

guía de

caracterización edáfica

para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales

Víctor González-Naranjo

María Leal

Javier Lillo

Irene de Bustamante

Pino Palacios-Díaz



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



tragua

www.consolider-tragua.com



guía de

caracterización edáfica

para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales

índice

guía de
**caracterización
edáfica** para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales

Introducción	4
Objetivos	7
1. Descripción del lugar de estudio	7
2. Muestreo, conservación y pretratamiento	8
3. Determinación de la textura	9
4. Determinación del pH	12
5. Determinación de la Conductividad Eléctrica (C.E.)	15
6. Determinación del contenido en Materia Orgánica (M.O.)	16
7. Determinación de la Capacidad de Cambio Catiónico (C.C.C.) y de las Bases de Cambio (B.C.)	18
8. Nutrientes del suelo	21
8.1. Nitrógeno	21
8.2. Fósforo	23
8.3. Potasio	25
8.4. Azufre	26
8.5. Boro	27
8.6. Hierro, cobre , manganeso y cinc	27
9. Mineralogía	29
10. Carbonatos	29
Bibliografía	32

introducción



guía de
**caracterización
edáfica** para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales



En España, la legislación específica que regula la reutilización de las aguas se recoge en el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre (B.O.E., 2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas; en el que se define qué es un "agua regenerada", estableciéndose que su uso requerirá una concesión administrativa, en la que se fijará el destino que se va a dar al agua.

El Real Decreto diferencia varios usos, tales como urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental. En su anexo I se recogen los criterios de calidad que deben de cumplir estas aguas diferenciados según usos, aportando límites de obligado cumplimiento. Los criterios definidos tienen la consideración de mínimos obligatorios exigibles, incluyendo parámetros físico-químicos y sanitarios. Además, para el resto de los parámetros es necesario que las aguas depuradas cumplan con las condiciones necesarias para el vertido de aguas residuales según se recoge en el Real Decreto 1315/1992 (B.O.E., 1992).

La reutilización de aguas depuradas permite, además de la recuperación parcial de los costes asumidos en el proceso de depuración, proporcionar un recurso de agua alternativo, lo que resulta crítico sobre todo en las zonas áridas o semiáridas. Por estas razones, se trata de una práctica recomendada en un país como España, con una tasa de consumo anual/recursos superior al 30% (Hochstrat *et al.*, 2005) y donde, según el Instituto Nacional de Estadística (www.ine.es), se trataron 4.672 hm³ de aguas residuales en 2009, de las cuales tan sólo se reutilizaron el 11,5% (534 hm³).

Sin embargo, no se conocen suficientemente los efectos sobre el sistema suelo-planta y sobre las aguas subterráneas que pudieran derivarse de las actividades de regeneración y reutilización de aguas residuales en usos ambientales (recarga artificial de acuíferos y riego de cultivos no alimentarios). El conocimiento de estas afecciones, requiere una descripción previa del suelo que posibilite su clasificación y análisis de los casos que puedan provocar degradación y pérdida o reducción de sus funciones. Este conocimiento es necesario para interpretar las funciones ambientales del suelo, facilitando la comprensión de los cambios producidos en el medio.

El objetivo de la caracterización edáfica en las actividades de regeneración de aguas residuales es doble. Por un lado se trata de establecer el estado inicial de la zona no saturada y así poder hacer una primera aproximación de las interacciones que tendrán lugar entre el agua regenerada y el suelo de la zona de aplicación y los efectos derivados de las mismas. Por otro lado, se trata de estudiar la evolución de las distintas propiedades edáficas a lo largo del periodo de aplicación de aguas regeneradas (Casas *et al.*, 2011).

guía de
**caracterización
edáfica** para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales



Objetivos

La presente *Guía de Caracterización Edáfica* tiene como objetivo ofrecer a aquellos que desarrollen actividades de regeneración y reutilización de aguas residuales para usos ambientales (recarga artificial de acuíferos y riego de cultivos), unas normas de procedimiento para realizar la caracterización de la parte abiótica del suelo, del área en la que se desarrolle el proyecto de regeneración y reutilización.

En este documento se aportan criterios básicos para la selección del procedimiento más adecuado, dependiendo de las necesidades específicas de la práctica de regeneración y reutilización y los medios de los que se disponga. Se incorporan además criterios para la interpretación de los resultados obtenidos.

1. Descripción del lugar de estudio

Una vez seleccionado la localización del proyecto de regeneración y reutilización de aguas residuales tratadas, se procede a la descripción del lugar con el fin de obtener la caracterización más completa posible previa al muestreo. Esta descripción consta de diferentes apartados que se presentan a continuación (U.S.D.A., 2002):

- 1. NOMBRE o iniciales que permita reconocer la localización objeto de estudio.
- 2. FECHA del comienzo de las observaciones.
- 3. CLIMA: Descripción de las condiciones climáticas generales en el momento de la observación, profundizando en los factores de mayor influencia en las propiedades y parámetros a medir una vez realizado el muestreo como:
 - 3.1. Condiciones climatológicas (soleado, parcialmente nublado, cubierto, lluvia, niebla, nieve).
 - 3.2. Temperatura del aire.
 - 3.3. Temperatura del suelo.
 - 3.4. Temperatura del suelo a una profundidad representativa elegida en función de la profundidad del muestreo que se llevará a cabo.
- 4. LOCALIZACIÓN: Situación geográfica del área de estudio de la manera más precisa posible: latitud, longitud y altitud (con ayuda de un mapa, GPS, o ambos).

- 5. TOPOGRAFÍA: Fisiografía del terreno según los mapas topográficos, modelos digitales de relieve, etc.
- 6. INFORMACIÓN GEOMORFOLÓGICA: Descripción geomorfológica con datos de campo, relacionando formas del relieve con procesos y materiales superficiales, diferenciando aquellos de origen natural y de origen antrópico.

2. Muestreo, conservación y pretratamiento

MUESTREO

Se trata de una de las etapas más importantes y determinantes de la calidad de los análisis de suelos. En el diseño y procedimiento del muestreo se deben tener en cuenta los objetivos del proyecto en el que se encuadra el análisis edáfico y los recursos (fundamentalmente económicos y logísticos) de los que se dispone, siguiendo el criterio fundamental que establece que las muestras deben ser homogéneas y representativas del área objeto de estudio.

Los suelos son sistemas heterogéneos. Sus propiedades y características varían en función de su ubicación y del manejo al que se encuentran sometidos. Dentro de un mismo perfil también puede existir una gran variabilidad con la profundidad si se diferencian horizontes (horizonación). Por ello, se aplican diferentes procedimientos de muestreo (intuitivo, probabilístico, aleatorio, etc.), obteniéndose así diferentes tipos de muestras (representativas de cierta propiedad, sistemáticas, aleatorias, compuestas, etc.). Para elegir el método de muestreo más adecuado deben considerarse los análisis que se desean realizar y la disponibilidad de recursos económicos, materiales y humanos.

Todas las muestras de suelo que se envíen a los laboratorios deben ser correctamente nombradas, clasificadas y registradas mediante números, siglas o nombres que posibiliten su identificación en los distintos análisis y determinaciones. Se ha de tener en cuenta que una muestra representa un material edáfico que tiene una ubicación determinada, por ello todas las muestras han de estar correctamente localizadas de manera inequívoca en la zona de estudio mediante sus correspondientes coordenadas. Además, la profundidad a la que fueron obtenidas ha de quedar igualmente registrada.





CONSERVACIÓN

Dependiendo del manejo de conservación de las muestras, éstas pueden ser alteradas o no alteradas (inalteradas). Las muestras alteradas deben guardarse en recipientes o bolsas que permitan su identificación y protejan a la muestra al menos en cuanto a su integridad física y posible contaminación exógena. En cuanto a las muestras inalteradas, se pretende que no varíen las propiedades del suelo hasta que se realicen las determinaciones analíticas. Los métodos más utilizados para la conservación de muestras inalteradas son mediante un recubrimiento de parafina o parafilm o en cilindros de plástico o acero inoxidable cerrados.

PRETRATAMIENTO

Las muestras edáficas presentan un amplio rango de condiciones y características físicas, por lo que deben ser sometidas a un pretratamiento de homogeneización.

El pretratamiento de las muestras de suelo viene recogido en las normas ISO 11464:2006 y UNE-ISO 14507:2004 sobre calidad del suelo. De forma resumida, estos protocolos establecen que para la mayoría de los análisis, las muestras de campo deben ser secadas al aire hasta alcanzar la humedad ambiental. Para ello, se extiende la muestra sobre una superficie no absorbente (por ejemplo, una bandeja de plástico) hasta que se note seca al tacto.

El siguiente paso consiste en el desmenuzamiento de los agregados y su posterior tamizado a 2 mm, ya que todos los análisis se realizan con la fracción menor de 2 mm, también denominada *fracción fina*. Esta disgregación se debe realizar con rodillo de madera o con molinos de bolas, dependiendo de la dureza del material. Separada la fracción fina de los elementos gruesos, la proporción de estos últimos en la muestra debe ser determinada en porcentaje en peso. En todo momento, la muestra debe ser bien mezclada y cuarteada, para obtener partes representativas sobre las que se harán los diferentes análisis (químicos, físicos y mineralógicos).

3. Determinación de la textura

La determinación de la textura o granulometría del suelo consiste en calcular la proporción en que se encuentran en el suelo, las diferentes partículas minerales atendiendo a su tamaño. Se trata de una de las propiedades fundamentales para comenzar a caracterizar el suelo. Así, cuando se va a realizar cualquier modificación en el medio edáfico, como por ejemplo

en el caso de la regeneración de aguas depuradas, el conocimiento de la textura de cada uno de los horizontes es fundamental para interpretar el comportamiento del suelo. Especialmente en el caso de la fracción fina (diámetro menor de 2 mm), ya que es la que tiene mayor influencia en la mayoría de propiedades del suelo. Completando estos resultados es posible obtener la Curva Granulométrica, que permite clasificar el suelo mediante ciertos sistemas, y que se basa en la determinación de las proporciones en las que se encuentran los tamaños de las partículas dentro de la fracción fina.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Independientemente del procedimiento a seguir, existe una fase previa común a las distintas determinaciones de textura. Ésta consiste en la destrucción de los agentes cementantes o aglomerantes, como la materia orgánica, y la dispersión de las partículas. Una vez realizada esta fase, se pueden llevar a cabo principalmente dos métodos:

- Método de la Pipeta de Robinson
- Método del Densímetro

Pretratamiento para la determinación de la textura:

La materia orgánica se elimina mediante una digestión con peróxido de hidrógeno, H_2O_2 . A continuación se lleva a cabo la dispersión. Para ello se pasa la disolución de suelo y agua a un bote de plástico, se añaden 100 mL de hexametáfosfato de sodio, $(NaPO_3)_6$, (León-Arteta, 2001) y se agita durante 16 h. Se lleva a una probeta de 1 L y se enrasa con agua destilada.

Método de la Pipeta de Robinson:

El método de la pipeta sigue el Standard SSL PSDA method (U.S.D.A., 2011). Se trata de una sedimentación discontinua donde una determinada cantidad de muestra de suelo dispersa en agua se introduce en una probeta con tapón de 1.000 mL, se agita y al cabo de determinados intervalos de tiempo establecidos según la Ley de Stokes, se realizan extracciones con una pipeta de 20 mL a una profundidad fija. Permite la cuantificación y recogida de todas las fracciones de arcillas, limos gruesos y limos finos, determinando las arenas por tamizado posterior.



Método del Densímetro:

El método del densímetro sigue la norma UNE 103102:1995. La sedimentación en este caso es continua, y se realiza mediante la medida de las densidades variables de la suspensión de suelo en agua a medida que las partículas se van depositando, tomándose en intervalos de tiempo también determinados con la Ley de Stokes. El inconveniente de este método es la imposibilidad de recoger las fracciones para su posterior estudio. El densímetro empleado es un Hidrómetro de Bouyoucos (ASTM-E 100), que permite la cuantificación de las fracciones de arcilla, limos y arenas. Para esta técnica se recomienda realizar un ensayo en blanco, consistente en la preparación de una probeta de 1.000 mL únicamente con agua destilada y el agente dispersante, tomando las mismas medidas que para el resto de muestras del ensayo.

Determinación de la clase textural:

Los porcentajes de cada una de las fracciones de partículas de la fracción fina del suelo se representan como proporciones en un triángulo de texturas con el objetivo de determinar su clase textural (figura 1).

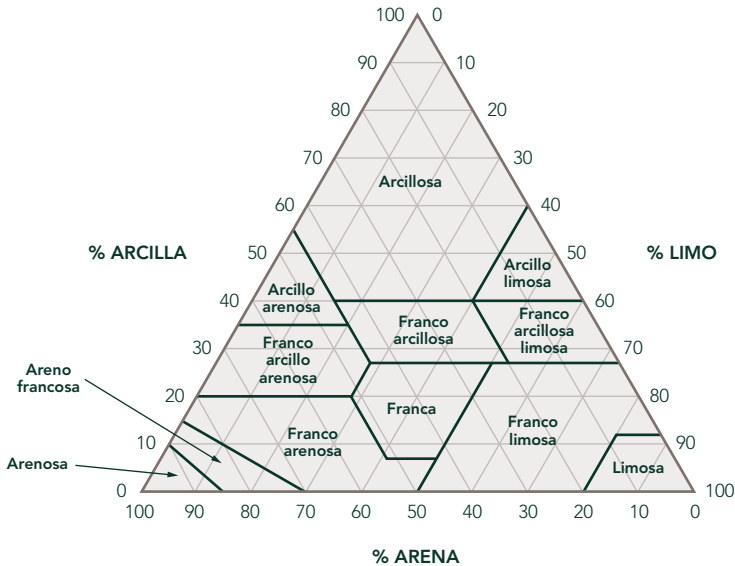


Figura 1. Triángulo de texturas (Fuente: U.S.D.A., 1977).

Determinación de la curva granulométrica:

La curva granulométrica se determina según la norma UNE 77314:2001, basada en el tamizado de las muestras con una cascada de tamices de un rango de luz de malla entre 50 μm y 2 mm (correspondiente a la fracción de arenas). Los porcentajes obtenidos se representan gráficamente con una escala semilogarítmica.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los suelos se clasifican en tres grandes grupos según la textura:

- Textura gruesa: Arenoso, areno-francoso y franco-arenoso.
- Textura media: Franco, franco-arcillo-arenoso, franco-limoso, limoso, arcillo-arenoso.
- Textura fina: Franco-arcilloso, franco-arcillo-limoso, arcillo-limoso, arcilloso.

Según esta clasificación, se pueden estimar ciertas propiedades físicas del suelo (tabla 1):

Propiedad	Textura		
	Gruesa	Media	Fina
Permeabilidad	Alta	Media	Baja
Superficie Especifica	Baja	Media	Alta
Compacidad	Baja	Media	Alta
Capacidad de Cambio	Baja	Media	Alta
Dificultad de Laboreo	Intermedia	Fácil	Difícil
Capacidad de retención de agua	Baja	Media-alta	Alta
Energía de retención de agua	Baja	Media	Alta

Tabla 1. *Textura y comportamiento probable del suelo (Fuente: Marañés et al., 1998).*

4. Determinación del pH

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo están influenciadas por la acidez o la basicidad del medio. El pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. Así, la llamada *reacción del suelo* se caracteriza mediante el pH del sistema suelo-agua.



El pH influye sobre la movilidad de los diferentes elementos del suelo afectando, por ejemplo, a su solubilidad, por lo que la modificación del mismo como consecuencia de la regeneración de agua residual puede suponer un cambio en el funcionamiento de estos elementos. Además, el pH de un suelo está relacionado con otras propiedades de éste como son la capacidad de cambio y la disponibilidad de nutrientes. En general, el valor del pH en suelos oscila entre 4 y 9. Los suelos más adecuados para cultivar son los que tienen un pH comprendido entre 5,8 y 7,5, ya que los nutrientes de las plantas en general presentan su máxima solubilidad en este intervalo. A medida que el valor del pH se aparta de dicho intervalo la disponibilidad de los nutrientes disminuye, como puede observarse en la figura 2 (Trouw, 1946).

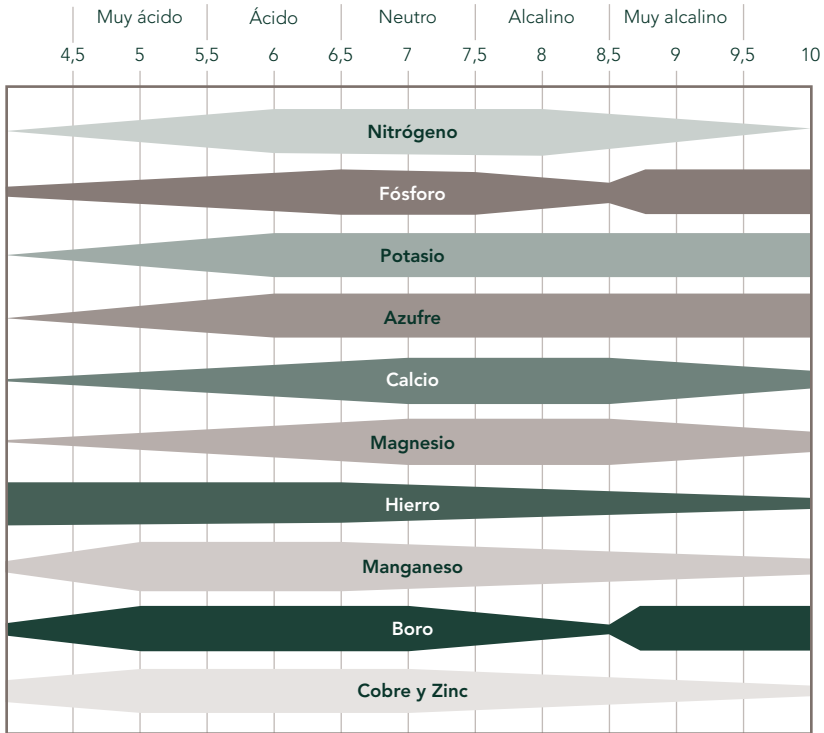


Figura 2. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo (Fuente: Trouw, 1946).

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

El procedimiento de determinación más empleado viene establecido en la norma UNE 77305:1999, en la que se trabaja con muestra de suelo seco a temperatura menor de 40 °C, con tamaño de partícula inferior a 2 mm y con una relación suelo:agua de 1:5 en volumen (5 mL de suelo en 25 mL de agua, disolución 0,01M en cloruro cálcico, CaCl_2 , o disolución 1M en cloruro de potasio, KCl).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 2 se presenta una clasificación sencilla de los suelos según la medida del pH de la solución de suelo.

pH 1:2,5	Carácter
< 4,5	Extremadamente ácido
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido
5,0 - 5,5	Fuertemente ácido
5,5 - 6,0	Medianamente ácido
6,0 - 6,5	Ligeramente ácido
6,5 - 7,3	Neutro
7,3 - 7,8	Medianamente básico
7,8 - 8,4	Básico
8,4 - 9,0	Ligeramente alcalino
9,0 - 10,0	Alcalino
>10,0	Fuertemente alcalino

Tabla 2. *Carácter del suelo atendiendo a la medida del pH de la solución de suelo.*
(Fuente: U.S.D.A., 1996).

Los suelos con pH inferior a 5,7 a menos que sean muy ricos en materia orgánica, tendrán un bajo contenido en bases, por lo que pueden presentar deficiencias de Ca, Mg, PO_4^{3-} , Mo o B y provocar toxicidad por concentraciones altas de Mn, Zn, Al, Fe o Ni. Estos suelos se enmiendan (esto es, el pH se corrige) mediante la adición de bases, generalmente cal, abonos y oligoelementos en función lo que se pretenda cultivar. Un pH bajo puede deberse a una elevada presencia de sales. Para evitar este efecto en la medida se emplea una disolución de CaCl_2 0,01M o KCl 1M.





Valores altos de pH son comunes en suelos calcáreos (de 8 a 8,3), situación que no da grandes problemas para los cultivos salvo la clorosis inducida por exceso de cal. Ahora bien, si la concentración de iones alcalinotérreos corresponde exclusivamente a Ca, esto implica una aguda falta de Mg. Un pH elevado junto con ausencia de carbonato cálcico libre implica grandes cantidades de Na y Mg en el complejo de cambio.

5. Determinación de la Conductividad Eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica específica de un suelo se mide mediante un conductímetro en un extracto acuoso del suelo. La conductividad de la solución va a depender de la concentración de sales, es decir, de los solutos iónicos presentes en el agua, por lo que al aumentar la concentración, aumentará la conductividad. Por eso, esta medida sirve para evaluar la salinidad de un suelo, ya que los iones responsables de la salinidad del suelo son: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- .

La unidad de medida empleada en suelo es el dS/m. El valor de la conductividad depende fuertemente de la temperatura de la muestra durante el ensayo, por lo que actualmente se usan conductímetros con compensadores automáticos de temperatura.

El uso de agua residual para regeneración implica modificaciones en la salinidad del suelo, la cual disminuye la capacidad de nutrición de las plantas, ya que aumenta el potencial osmótico de la solución por una diferencia de concentración de solutos en el interior de la planta y en el exterior, dificultando el que las raíces asimilen agua y reduciendo su velocidad de crecimiento. Por otra parte, la presencia de concentraciones altas de sales en los suelos, que pasan a disolución, hace que los coloides coagulen y precipiten, modificando la estructura del suelo. Este se vuelve más compacto, disminuyendo la capacidad de cambio, la aireación, la velocidad de nitrificación, la respiración y penetración de las raíces. La acumulación de sales solubles en el suelo se atribuye principalmente a problemas de drenaje y a la acción de riegos continuados en unas condiciones de evapotranspiración alta.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

La medida de la conductividad eléctrica se realiza mediante la norma UNE 77308:2001 trabajando con suelo seco a temperatura menor de 40°C, con tamaño de partícula inferior a 2 mm y con una relación suelo:agua de 1:5 en masa/volumen (20 g de suelo en 100 mL

de agua, disolución 0,01M en CaCl_2 o disolución 1M en KCl). La temperatura de extracción será de 20 °C, filtrándose antes de medir. La conductividad del agua utilizada será menor a 0,2 mS/m a 25 °C.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En función de los resultados obtenidos, los suelos se clasifican como se muestra en la tabla 3:

C.E. 1:5 (dS/m)	Comportamiento del Suelo
0 - 0,12	Escasos nutrientes
0,12 - 0,35	Deseable para plantas sensibles a las sales
0,35 - 0,60	Óptimo para la mayoría de los cultivos
0,60 - 0,85	Reducción del crecimiento
0,85 - 1,00	Síntomas de toxicidad
>1,10	Tóxico para la mayoría de las plantas

Tabla 3. *Relación entre C.E. y comportamiento del suelo (Fuente: U.S.D.A., 1996).*

6. Determinación del contenido en Materia Orgánica (M.O.)

La M.O. del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia, pues incluye tanto a los materiales poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y síntesis dentro del suelo. Se debe distinguir entre las sustancias húmicas y las no húmicas, siendo mayoritarias las húmicas (Schnitzer y Khan, 1978). Además, como parte de la materia orgánica del suelo se pueden incluir compuestos orgánicos tóxicos, provenientes de las actividades industriales del hombre, como ocurre en la contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo (Etchevers, 1988).

La cantidad y propiedades de la materia orgánica del suelo ayuda a determinar sus procesos de formación y las propiedades bioquímicas, químicas, físicas y de fertilidad (Kononova, 1966). El análisis de la M.O. resulta fundamental para obtener información indirecta de las propiedades del suelo, al influir, por ejemplo, en la retención de agua, así como en la estructuración del suelo y su aireación. También es muy importante su determinación para inter-





pretar y conocer aspectos relacionados con la nutrición de las plantas, ya que la materia orgánica junto con la fracción arcillosa forman el complejo de cambio y facilitan la absorción de nutrientes (García-Serrano *et al.*, 2010).

La M.O. poco descompuesta favorece la proliferación de microorganismos aerobios a los que proporciona carbono y nitrógeno. En actividades de regeneración de aguas residuales por riego, la cantidad de M.O. en el suelo es uno de los parámetros que pueden verse muy modificados al ser incorporadas grandes cargas de ésta al suelo por el agua residual, afectando además a los microorganismos del suelo debido a su estrecha relación.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Para la determinación de la M.O. en el suelo se utilizan principalmente dos métodos. Por un lado, la norma UNE 77321:2003 para la determinación de carbono orgánico y carbono total mediante combustión seca. El carbono presente en el suelo se oxida a 900°C a dióxido de carbono (CO₂) en una corriente de oxígeno exenta de gas carbónico. El CO₂ producido se mide por volumetría, conductimetría, cromatografía de gases o mediante un método de detección por absorción en el infrarrojo, dependiendo del aparato empleado. El resultado del tratamiento directo de la muestra de suelo dará un valor de carbono total. Si se quiere evaluar el carbono orgánico hay que tratar previamente la muestra con ácido clorhídrico (HCl) para eliminar el carbonato, o también si se ha determinado éste por otro método, se calcula por diferencia. Como método alternativo para la determinación de la M.O., está el método de la oxidación con dicromato de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1982). En este método, la determinación cuantitativa de la materia orgánica se realiza analizando el carbono orgánico mediante volumetría de oxidación-reducción por retroceso, oxidando la materia orgánica del suelo con un oxidante en exceso, el dicromato potásico (K₂Cr₂O₇), posteriormente valorado empleando la Sal de Mohr como valorante.

En ambos métodos, una vez cuantificado este carbono orgánico se calcula el contenido en materia orgánica aplicando el factor de Van Bemmelen, cuyo valor es de 1,724, deducido estadísticamente y que supone que la materia orgánica contiene un 58% de carbono orgánico.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La clasificación de los suelos atendiendo al porcentaje en M.O. así como a los valores de M.O. relacionados con el tipo de cultivo se pueden observar en la tabla 4:

Niveles de M.O. (%)

Tipo de Cultivo	Muy bajo	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Secano	< 0,50	0,50 - 1,00	1,00 - 1,50	1,50 - 2,00	> 2,00
Regadío Extensivo	< 0,50	0,50 - 1,50	1,50 - 2,50	2,50 - 3,50	> 3,50
Regadío Intensivo	< 0,75	0,75 - 2,00	2,00 - 3,20	3,20 - 4,50	> 4,50

Tabla 4. Niveles de M.O. según el tipo de cultivo (Fuente: Marañés et al., 1998).

7. Determinación de la Capacidad de Cambio Catiónico (C.C.C.) y de las Bases de Cambio (B.C.)

Las partículas más finas del suelo (arcillas, humus, óxidos hidratados de hierro, aluminio y manganeso) tienen carácter coloidal, por lo que presentan una gran capacidad de adsorción de compuestos químicos en su superficie. Esto se debe, principalmente, al hecho de poseer cargas eléctricas con las que pueden retener reversiblemente iones, intercambiándolos con los existentes en la solución del suelo en el proceso llamado "intercambio o cambio iónico". Este fenómeno es de gran importancia para las plantas, ya que permite que queden retenidos en el suelo una gran cantidad de iones esenciales para la nutrición vegetal, que de no estar ligados a las partículas coloidales serían extraídos *–lixiviados–* del suelo por el agua que se infiltra.

La determinación de la capacidad de cambio catiónico (C.C.C.) es la medida de la capacidad de estas partículas coloidales de ligarse a los cationes y la determinación del contenido de las bases de cambio (B.C.) consiste en la cuantificación de los cationes que están ligados al suelo, calculando sus concentraciones. Es necesario su cálculo para conocer la capacidad del suelo para retener estos cationes, fundamentales tanto en la nutrición de las plantas como en el control del resto de propiedades del propio suelo como la salinidad. Los cationes que se cuantifican son, principalmente, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , cuyas concentraciones pueden variar al aplicar agua residual al terreno.

En relación a las actividades de recarga artificial de acuíferos, la capacidad de intercambio catiónico también desempeña un papel muy importante al estar relacionada con la adsorción de contaminantes presentes en las aguas depuradas, cuya concentración se pretende reducir o incluso eliminar a lo largo de su infiltración por la zona no saturada.





PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Para realizar el ensayo se proponen dos métodos:

- Método de los Embudos de percolación.
- Método de los Ensayos Batch.

Método de los Embudos de percolación:

Tanto las bases de cambio como la capacidad de cambio catiónico se determinan en el mismo ensayo de forma sucesiva, según la metodología recomendada por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (U.S.D.A., 1972). Los ensayos se realizan en continuo.

Método de los Ensayos Batch:

En este procedimiento se determinan las bases de cambio y la capacidad de cambio catiónico en el mismo ensayo, siguiendo la norma UNE 77300:1996. Mediante este método, en primer lugar se debe saturar el suelo de bario mediante tres lavados consecutivos con cloruro bórico (BaCl_2) 0,1 M. A continuación se equilibra con una solución de BaCl_2 0,01M y se le añade un exceso de sulfato magnésico (MgSO_4) 0,02 M. De esta manera, todo el bario presente precipita en forma de sulfato de bario y las posiciones con iones cambiables son ocupados por magnesio. En el sobrenadante se determina el exceso de magnesio. El valor de capacidad de cambio catiónico se determina por diferencia del magnesio añadido inicialmente y presente en el sobrenadante al finalizar el ensayo.

Para determinar las bases intercambiables, se toma un extracto de suelo en cloruro BaCl_2 0,1M acidificado. Para el análisis de sodio y potasio se debe añadir una solución de cesio para evitar la interferencia de la ionización y la concentración se determina por espectrometría de absorción atómica. Mientras que para el caso del calcio y el magnesio, y con el objetivo de evitar la formación de compuestos refractarios con fosfatos, aluminio, etc. en la llama del equipo de absorción atómica, se añade lantano en exceso.

Sin embargo, actualmente cada vez está más extendido un método en el que el suelo se satura de sodio mediante 3 lavados sucesivos con acetato sódico. El exceso de sal se elimina del suelo con lavados de etanol y el sodio adsorbido se desplaza posteriormente con acetato amónico, en cuya solución se determina el sodio. Este procedimiento es válido también para la determinación de las bases de cambio.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez conocido el valor de la capacidad de cambio catiónico (C.C.C.) y las concentraciones de las bases de cambio (B.C.), se puede clasificar el suelo atendiendo a estas propiedades empleando las tablas 5 y 6 respectivamente.

Suelo	Nivel de Capacidad de Cambio Catiónico (cmol/kg suelo)		
	Bajo	Normal	Alto
Arenoso, Areno-francoso, Franco-arenoso	5-10	10-15	> 15
Franco, Franco-arcillo-arenoso, Franco-limoso, Limoso, Arcillo-arenoso	10-15	15-20	> 20
Franco-arcilloso, Franco-arcillo-limoso, Arcillo-limoso, Arcilloso	15-20	20-30	> 30

Tabla 5. Niveles de capacidad de cambio catiónico según clasificación textural de suelo. (Fuente: Marañés et al., 1998).

Cati3n	Niveles de Bases de Cambio (cmol/kg suelo)			
	Muy bajo	Bajo	Normal	Alto
Ca ²⁺	< 2	2 - 5	5 - 10	> 10
Mg ²⁺	< 0,5	0,5 - 1,3	1,3 - 3	> 3
Na ⁺	-	-	2	> 2
K ⁺	< 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,6	> 0,6

Tabla 6. Niveles de bases de cambio (Fuente: Fern3ndez-Linares et al., 2006).

Tambi3n son de utilidad las relaciones presentadas a continuaci3n, ya que cuantifican las interferencias existentes en la concentraci3n de un cati3n debida a la presencia de otro (todas las concentraciones expresadas en cmol/kg) (Liebhardt, 1981).

Ca²⁺/ Mg²⁺ : La absorci3n de Mg²⁺ y K⁺ se ver3 interferida por un exceso de Ca²⁺. El valor 3ptimo de la relaci3n Ca²⁺/ Mg²⁺ est3 en torno a 5, mientras que valores mayores a 10 pueden suponer una deficiencia de Mg²⁺.

K⁺/Mg²⁺ : El valor 3ptimo para la relaci3n K⁺/Mg²⁺ est3 entre 0,2 y 0,3. Si los valores superan el 0,5 el potasio interferir3 en la concentraci3n de Mg²⁺, siendo posible su deficiencia. Si la relaci3n es de 0,1 o menor, el efecto puede ser el contrario, deficiencia de K⁺ inducida por el Mg²⁺.

Exceso de sodio (Na⁺): El Na⁺ en exceso puede suponer deficiencias en Ca²⁺ y Mg²⁺. Y si la concentraci3n de Na⁺ supera el 10 % de la C.C.C., puede existir salinidad de tipo s3dico.





8. Nutrientes del suelo

Además de los elementos que constituyen las bases del suelo, el nitrógeno, el fósforo y el potasio son los principales nutrientes. Junto con el azufre y las bases de cambio forman los denominados *macronutrientes*, que son limitantes del crecimiento y desarrollo de las plantas. Su cuantificación permite valorar la necesidad de aplicar abonos en el terreno o la toxicidad para las plantas. Sin embargo, esos tres elementos se encuentran en diferentes formas o especies químicas en el suelo, no siendo todas ellas asimilables.

Por otro lado se encuentran los *micronutrientes*, sustancias también necesarias para el desarrollo de las plantas, pero en cantidades muy inferiores a los elementos macronutrientes. Entre esos micronutrientes destaca el boro, cuyo rango de concentración es fundamental conocer.

Como se indicó en el apartado 4 (Determinación del pH), la disponibilidad tanto de los macronutrientes como de los micronutrientes es dependiente del pH del suelo, tal y como se muestra en la figura 2. En general, a pH con valores neutros aumenta la disponibilidad de los nutrientes, y por lo tanto su asimilación es mayor.

Además, tanto el nitrógeno como el fósforo, pueden dar lugar a fenómenos de eutrofización de las aguas si son aplicados en exceso en el suelo como, por ejemplo, con la adición de fertilizantes. Así, la vigilancia y control de estos parámetros es también muy importante en actividades de regeneración de aguas residuales para la recarga de acuíferos.

8.1. Nitrógeno

El nitrógeno del suelo se encuentra en forma orgánica e inorgánica. El N orgánico forma parte, por ejemplo, de los aminoácidos, proteínas y ácidos húmicos. Supone entre el 97 y el 99% del nitrógeno total presente en el suelo y no es asimilable por las plantas.

El resto es N inorgánico, clasificado en las siguientes fracciones: nitrito (N-NO_2^-), nitratos (N-NO_3^-) y amonio (N-NH_4^+), siendo las dos últimas fracciones las asimilables por las plantas, si bien la mayor parte del nitrógeno es absorbido en forma de nitrato.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Contenido total de nitrógeno:

Para determinar el contenido total de nitrógeno se recomienda el método por combustión seca o "análisis elemental" (norma UNE 77325:2003). En él, una muestra representativa de suelo se calienta a unos 900 °C para que todo el nitrógeno del suelo se desprenda en forma de NO_x o N_2 . Los NO_x se reducen a N_2 y todo el nitrógeno se mide mediante conductividad térmica.

Determinación de nitrógeno Kjeldahl:

El método Kjeldahl modificado propuesto en la norma UNE 77318:2001 sólo analiza el nitrógeno orgánico y el amoniacal. Consiste en una digestión previa de la muestra con un catalizador y ácido sulfúrico (H_2SO_4) para transformar todo el nitrógeno en amonio. Tras una destilación y una valoración con hidróxido de sodio (NaOH), se determina la cantidad de amonio presente en la muestra.

Determinación de nitratos:

De las formas en que encontramos al nitrógeno en suelo, como ya se ha descrito, esta es la fracción asimilable por las plantas, por lo que su determinación se hace necesaria a la hora de estudiar la evolución del suelo en el que se aplica agua regenerada. Se puede realizar con diferentes métodos, recomendando la extracción con sulfato de calcio (CaSO_4) 0,01 M (Griffin *et al.*, 2011).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 7 se muestra una clasificación de los niveles de N total en suelo (%).

Niveles relativos	N total (%)
Muy bajo	< 0,05
Bajo	0,05 - 0,10
Normal	0,10 - 0,20
Alto	0,20 - 0,30
Muy alto	> 0,30

Tabla 7. Clasificación de los niveles de nitrógeno total (%) en suelo. (Fuente: Marañés *et al.*, 1998).





El valor del nitrógeno total (analizado según la norma UNE 77325:2003) junto con el valor de carbono total (determinado por la norma UNE 77321:2003 especificada en el apartado de materia orgánica) conforman la relación C/N. Se trata de un buen índice de la fertilidad relacionado con la velocidad de descomposición de la materia orgánica en el suelo y con el ciclo de los nutrientes en los cultivos. Además, la disponibilidad del nitrógeno viene determinada por esta relación, ya que a valores menores de 30 el nitrógeno es liberado y puede ser asimilado por las plantas. Por el contrario, a valores mayores de 30 el nitrógeno no estará disponible para el cultivo (U.S.D.A., 1977; García-Serrano *et al.*, 2010).

8.2. Fósforo

A pesar de su baja movilidad y debido a las grandes tasas de aplicación sobre el terreno en forma de fertilizante, se puede producir su lavado y lixiviación hasta alcanzar la zona saturada. Este fenómeno se produce una vez superada la capacidad de saturación del suelo. El P, junto con el N, son los principales nutrientes que pueden dar lugar a los fenómenos de eutrofización de las aguas subterráneas, por lo que deben ser muy controlados en la actividades de regeneración de aguas residuales para recarga de acuíferos. Por otro lado, se trata de un elemento esencial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas.

El suelo contiene un gran número de compuestos de fósforo orgánico e inorgánicos de distinta solubilidad. El P orgánico insoluble no es aprovechable por encontrarse en forma coloidal, por lo que tan sólo el fósforo inorgánico es asimilable por las plantas. Pero en este caso, tampoco todo el fósforo inorgánico es susceptible de asimilación. El P inorgánico puede aparecer en el suelo en cuatro formas (Duchaufour, 1987; García-Serrano *et al.*, 2010):

- En la solución del suelo: es directamente asimilable por las plantas. El fósforo se encuentra en forma de H_2PO_4^- .
- Fijado en el complejo arcillo-húmico: está adsorbido en forma de PO_4^{3-} por el calcio, el hierro y el aluminio de las arcillas y de la materia orgánica. Es susceptible de intercambio.
- Como parte de la fase mineral secundaria: en el caso de suelos ácidos se encuentra precipitado o adsorbido en los óxidos de hierro y aluminio; en los suelos básicos se encuentra precipitado como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. En ambos casos es muy lentamente asimilable.
- Como fracción de la roca madre: es no asimilable por formar parte de la estructura de los minerales primarios, como por ejemplo del apatito ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$).

La absorción de P por parte de las raíces depende de su movilidad en la solución del suelo, controlada a su vez por su concentración. Ésta viene determinada por las reacciones de adsorción-desorción y precipitación-disolución. Se ve altamente influenciada por el pH, la fuerza iónica y los minerales de hierro y aluminio (Grant y Robertson, 1997). Su deficiencia causa disminución tanto de la superficie de las hojas como de su número, afectando también a la respiración y fotosíntesis (Hoppo *et al.*, 1999; Grant *et al.*, 2001).

Como se ha indicado anteriormente, la biodisponibilidad del fósforo depende de varios factores, siendo uno de los más importantes el pH del suelo (Figura 2). En suelos básicos (calizos) se forman fosfatos insolubles a través de procesos de insolubilización, mientras que en suelos ácidos, los procesos de mineralización y solubilización se ven favorecidos, aumentando por tanto la cantidad de fósforo susceptible de asimilación por las plantas (García-Serrano *et al.*, 2010).

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Existen fundamentalmente dos métodos que evalúan la cantidad de fósforo asimilable en suelos: método Olsen para suelos básicos a neutros (Olsen *et al.*, 1954) (descrito también en la norma UNE 77324:2003) y método Bray-Kurtz para suelos ácidos (Bray y Kurtz, 1945).

Método Olsen:

Se emplea para suelos de reacción neutra. Consiste en una extracción del fósforo de los fosfatos tricálcicos y el de la superficie de los fosfatos de Fe y Al con bicarbonato sódico (NaHCO_3) 0,5 M a pH 8,5 y a 20 °C.

Método Bray-Kurtz:

Aplicado a suelos de reacción ácida. Al igual que el método Olsen, consiste en una extracción del fósforo asimilable, pero en este caso se emplea como extractante carbonato cálcico (CaCO_3) y carbonato magnésico (MgCO_3) solubilizados con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido acético (CH_3COOH).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 8 se muestra una clasificación del nivel de fósforo asimilable en función de la textura del suelo.



Fósforo (mg/kg)	Arenoso	Franco	Arcilloso
Muy bajo	0 – 4	0 – 6	0 – 8
Bajo	5 – 8	7 – 12	9 – 16
Medio	9 – 12	13 – 18	17 – 24
Alto	13 – 20	19 – 30	25 – 40
Muy alto	21 – 32	31 – 48	41 – 64

Tabla 8. Niveles de fósforo (mg/kg) en el suelo según la textura del suelo.
(Fuente: García-Serrano et al., 2010)

8.3. Potasio

Las plantas absorben el potasio que se encuentra en la solución del suelo en forma de ión potasio. La cantidad de K en la solución del suelo está relacionada, generalmente, con el K intercambiable de las partículas de arcilla. Los cultivos extraen grandes cantidades de potasio del suelo, por lo que es importante su determinación para conocer si los niveles de K disponible son suficientes para satisfacer las demandas de las plantas.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Su determinación se realiza siguiendo las metodologías indicadas en el apartado de Bases de cambio.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Las bajas concentraciones de potasio influyen negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo, aumentando su vulnerabilidad a enfermedades, plagas y condiciones de estrés ambiental (sequías, encharcamientos, etc.). Sin embargo, en esos casos de déficit, el riego con aguas residuales tratadas puede aportar un extra de potasio. En la tabla 9 se puede observar la relación del nivel de potasio en función de la textura del suelo.

Potasio (mg/kg)	Arenoso	Franco	Arcilloso
Muy bajo	0 – 60	0 – 80	0 – 100
Bajo	60 – 120	80 – 160	100 – 200
Medio	120 – 180	160 – 235	200 – 300
Alto	180 – 300	235 – 390	300 – 490
Muy alto	> 300	> 390	> 490

Tabla 9. Niveles de potasio (mg/kg) en el suelo según las texturas. (Fuente: García-Serrano et al., 2010).

8.4. Azufre

El azufre es otro de los elementos esenciales de los tejidos vegetales y participa en múltiples reacciones que tienen lugar en el metabolismo de las plantas. Se trata de un elemento cuya presencia en el suelo está ligada a los minerales primarios, a la materia orgánica y/o a la deposición de azufre atmosférico. Sin embargo, y como ocurre en el caso de otros nutrientes, no todas las formas de azufre en el suelo son asimilables. Tan sólo el anión SO_4^{2-} soluble, débilmente retenido por el complejo de cambio aniónico, puede ser absorbido por las plantas (Duchaufour, 1987).

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

La medición de azufre como sulfato asimilable consiste en la extracción del mismo con dihidrógeno fosfato de calcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) 0,08 mM (500 ppm de P). El sulfato presente en las soluciones finales se mide mediante cromatografía iónica (Singh et al., 2011).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 10 se muestra una clasificación de los niveles de S extraíble en suelo (mg/kg).

Nivel de Azufre	S (mg/kg)
Muy bajo	< 6,00
Bajo	6,10 – 12,00
Medio	12,00 – 20,00
Alto	20,00 – 30,00
Muy alto	> 30,00

Tabla 10. Clasificación de los niveles de azufre extraíble (mg/kg) en suelo. (Fuente: López y López, 1990).



8.5. Boro

Se trata de un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, las cuales lo obtienen del B soluble presente en el suelo. La cantidad requerida por las plantas es muy pequeña y el intervalo entre concentraciones deficitarias y concentraciones tóxicas es muy estrecho (Keren, 1996). Por lo tanto, se trata de un parámetro especialmente importante en las actividades de regeneración de aguas residuales para riego de cultivos.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Existen diversas metodologías para su determinación, siendo la más aconsejable la técnica del agua caliente propuesta por Berger y Truog (1939). Se trata de un índice que mide la respuesta de las plantas a la fertilización con B en suelos deficitarios y el contenido de B en las plantas (Berger y Truog, 1940).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 11 se muestra una clasificación de los niveles de boro total en el suelo (mg/kg).

Niveles de Boro	B asimilable (mg/kg)
Muy bajo	< 0,20
Bajo	0,20 – 0,50
Medio	0,50 – 1,00
Alto	> 1,00

Tabla 11. Clasificación de los niveles de boro asimilable (mg/kg) en suelo. (Fuente: López y López, 1990).

8.6. Hierro, cobre, manganeso y cinc

Los cuatro micronutrientes metálicos principales son Fe, Cu, Mn y Zn. El Fe interviene en la síntesis de la clorofila y en la captación y transferencia de energía en la fotosíntesis y en la respiración. Actúa en reacciones de óxido-reducción, como la reducción de nitratos. El manganeso está ligado al hierro en la formación de clorofila. Además participa en el metabolismo de los hidratos de carbono. El zinc es fundamental en la formación de auxinas, que son las hormonas del crecimiento. Interviene en la síntesis de ácidos nucleicos, prote-

ínas y vitamina C. Tiene un efecto positivo en el cuajado, maduración y agostamiento. Y por último el cobre, que participa en la fotosíntesis y en el metabolismo de las proteínas (García-Serrano *et al.*, 2010).

Su asimilación depende de varias de las propiedades del suelo. El pH afectará a su solubilidad, la materia orgánica, debido a sus propiedades complejantes, forma combinaciones con los iones metálicos, siendo también asimilables estos complejos. La actividad microbiana controla las reacciones del Fe y Mn y compite con las plantas por el Zn. La interacción con el resto de nutrientes o entre los propios micronutrientes puede provocar carencias inducidas o absorciones exageradas, como el caso del P, cuyo exceso produce deficiencia de Fe y Zn (García-Serrano *et al.*, 2010).

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Existen diferentes procedimientos de extracción y posterior determinación de estos cuatro metales. El más empleado viene dado en la norma UNE 77315:2001, trabajando con suelo seco a temperatura menor de 40 °C, con tamaño de partícula inferior 2 mm y extrayendo estos micronutrientes con una solución de ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA).

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 12 se muestra una clasificación según los niveles de metal en el suelo (mg/kg).

Niveles de METALES (mg/kg)				
Metal	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
Fe ²⁺	-	<2,50	2,50 – 4,50	> 4,50
Cu ²⁺	< 0,10	0,10 – 0,30	0,30 – 0,50	> 0,50
Zn ²⁺	< 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 1,00	> 1,00

Tabla 12. Clasificación de los niveles de Fe²⁺, Cu²⁺ y Zn²⁺ (mg/kg) en suelo (Fuente: López y López, 1990).

Niveles inusualmente altos de estos metales indicarán contaminación natural relacionada con mineralizaciones de menas metálicas (p.e. sulfuros), o alternativamente, contaminación antrópica.



9. Mineralogía

Los minerales que forman el suelo controlan en gran medida sus propiedades tanto físicas como químicas, sobre todo aquellos que constituyen la fracción arcillosa.

Algunas de estas propiedades son, por ejemplo, estructura, superficie específica, retención de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico, contenido en humedad, densidad, pH y conductividad. A su vez, muchas de estas propiedades están relacionadas con los procesos de adsorción, complejación y precipitación en los suelos; fenómenos influyentes en la calidad del agua de recarga y en la disponibilidad de nutrientes para la plantas.

Las familias minerales más frecuentes en los suelos según sus clases son:

- Silicatos: caolinita, clorita, esmectita, feldespato, mica, minerales arcillosos y sílice.
- Carbonatos: calcita, dolomita.
- Sulfatos: yesos.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

En general, la identificación de minerales y la estimación cuantitativa de la cantidad de un determinado mineral presente en el suelo requiere de la aplicación de técnicas analíticas complementarias (Tucker, 1988). Las técnicas más empleadas son microscopía óptica convencional y difracción de rayos X. Estas técnicas se pueden complementar con las técnicas de microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión, cuyo coste es mayor.

10. Carbonatos

La presencia de carbonatos en el suelo está relacionada con un gran número de procesos, entre los que se encuentran la acumulación y la translocación de carbonatos pedogénicos (aquellos carbonatos formados *in-situ* en el suelo por procesos de disolución, translocación y reprecipitación de carbonatos) y la alteración de carbonatos litogénicos (heredados) a carbonatos pedogénicos.

La cantidad y la distribución de los carbonatos tiene efectos importantes sobre la fertilidad, la erosión y la capacidad de retención de agua del suelo. Con anterioridad a la regenera-

ción de aguas residuales mediante riego de cultivos, es importante determinar el contenido en carbonatos de los suelos ya que contenidos altos de caliza pueden provocar fenómenos de clorosis en determinadas plantas (procesos de amarillamiento del tejido de las hojas como consecuencia de la carencia de clorofila). Por lo tanto, este parámetro puede influir en el tipo de plantas a cultivar (calcífugas o calcícolas).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las superficies de las partículas de carbonato cálcico son reactivas y controlan procesos de adsorción y precipitación, por ejemplo, de elementos traza, ácidos orgánicos y fosfatos. De esta manera, en las actividades de recarga de acuíferos con aguas residuales, la composición de las mismas irá variando a lo largo de su infiltración en el terreno. Por ejemplo, el contenido alto en HCO_3^- favorece la solubilidad de la calcita, aumentando por lo tanto la concentración de calcio en las aguas regeneradas (Custodio y Llamas, 2001).

Otro factor que determina la importancia de la medición de carbonatos en el suelo es su relación con el poder de amortiguación de la variación del pH en el mismo, sobre todo cuando estos cambios se producen en rangos neutros o ligeramente alcalinos. En estos casos, en suelos que contienen materia orgánica y *caliza activa* (fracción de carbonatos susceptible de solubilizarse), el tamponamiento tiene lugar gracias al sistema de equilibrio entre carbonato, bicarbonato y ácido carbónico. Así, los suelos bien tamponados frente a los ácidos son los que contienen abundante calcio, y por tanto, el complejo de cambio saturado en bases.

PROCEDIMIENTO DE DETERMINACIÓN

Existen fundamentalmente dos métodos aplicables: determinación de carbonato cálcico equivalente para bajos contenidos en CaCO_3 (< 10%) y determinación de la caliza activa para suelos con contenidos en CaCO_3 superiores al 10%.

Determinación del carbonato cálcico equivalente:

Se determina mediante el método volumétrico recogido en la norma UNE 77317:2001. Consiste en disolver con HCl dos muestras patrón de carbonato junto con la muestra de suelo. La medida de la cantidad de CO_2 desprendido se mide con un calcímetro (generalmente el de Bernard). Para obtener el resultado, se compara el CO_2 desprendido de la muestra con el desprendido de las muestras patrón de carbonato cálcico puro. El resultado se expresa como cantidad equivalente de CaCO_3 .



Determinación de la caliza activa:

Se determina mediante calcimetría de carbonato amónico, ya que la caliza de tamaño $< 50 \mu\text{m}$ reacciona con una solución de oxalato de amonio para formar oxalato cálcico.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En función del contenido en carbonato, los suelos se clasifican como se muestra en las tablas 13 y 14:

Niveles relativos	CaCO ₃ equivalente (%)
Muy bajo	0 – 5
Bajo	5 – 10
Normal	10 – 25
Alto	25 – 40
Muy alto	> 40

Tabla 13. Clasificación de los niveles de CaCO₃ equivalente (%) (Fuente: Maraños et al., 1998).

Niveles relativos	Caliza activa (%)
Normal	0-60
Alto	60-90
Muy alto	> 90

Tabla 14. Clasificación de los niveles de caliza activa (%) (Fuente: Maraños et al., 1998).

bibliografía

guía de
**caracterización
edáfica** para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales



ASTM-E 100. Standard Specifications for ASTM Hydrometers.

Berger, K.C., Truog, E. (1939). *Boron determination in soils and plants*. Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition. 11, 540-545.

Berger, K.C., Truog, E. (1940). *Boron deficiencies as revealed by plant and soil tests*. Journal of the American Society of Agronomy. 32, 297-301.

B.O.E. (1992). Real Decreto 1315/1992, por el que se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, aprobado por el Real Decreto 849/1986. BOE nº 288 de 1/12/1992, pp. 40563-40565.

B.O.E. (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el regimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. BOE nº 294 de 08/12/2007, pp. 50639-50661.

Bray, R.H., Kurtz, L.T. (1945). *Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil*. Soil Society. 59, 39-45.

Casas, A., Tapias, J., de Bustamante, I., Iglesias, J.A., de Miguel, A., Lillo, J, Leal, M., Candela, L., Cabrera, M.C., Palacios-Díaz, P., Salas, J.J., Martín, I. (2011). *Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y recarga de acuíferos*. Ed. Consolider-Tragua. 46 p.

Custodio, E., Llamas, M.R. (2001). *Hidrología subterránea*. Omega, 2ªed (1º vol), Barcelona. 1157 p.

Duchaufour, Ph. (1987). *Manual de edafología*. Masson, Barcelona. 214 p.

Etchevers, J.D. (1988). *Análisis químico de suelos y plantas*. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México. 803 p.

Fernández-Linares, L.C., Rojas-Avelizapa, N.G., Roldán, T.G., Ramírez-Islas, E., Zegarra, H.G., Uribe, R., Reyes-Ávila, R.J., Flores, D., Arce, J.M. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo. 180 p.

García-Serrano Jiménez, P., Ruano Criado, S., Lucena Marotta, J.J., Nogales García, M. (2010). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid. 119 p.

- Grant, R.F., Robertson, J.A. (1997). *Phosphorus uptake by root systems: Mathematical modeling in ecosys*. Plant and Soil. 188, 279-297.
- Grant, C.A., Flaten, D.N., Tamasiewicz, D.J., Sheppard, S.C. (2001). *The importance of early season phosphorus use in agriculture*. Journal of Environmental Quality. 29, 80-87.
- Griffin, G., Jolela, W., Ross, D., Pettinelli, D., Morris, T., Wolf, A. (2011). Recommended Soil Nitrate tests. In: *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States*, Chapter 4. Northeastern Regional Bulletin. University of Delaware, College of Agriculture and Natural Resources, Newark, United States of America. 3rd ed., 27-38.
- Hochstrat, R., Wintgens, T., Melin, T., Jeffrey, P. (2005). *Wastewater reclamation and reuse in Europe: a model-based potential estimation*. Water Science and Technology: Water Supply, 5 (1), 67-75.
- Hoppo, S.D., Elliot, D.E., Reuter, D.J. (1999). *Plant test for diagnosing phosphorus deficiency in barley (Hordeum vulgare L.)*. Australian Journal of Experimental Agriculture. 39, 857-872.
- ISO 11464:2006. Calidad del suelo. Pretratamiento de las muestras para el análisis físico-químico.
- Keren, R. (1996). Boron. In: *Methods of Soil Analysis, Part 3 – Chemical Methods*. D.L. Sparks et al., eds. Soil Science Society of America Journal. Book Series 5, 603-626.
- Kononova, M.M., (1966). *Soil organic matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility*. Pergamon, 2nd English edition, Oxford, 544 p.
- León-Arteta, R. (2001). *Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos*. Terra. Volumen 19, Número 3, 219-225.
- Liehardt, W.C. (1981). *The basic cation saturation concept and lime and potassium recommendations on Delaware's Coastal Plain soils*. Soil Science Society of America Journal. 45, 544-549.
- López, R.J., López, M.J. (1990). *El diagnóstico de suelos y plantas (Métodos de campo y laboratorio)*. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. 363 p.
- Marañés Corbacho, A., Sánchez Garrido, J.A., de Haro Lozano, S., Sánchez Gómez, S.T., del Moral Torres, F. (1998). *Análisis de suelos. Metodología e interpretación*. Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones, Almería. 184 p.

- Nelson, D.W., Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon and organic matter*. In: Page, A.L. Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds). *Methods of soil analysis, part 2*, Madison, United States of America ASA Publ. No 9, 2nd ed., 539-577.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. USDA U.S. Government Printing Office, Washington D.C. Circular, 939.
- Schnitzer, M., Khan, S.U. (1978). *Soil organic matter*. Developments in Soil Science. Elsevier, New York. 8.
- Singh, R., Bhumbra, D.K., Keefer, R.F. (2011). Recommended soil sulfate-S tests. In: *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States*, Chapter 7. Northeastern Regional Bulletin. University of Delaware, College of Agriculture and Natural Resources, Newark, United States of America. 3rd ed., 55-62.
- Troug, E. (1946). *Soil reaction influence on availability of plant nutrients*. Soil Science Society of America. Proceedings 2: 305-308.
- Tucker, M. (1988). *Techniques in sedimentology*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 408 p.
- UNE 103102:1995. Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro.
- UNE 77300:1996. Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de cambio catiónica efectiva y del grado de saturación de bases, mediante solución de cloruro bórico.
- UNE 77305:1999. Calidad de suelo. Determinación del pH.
- UNE 77308:2001. Calidad de suelos. Determinación de la conductividad eléctrica específica.
- UNE 77314:2001. Calidad del suelo. Determinación de la distribución granulométrica de la materia mineral de los suelos. Método por tamizado y sedimentación.
- UNE 77315:2001. Calidad del suelo. Extracción de oligoelementos con una disolución tampón de ADTP.
- UNE 77317:2001. Calidad del suelo. Determinación del contenido en carbonato. Método volumétrico.

- UNE 77318:2001. Calidad del suelo. Determinación de nitrógeno total : método Kjeldahl modificado.
- UNE 77321:2003. Calidad de suelo. Determinación del carbono orgánico y carbono total mediante combustión seca (análisis elemental).
- UNE 77324:2003. Calidad del suelo. Determinación del fósforo. Determinación espectrofotométrica del fósforo soluble en una disolución de hidrógenocarbonato de sodio.
- UNE 77325:2003. Calidad de suelo. Determinación del contenido de nitrógeno total por combustión seca (análisis elemental).
- UNE-ISO 14507:2004. Calidad del suelo. Pretratamiento de las muestras para la determinación de contaminantes orgánicos.
- U.S.D.A. (1972). *Soil Conservation Service*. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Washington DC, United States of America.
- U.S.D.A. (1977a). *National Soil Survey Manual*.
- U.S.D.A. (1977b). *Relationships of carbon to nitrogen in crop residues*. Conservation Agronomy Technical Notes, nº30. New Mexico, United States of America
- U.S.D.A. (1996). *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report Nº 42. Versión 3.0. Washington DC, United States of America.
- U.S.D.A. (2002). *National Soil Survey Center Natural Resources Conservation Service*. Field book for describing and sampling soils. Versión 2.0. Salt Lake City, United States of America.
- U.S.D.A. (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Burt, E. (ed). Soil Survey Investigations Report, nº42, version 4.0. 700 p.





Editor:

Consolider Tragua

ISBN:

978-84-695-4037-4

Diseño y maquetación:

base 12 diseño y comunicación

entidades participantes



guía de
**caracterización
edáfica** para actividades de
regeneración de aguas residuales
en usos ambientales