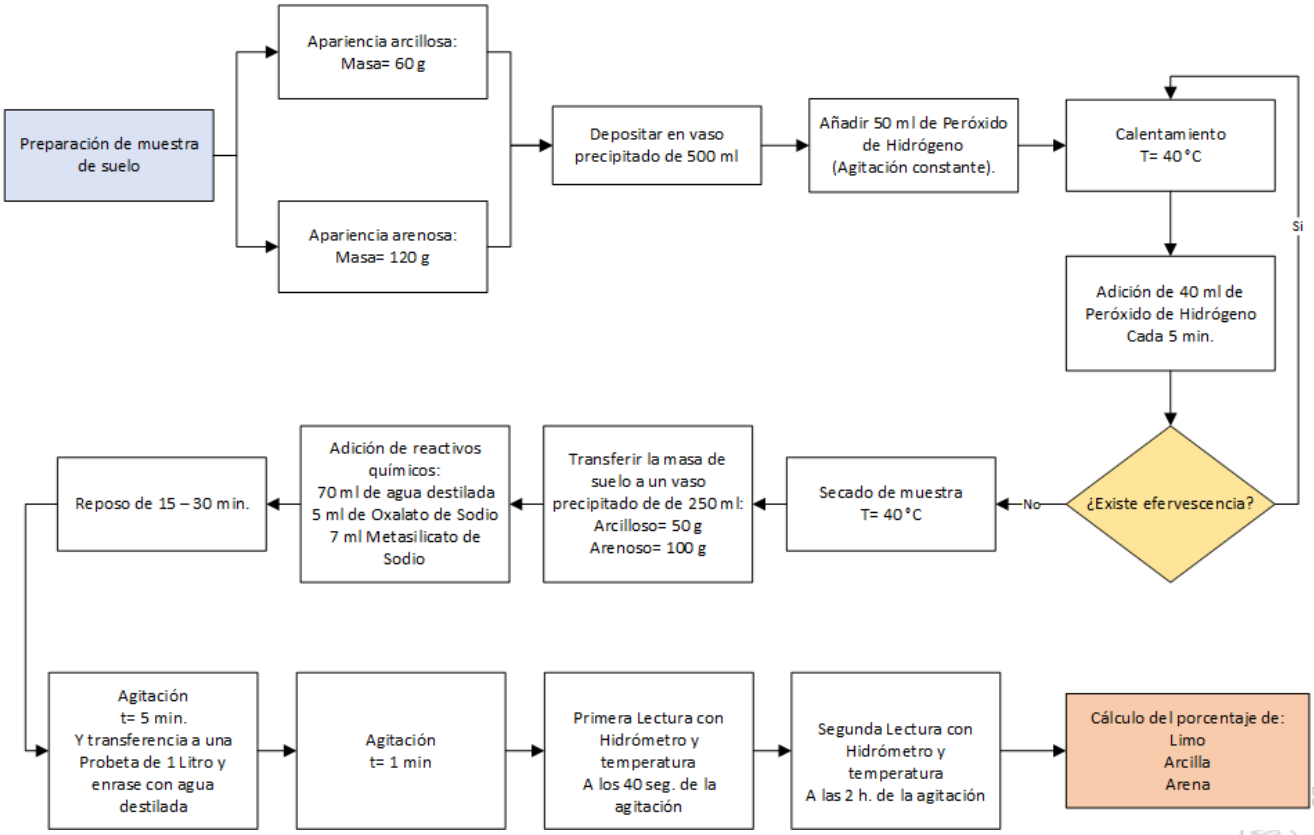


Figura 38. Diagrama de proceso de la determinación de la textura del suelo.

SECCIÓN 3

3. ANÁLISIS DE PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

3.1. Cationes intercambiables del suelo (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}) por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

Los cationes de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+} presentes en el suelo, son nutrientes esenciales para la asimilación de los plantines hortícolas, estos cationes pueden desplazarse por la interacción de un catión de un electrolito neutro. Su importancia en los cultivos hortícolas radica en la disposición correcta de una evaluación de la fertilidad y capacidad de intercambio catiónico en la parcela, estos parámetros tienen relación directa con la disponibilidad de nutrientes para las plantas y con la salud del suelo.

Los valores de Calcio influyen directamente en las paredes celulares, regulando la asimilación de nutrientes y ayudando en la circulación de arcillas. La no detección temprana de esta deficiencia incurre en la provocación de fisiopatías como pudrición apical en el tomate.

En cuanto al Magnesio, está presente en la estructura química de la clorofila, como átomo central, lo cual lo hace indispensable para un proceso adecuado de fotosíntesis. Además, toma un papel importante en la activación de enzimas y en el transporte del adenosín trifosfato (ATP). Su deficiencia repercute en la absorción de esta molécula importante.

Por otro lado, el potasio es el responsable de la regulación de apertura y cierre de estomas, ayuda a la resistencia a diferentes tipos de estrés, entre ellos el hídrico y enfermedades, también está relacionado con la calidad final de los frutos y en la postcosecha.

Finalmente, el sodio es un componente del suelo que no es esencial para la mayoría de las hortalizas, pero en caso de deficiencia del potasio el sodio cumple funciones similares, sin embargo, un exceso de este catión puede causar salinidad elevada en el suelo y toxicidad iónica. Como se mencionó anteriormente, el diagnóstico temprano de estos parámetros (deficiencias o excesos), pueden ayudar a realizar programas de fertilización balanceada para la prevención de problemas de salinización del suelo. Además de esto ayuda directamente al productor boliviano a mejorar la realización de enmiendas optimizando el uso de Cal agrícola, dolomita y fertilizantes en general.

3.1.1. Fundamentos de Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

La espectrofotometría de absorción atómica se fundamenta en la interacción de la materia con la energía radiante dentro de un rango específico de longitud de onda, el cual, para esta técnica, abarca desde 180 hasta 789 nanómetros. Este principio permite determinar elementos específicos que absorben energía en dicha región del espectro electromagnético.

La base teórica de esta interacción radica en la ley de Beer-Lambert, la cual establece una relación directamente proporcional entre la absorbancia de la muestra y la concentración del analito de interés cuando un haz de luz monocromática atraviesa la sustancia.

En el espectrofotómetro de absorción atómica, la fuente de radiación corresponde a una lámpara de cátodo hueco, específica para cada elemento analizado. La llama, donde se produce la atomización y excitación de los elementos, funciona como celda de muestra. Posteriormente, la energía radiante residual alcanza un sistema de detección que cuantifica la cantidad de energía absorbida por el analito.

La calibración del equipo se realiza mediante la preparación de una serie de soluciones estándar con concentraciones conocidas del elemento de interés, registrando sus valores de absorbancia correspondientes. Esta curva de calibración constituye el patrón de referencia que, mediante interpolación de los datos, permite determinar la concentración de la muestra problema.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Agitador magnético con control de velocidad. • Centrífuga (con tubos compatibles de 50 ml o 100 ml). • Espectrofotómetro de Absorción Atómica (AAS) con: Lámparas de cátodo hueco para Ca y Mg. • Sistema de combustión	• Matraz Erlenmeyer de 200 ml. • Frasco de vidrio de 250 ml. • Tubos o columnas de lixiviación (si no se usa centrifuga). • Pipetas volumétricas o automáticas (precisión 0,1 ml). • Probetas graduadas (100–250 ml). • Matraz aforado 100	• Guantes de nitrilo. • Guantes térmicos. • Mascarilla. • Bata de laboratorio. • Cubrebocas.

(acetileno/aire). • pH-metro calibrado (±0,01 unidades). • Balanza analítica (0,0001 g). • Centrífuga Con rotor para matraces o tubos de 50 ml.	ml, 500 ml, 1.000 ml. • Micropipetas y puntas rangos de 100-1000 µl, 10-100 µl. • Vasos de precipitados 250 ml, 500 ml. • Embudo de Vidrio. • Papel de filtro Whatman No. 42 o similar.

Reactivos:

- Acetato de amonio (NH_4 OAc) 1M a pH 7
- Solución de Lantano al 1%.
- Agua destilada.
- Ácido Acético (CH_3COOH) 0,1 M.
- Hidróxido de Amonio (NH_4OH) 0,1M.

Procedimiento:

1. Para la metodología propuesta, es requisito disponer de una submuestra de por lo menos 35 gramos de suelo proveniente del tratamiento inicial, tamizado a 2 mm y correctamente secado, con el fin de garantizar que la reacción se efectúe exclusivamente en la fracción fina y se active la totalidad de los sitios de intercambio catiónico.

2. El tratamiento inicia con la introducción de 20 gramos de muestra de suelo en un matraz Erlenmeyer de 200 ml, al cual se adicionan 100 ml de una solución de acetato de amonio 1 M previamente preparada. La mezcla se homogeniza mediante agitación a velocidad constante, para posteriormente ajustar el pH de la solución a un valor de 7,0 unidades de pH, este ajuste debe realizarse exclusivamente con el uso de Ácido Acético (CH_3COOH) e Hidróxido de Amonio (NH_4OH) diluidos.

3. La suspensión se somete a agitación constante a velocidad media durante 30 minutos, permitiendo así la completa interacción entre la fase líquida y la fase sólida. La separación de fases se realiza idealmente mediante centrifugación A 3.000 rpm por 30 min. Después de centrifugar, se decanta o pipetea el sobrenadante y se filtra a través de papel de filtro Whatman N°42 (o equivalente) para obtener un extracto límpido de interés analítico y libre de partículas. Alternativamente, puede emplearse un sistema de lixiviación en columna o tubo, recogiendo el

extracto en un frasco de vidrio de 250 ml limpio y estéril, para su preservación hasta el análisis mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

Figura 39 y 40: Filtración de las muestras posterior a la centrifugación para los distintos cationes a ser analizados.

4. Es imperativo que la concentración de cationes en el extracto se encuentre dentro del rango lineal de operación del equipo. Concentraciones superiores a este límite, determinado por el ingeniero operador, pueden generar errores significativos en las lecturas, por lo que se recomienda realizar una dilución previa cuando sea necesario. Asimismo, deben considerarse las estimaciones de incertidumbre asociadas a todo el proceso analítico, dado su impacto en la desviación de los resultados respecto al valor verdadero. Además de realizar el correcto depósito de las lámparas según la longitud de onda requerida.

Figura 41: Depósito de lámparas de cátodo hueco según la longitud de onda requerida.

5. Para la determinación de calcio y magnesio, se recomienda adicionar cloruro de lantano ($LaCl_3$) al extracto, con el objetivo de minimizar interferencias causadas por exceso de fosfatos o sulfatos.

6. Previo a las mediciones, el equipo de Absorción Atómica el equipo debe calibrarse con una curva de al menos 5 puntos, preparada diluyendo patrones certificados de 1.000 mg/L en una matriz que simule al extracto: acetato de amonio 1 M diluido y con la misma concentración de Cloruro de Lantano que las muestras, además asegurando el precalentamiento correcto de la lámpara de cátodo hueco correspondiente al elemento analizado, la verificación del blanco reactivo (libre de los cationes de interés) y el ajuste de los flujos de combustible y aire, junto con la correcta alineación del quemador.

Figura 42: Dilución de los patrones certificados según la cantidad de puntos para la curva.

7. Analizar al menos una duplica de cada muestra para calcular la desviación estándar y verificar la precisión del método.

Figura 43: Operación del equipo Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA).

8. Los extractos que no se vayan a analizar inmediatamente deben ser refrigerados a 4°C en frascos herméticos para evitar alteraciones microbiológicas o químicas.

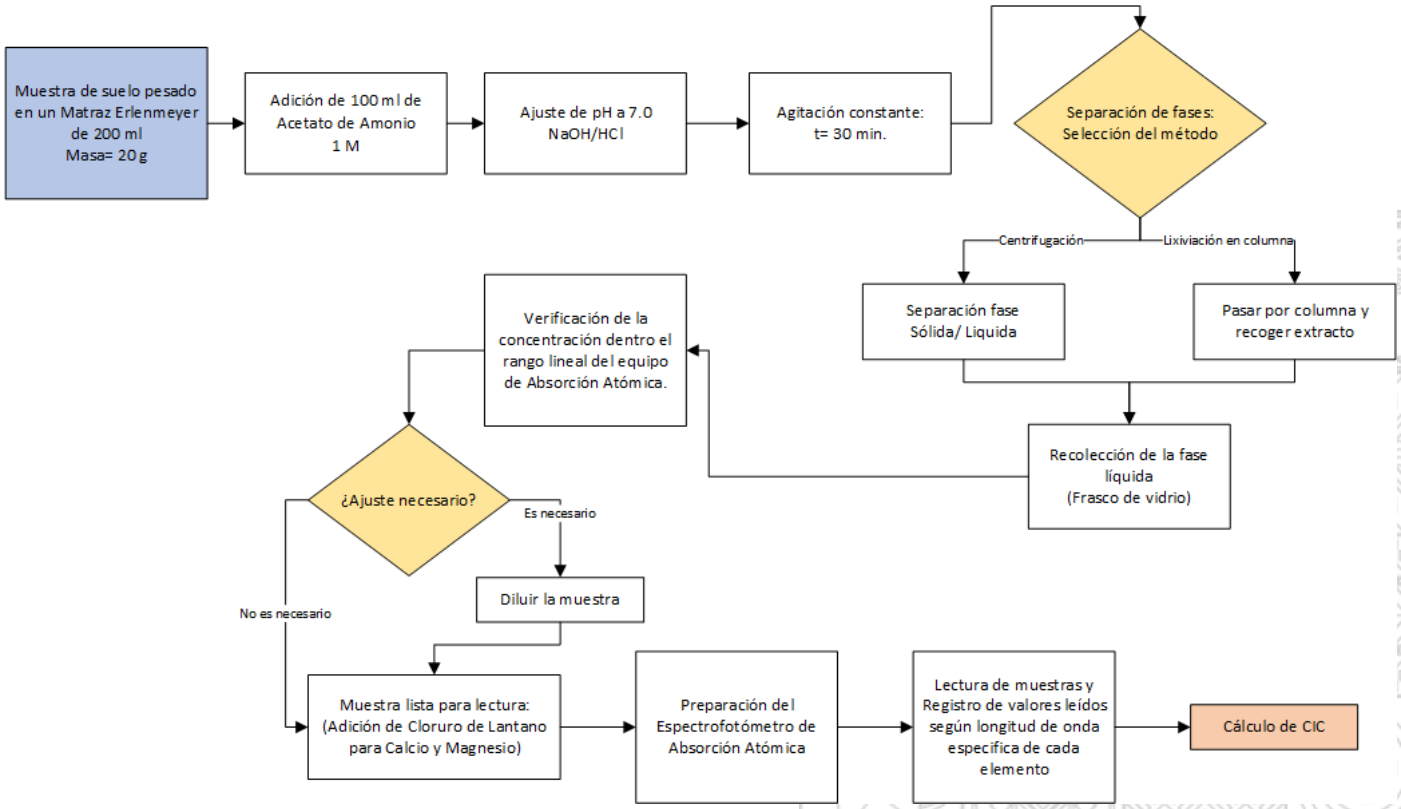


Figura 44: Diagrama de proceso del análisis químico de cationes intercambiables del suelo.

3.2. Materia orgánica método por titulación de Walkley – Black

La determinación de la materia orgánica total está basada en la determinación de carbono (C) por diferentes procedimientos. Los valores en carbono total encontrados incluyen: los restos vegetales y animales recién depositados en el suelo, la fracción húmica en su proceso de mineralización, la fracción húmica en su proceso de humificación; y formas inertes de carbono elemental, tales como carbón, grafito, que algunas veces se presentan en grandes cantidades en los suelos. Los valores de carbono se expresan en porcentaje y también como porcentaje de materia orgánica (M.O.) al multiplicarse el porcentaje de carbono por el factor convencional de van Vammelen (1.724). El uso de este factor se ha generalizado en la consideración de que la MO del suelo contiene en promedio 58 % de carbono (Fassbender, 1.987).

La determinación del carbono orgánico del suelo se basa en el método de oxidación húmeda con ácido crómico Walkley & Black. El carbono orgánico (CO) del suelo se oxida mediante una solución de dicromato de potasio 0,167 M ($K_2Cr_2O_7$) en ácido sulfúrico concentrado El calor de reacción eleva la temperatura que es suficiente para inducir una oxidación sustancial. La reacción es la siguiente (Bazán, 2.017).

La materia orgánica del suelo es la fracción del suelo que se compone de tejido vegetal o animal en diversas etapas de descomposición. La mayoría de los suelos agrícolas productivos tienen entre el 3 y 6% de materia orgánica.

La materia orgánica proporciona una serie de beneficios sobre las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

$$8H_2SO_4 + 3C + 2K_2Cr_2O_7 \rightarrow 2K_2SO_4 + 2Cr_2(SO_4)_3 + 3CO_2 + 8H_2O$$

$$\begin{array}{rl} 4(Cr^{6+} + 3e^-) \rightarrow Cr^{3+} & Reducción \\ 3(C - 4e^-) \rightarrow C^{4+} & Oxidación \end{array}$$

$$4Cr^{6+} + 3C \rightarrow 4Cr^{+3} + 3C^{+4}$$

El $K_2Cr_2O_7$ reducido durante la reacción con el suelo, es proporcional al carbono orgánico oxidable presente en la muestra. A continuación, se puede estimar el carbono orgánico midiendo el dicromato no reducido restante, titulando por retroceso con sulfato ferroso o sulfato ferroso amónico, usando difenilamina o complejo o-fenantrolina-ferroso como indicador.

$$K_2Cr_2O_7 + 6FeSO_4 + 7H_2SO_4 \leftrightarrow K_2SO_4 + Cr_2(SO_4)_3 + 3Fe_2(SO_4)_3 + 7H_2O$$

La materia orgánica del suelo es la fracción del suelo que se compone de tejido vegetal o animal en diversas etapas de descomposición. La mayoría de los suelos agrícolas productivos tienen entre el 3 y 6% de materia orgánica.

La materia orgánica proporciona una serie de beneficios sobre las diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Balanza analítica Precisión ± 0,0001 g, para pesar 0,5 g de muestra. • Placa calefactora Control de temperatura (hasta 200°C). • Campana de extracción de gases.	• Matraz Erlenmeyer 250 ml o 500 ml. • Bureta 50 ml, con llave de teflón. • Soporte universal con pinzas para bureta y matraz Erlenmeyer 100 ml. • Pipetas volumétricas 10 ml, 25 ml. • Pipetas graduadas 10 ml, 25 ml. • Probeta 100 ml. • Vaso de precipitados 250 ml. • Varilla de vidrio. • Frasco lavador 500 ml, con agua destilada. • Cuentagotas.	• Gafas de seguridad de protección lateral. • Guantes de nitrilo. • Bata de laboratorio. • Protector facial.

Reactivos:

- Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1N.
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
- Sulfato ferroso Amónico (FAS) 1N.
- Indicador Difenilamina Sulfato de Bario.

- Ácido fosfórico (H_3PO_4) p.a.
- Agua destilada o desionizada

Procedimiento:

1. Para el desarrollo de la metodología propuesta, se necesita pesar con precisión 0,5 g de suelo seco y tamizado extraído de la muestra ya tratada inicialmente. En caso de tener muestras con apariencia de elevado contenido orgánico según criterio técnico del analista, se utiliza una masa menor de aproximadamente 0,25 g, esto con el fin de evitar el sobreconsumo de reactivos químicos y saturación de la reacción en curso.

2. La muestra ya pesada en una balanza analítica es depositada en un matraz Erlenmeyer limpio y seco, ya que se tendrán posteriormente reacciones químicas agresivas de oxidación.

3. Al matraz Erlenmeyer con la muestra se añaden 15 ml de solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N. Luego, agregar lentamente y con mucha precaución 25 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 96-98%). Esta adición debe realizarse bajo una campana de extracción de gases, agitando suavemente el matraz para homogeneizar la mezcla y disipar el calor generado. Posteriormente y con la ayuda de una varilla de vidrio agitar la solución por aproximadamente 1 minuto, en este proceso tomar en cuenta el uso de material de protección personal de laboratorio, como gafas de seguridad, guantes y barbijo.

4. Una vez mezclada la solución, se coloca el matraz en una placa calefactora precalentada a 150°C y se calienta durante 10-15 minutos. Este paso es fundamental para garantizar una oxidación completa y reproducible del carbono orgánico de Cr^{6+} a Cr^{3+}. Transcurrido este tiempo, se retira de la placa y se deja enfriar a temperatura ambiente.

5. Transcurrido el tiempo de reacción, es necesario realizar una dilución de la muestra, para esto se agrega un volumen de 100 ml de agua destilada. Esta rebaja de la concentración contribuye al proceso con la facilitación posterior en la etapa de titulación, además de contribuir con el descenso de temperatura.

6. Para estabilizar la interacción con cloruros se añaden 2 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4), además del indicador Difenilamina, el cual, al reaccionar con la solución se torna de un color distintivo por el exceso de dicromato (tono azul verduzco).

7. Previo a la titulación de las muestras, se debe procesar un blanco reactivo (un matraz sin muestra de suelo con todos los reactivos). La titulación se lleva a cabo con una solución de Sulfato Ferroso amónico ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) 0,5 N o 1 N, cuya normalidad exacta debe ser verificada el mismo día de su uso mediante la titulación del blanco reactivo.

8. La titulación debe llevarse a cabo con una solución previamente estandarizada de Sulfato Ferroso amónico $(FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O)$ 1 N. El punto final de la titulación es identificado mediante con el cambio de color de la solución a verde brillante.

Cálculos:

$$C\ org\acute{a}nico = \frac{(B - M) \times N \times 0{,}003 \times 1{,}3 \times 100}{pm}$$

Dónde:

B = Volumen de solución ferrosa gastada en el blanco.

M = Volumen de solución ferrosa gastada en la muestra.

N = Normalidad de la solución ferrosa.

0,003= Peso en gramos de un miliequivalente de Carbono.

1,3= 100/77 factor de eficiencia de oxidación del Carbono.

pm = Peso de la muestra.

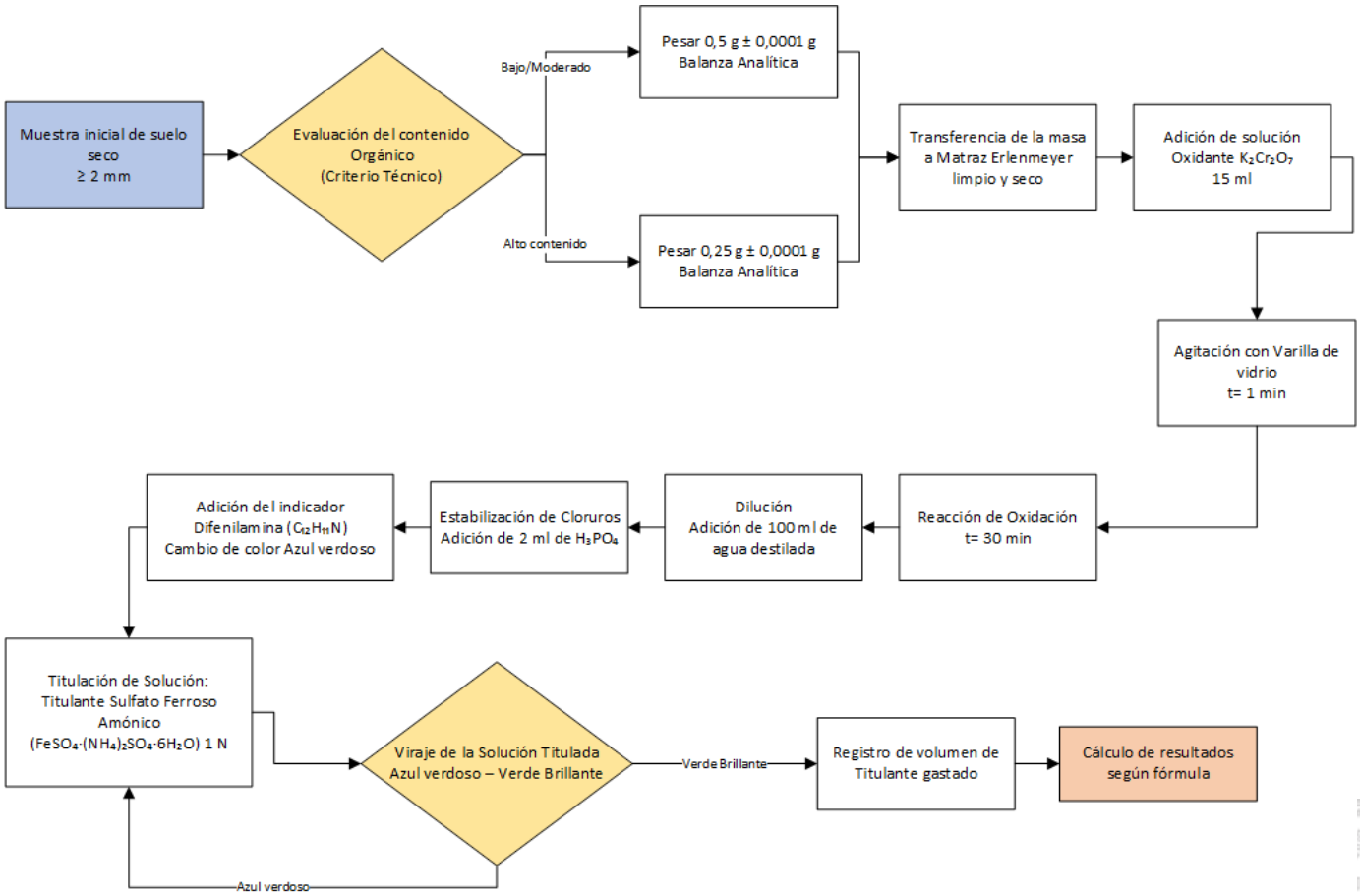
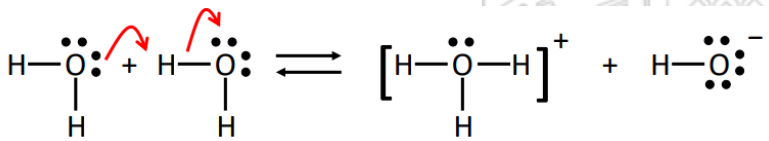


Figura 45: Diagrama de proceso para la determinación del contenido de material orgánica.

3.3. Medición potenciométrica del pH en suspensión

El pH es en definición el $-log = [H_3O]^+$ y de acuerdo con la ley de acción de masas tenemos que la reacción del agua da una reacción de equilibrio produciendo en consecuencia Hidronios e Hidroxilos, a continuación, se detalla la acción:



Por lo tanto:

$$2H_2O = H_3O^+ + OH^-$$

En condiciones estándar a 25°C, la concentración de Hidronios e Hidroxilos es el mismo con un valor de 10^{-7}, por lo que el producto iónico del agua Kw tiene un valor de 10^{-14}:

$$[H_3O]^+[OH]^- = K_W = 10^{-14}$$

$$pH + pOH = 14$$

En consecuencia, la concentración de H_3O^+ y OH^- varían inversamente (Porta et al., 2003).

Actualmente la medición del pH se realiza mediante el uso de instrumentos digitales través de electrodos, los cuales tienen la facilidad de realizar las mediciones insertándolo en una solución o directamente en una suspensión de suelos como veremos más adelante.

El equipo funciona según el principio del potencial eléctrico, el cual es constante y el electrodo de vidrio es selectivo en cuanto a los iones. En otras palabras, el electrodo en mención contiene un material sensible a los cambios en la concentración de iones en una solución en contacto, de forma que la diferencia de potencial entre el electrodo y la superficie exterior del material depende de esta concentración (Naumann et al., 2.002).

Las soluciones salinas más extendidas son las siguientes:

• Concentración 1:1 en H_2O: Es una mezcla de volumen de agua y suelo en partes iguales. Es el método más común en campo debido a la facilidad de contar con agua, sin embargo, este método es susceptible a las variaciones estacionales del pH de suelo, es por eso que no es usado para la clasificación de suelos.

• Concentración 1:2 en $CaCl_2$: Es una mezcla de una parte de suelo y dos partes de cloruro de calcio 0.01 M ($CaCl_2$), mostrando lecturas uniformes, independientemente de la época del año debido a que el Ca^{+2} desplaza los iones de hidrógeno y aluminio de las superficies de intercambio (Porta et al., 2.003).

• Concentración 1:1 en KCl: Se trabaja con solución de KCl a 1 N, teniendo en cuenta una relación 1:1 con el suelo. Generalmente, se utiliza para probar la presencia de aluminio intercambiable. La alta concentración de KCl desplaza a los iones de hidrógeno y aluminio. Las lecturas en su gran mayoría son uniformes y son más comunes en regiones con suelos ácidos (United States Department of Agriculture [USDA], 2.014).

Interferencias

Según Gavriloaiei (2.012), el suelo tiene una variabilidad dependiendo de factores como la relación del suelo con el solvente que se va a utilizar, cuanto mayor es esta relación el pH tiene

tendencia a incrementar, además de otros factores como la fuerza iónica de la solución, la posición correcta de los electrodos y la temperatura, pueden generar perturbaciones en la medición.

3.3.1. Preparación de la muestra de suelo y medición de pH

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Potenciómetro (pH-metro) Con compensación automática de temperatura (ATC). • Electrodo combinado de pH Electrodo de vidrio con sensor de temperatura integrado o separado. • Balanza analítica ± 0,0001 g.	• Vaso de precipitados 50 ml o 100 ml. • Vidrio de reloj. • Varilla de vidrio. • Papel de filtro cualitativo Whatman No. 1, 2 o similar. • Embudo de vidrio. • Pipeta (20 ml). • Frascos lavadores.	• Guantes de nitrilo. • Mascarilla. • Bata de laboratorio. • Cubrebocas.

Procedimiento:

1. Se debe trabajar con una masa de 20 g de suelo, transferida a un vaso de precipitados de 100 ml. A continuación, se añaden 20 ml de agua destilada o desionizada libre de CO_2 (hervida y enfriada), estableciendo una relación suelo: agua de 1:1. El agua debe agregarse con pipeta para garantizar precisión.

2. Se recomienda cubrir el vaso de precipitado con un vidrio de reloj para minimizar la contaminación y la evaporación durante el proceso. La mezcla debe homogeneizarse mediante agitación con una varilla de vidrio durante 1 minuto cada 10 minutos a lo largo de un período de 30 minutos. Una vez homogenizada, la suspensión debe reposar correctamente tapada durante 30 minutos. Cabe destacar que la relación suelo/solvente puede variar según las condiciones específicas del análisis, el tipo de muestra o los requisitos instrumentales.

3. Una vez homogenizada, la suspensión debe reposar correctamente tapada durante 1 hora, permitiendo la sedimentación de las partículas coloidales. Transcurrido este tiempo, Preferentemente, la medición debe realizarse directamente en la suspensión sobrenadante sin

filtrar, evitando tocar el sedimento con el electrodo. Si la turbidez es extrema, se debe filtrar la solución mediante papel de filtro de poro rápido (Whatman No. 1). No se debe realizar decantación adicional para eliminar materia orgánica o lípidos, ya que esto altera la química de la solución.

4. Previo a la medición, el potenciómetro debe ser calibrado con al menos dos soluciones buffer de pH conocido (ej. pH 4,01 y 7,00) que enmarquen el pH esperado de la muestra. El electrodo debe enjuagarse con agua destilada y secarse suavemente con papel absorbente entre cada buffer y antes de medir la muestra.

5. El electrodo debe sumergirse en la parte superior de la suspensión sobrenadante, sin tocar el sedimento ni las paredes del vaso. La lectura debe registrarse una vez que la medición se estabilice (variación < 0,01 pH/min), manteniendo una agitación suave y constante si el fabricante lo recomienda. Los resultados deben reportarse indicando la temperatura de medición y acompañarse de los cálculos de incertidumbre correspondientes, derivados de las repeticiones analíticas realizadas. Además, debe reportarse como el valor de pH promedio de al menos dos repeticiones, indicando la temperatura de medición y la relación suelo: agua utilizada (ej. pH (H_2O) 1:1, 20°C) o del solvente utilizad respectivamente.

6. La lectura del pH se obtiene directamente del potenciómetro. Los resultados deben reportarse indicando la temperatura de medición y acompañarse de los cálculos de incertidumbre correspondientes, derivados de las repeticiones analíticas realizadas.

3.4. Determinación conductividad eléctrica (CE), método conductimétrica

Está definida como la concentración de iones solubles presentes en una solución de agua intersticial de los poros del suelo. Los principales cationes como presentes en el suelo son $Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}\ y\ K^+$ por otro lado aniones de presencia son $Cl^-, SO_4{}^{-2}, HCO_3{}^-, CO_3{}^{-2}\ y\ NO_3{}^-$, (Visconti y de Paz, 2016).

En el ámbito agrícola, es de importancia especial el K^+ y el $NO_3{}^-$ ya que son nutrientes de aporte significativo en la fertilización. Las concentraciones de sales en el suelo se producen por consecuencia de la evaporación y la traspiración vegetal, los cuales tienen como resultado la extracción del agua del suelo y por defecto la concentración de sales en diferentes secciones. Además del uso desmedido de fertilizantes y riego con aguas salinas pueden acelerar la salinización de los suelos.

Por lo tanto, el potencial hídrico del suelo es inversamente proporcional a la salinidad del suelo, generando en consecuencia un estrés osmótico en las plantas, las cuales invierten mayor energía para absorber agua (Visconti y de Paz, 2.016).

A consecuencia de que hay iones disueltos, los suelos actúan como conductores eléctricos. Pero es común que existan problemas para obtener una muestra representativa y distribución homogénea de sus sales. Para poder estandarizar este procedimiento se debe proceder necesariamente a saturar el suelo con agua hasta alcanzar una pasta homogénea. (USDA, 2.014). La medida de la conductividad eléctrica en estas condiciones y a una temperatura de 25°C, es el parámetro universal que evalúa la salinidad del suelo expresada en unidades de dS/m (decisiemens por metro).

La determinación de la conductividad eléctrica involucra la medida física de la resistencia en ohms, cuyo valor del material conductor (solución salina) es inversamente proporcional al área de la sección transversal y directamente proporcional a su longitud. La resistencia de la solución se mide mediante un circuito de resistencias en paralelo, denominado Puente de Wheatstone (García, 2.007).

Interferencias:

Los valores de conductividad eléctrica están sujetos a interferencias derivadas de la contaminación de los electrodos, una condición de difícil identificación visual. Dicha contaminación puede alterar la constante de celda, lo cual se detecta mediante la medición de soluciones estándar de conductividad conocida. Ante cualquier inconsistencia en los resultados, se debe proceder al lavado meticuloso de los electrodos hasta verificar la recuperación de su respuesta confiable.

La presencia de burbujas de aire en los electrodos, por ejemplo, formadas durante el calentamiento de extractos, introduce perturbaciones significativas en las mediciones. Por consiguiente, la determinación de conductividad eléctrica debe realizarse exclusivamente con extractos estabilizados a temperatura controlada y en ausencia de artefactos gaseosos.

Cabe destacar que las mediciones inferiores a 1 mS/m son susceptibles a interferencias atmosféricas, particularmente por dióxido de carbono y amoníaco ambiental. En estos casos, las mediciones quedan fuera del alcance de los estándares internacionales convencionales, por lo que se requiere emplear un adaptador especializado para celdas de medición que garantice el aislamiento del extracto frente a la atmósfera circundante.

Materiales, equipos y elementos de protección:

Equipos	Materiales de laboratorio	Elementos de protección personal (EPP)
• Conductímetro compensación automática de temperatura (ATC) y electrodo de celda de conductividad. • Balanza analítica ± 0,0001 g. • Agitador orbital (shaker) 150-200 rpm. • Centrífuga, opcional para clarificar extractos turbios (3.000 rpm).	• Vasos de precipitados 250 ml. • Papel de filtro Whatman No. 42. • Embudo de vidrio. • Pipeta 100 ml. • Frasco lavador Con agua destilada.	• Guantes de nitrilo. • Bata de laboratorio.

Reactivos:

- Agua grado 2, con conductividad eléctrica menor a 0,2 mS/m a 25 °C.
- Soluciones estándares de conductividad comerciales, que han sido validadas en comparaciones con los estándares NIST, las cuales son las siguientes:
- Solución estándar de cloruro de potasio (KCl) a 0,1 M de 1413 µS/cm a 25°C.

Procedimiento:

1. Para ejecutar la metodología propuesta, es necesario disponer de al menos 30 g de suelo preparado, homogeneizado y secado previamente, utilizando una balanza analítica con una precisión de 0,01 g. La muestra se deposita en un vaso de precipitado de 250 ml, cuya capacidad es adecuada para las siguientes etapas del proceso.

2. Seguidamente, se añaden 100 ml de agua destilada o desionizada de baja conductividad (< 2 µS/cm) utilizando una probeta o pipeta volumétrica, manteniendo un control riguroso de la temperatura de la solución, ya que este factor incide directamente en la solubilidad de los solutos.

3. Inmediatamente después, la suspensión se somete a agitación durante 60 minutos a 150-200 rpm. Inmediatamente después de la agitación, se procede a filtrar la suspensión utilizando papel de filtro Whatman No. 42 (o similar) sin lavar el sedimento. Se debe descartar los primeros 5-10 ml de filtrado y recoger el resto en un vaso de precipitados limpio y seco. El extracto filtrado se recoge en un vaso de precipitado de igual capacidad, asegurando un volumen mínimo de 25-30 ml para permitir la inmersión adecuada del electrodo sin riesgo de interferencias. Si el extracto presenta turbidez residual, se debe repetir el filtrado o proceder con una centrifugación a 3.000 rpm durante 5 minutos.

4. La medición de conductividad eléctrica se realiza directamente en el extracto filtrado. El conductímetro debe ser calibrado con al menos una solución estándar de KCl de conductividad conocida (ej. 1.413 µS/cm a 25°C) antes de medir las muestras. El valor del blanco (agua destilada usada) debe ser ≤ 2 µS/cm (equivalente a 0,2 mS/m). Todas las mediciones deben reportarse a 25°C, utilizando la compensación automática de temperatura del equipo o aplicando el factor de corrección correspondiente. Adicionalmente, se debe enjuagar el electrodo con agua destilada después de cada medición o cambio de muestra, para evitar contaminación cruzada.

5. El resultado debe reportarse como Conductividad Eléctrica (CE) del extracto de saturación 1:5, expresada en dS/m o µS/cm a 25°C. Se debe indicar la relación suelo: agua utilizada (1:5) y corregir el valor restando la conductividad del agua destilada utilizada (blanco) si esta supera el 10% del valor de la muestra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bazán, R. (2.017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). https://hdl.handle.net/20.500.12955/504

Blake, G. & Hartge, K. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods (pp. 363-375). American Society of Agronomy.

Fassbender, H. (1.987). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina (2a ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

García, A. (2.007). Estudio experimental y teórico de la conductividad eléctrica de soluciones ácidas de Níquel y Zinc [Tesis de postgrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102960

Gavriloaiei, T. (2.012). The influence of electrolyte solutions on soil ph measurements. Revista de Chimie, *63*(4), 396–400. https://www.revistadechimie.ro/Articles.asp?ID=3277

Indoria, A. K., Sharma, K. L., & Reddy, K. S. (2.020). Hydraulic properties of soil under warming climate. En M. Vara-Prasad & M. Pietrzykowski (Eds.), Climate Change and Soil Interactions (pp. 473-508). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818032-7.00018-7

Maximillian, J., Brusseau, M. L., Glenn, E. P., & Matthias, A. D. (2019). Pollution and environmental perturbations in the global system. En M. L. Brusseau, I. L. Pepper & C. P. Gerba (Eds.), Environmental and Pollution Science (3a ed., pp. 457-476). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814719-1.00025-2

Naumann, R., Alexander-Weber, C. H., Eberhardt, R., Giera, J., & Spitzer, P. (2002). Traceability of pH measurements by glass electrode cells: Performance characteristic of pH electrodes by multi-point calibration. Analytical and Bioanalytical Chemistry, *374*(5), 778–786. https://doi.org/10.1007/s00216-002-1506-5

Porta, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (2.003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa.

Sandoval M., Dörner J., Seguel O., Cuevas J., & Rivera, D. (2.012). Métodos de análisis físicos de suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. https://hdl.handle.net/20.500.14001/59208

United States Department of Agriculture. (2.014). Kellogg soil survey laboratory methods manual (Soil Survey Investigations Report Nº 42, Version 5.0). https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/SSIR42-v6-pt1.pdf

United States Department of Agriculture. (2.017). Soil survey manual. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual

Visconti, F., & de Paz, J. M. (2.016). Electrical Conductivity Measurements in Agriculture: The Assessment of Soil Salinity. En L. Cocco (Ed.), New Trends and Developments in Metrology. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/62741

INIAF
Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal

El futuro está en el campo

ISBN: 978- 9917- 9653-9-8
Depósito legal: 4-1-656-2025 P.O.

ISBN: 978-9917-9653-9-8

Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal – INIAF
Dirección: Calle Cañada Strongest, Esquina Otero de la Vega, Nª 1573/ Zona San Pedro Centro
Teléfonos: (591-2) - 22124404 – 2 2124411 Web: iniaf.gob.bo
La Paz – Bolivia