INTERPRETACIÓN DE PERFILES EDÁFICOS COMO PARTE DE UN PAISAJE A FIN DE DEFINIR MANEJOS SUSTENTABLES. 2017.

Ing Agr (Dra MSc) Margarita M. Alconada Magliano

El ***objetivo principal del estudio de los suelos*** *es "identificar los orígenes de las limitantes y potencialidades a fin de definir la aptitud de uso y la factibilidad técnica, económica y social de intervenciones que coadyuven para revertir una situación limitante y/o preservar o mejorar la potencialidad productiva".*

INDICE

I INTRODUCCIÓN
I 1 El estudio del suelo en el paisaje
I 2 La fertilidad edáfica: dotación y abastecimiento
I 3 Método de análisis: fracción extraída y alcances de la interpretación
I 4 Ejemplo, parámetros de la fertilidad edáfica en N, procedimientos frecuentes

II PROCEDIMIENTO DE LA INTERPRETACIÓN DEL SUELO EN EL PAISAJE
II 1 Secuencia de análisis del perfil edáfico
II 2 Propiedades físicas, físico-químicas y químicas en el perfil edáfico
II 3 Propiedades asociadas a las propiedades principales. Posibles degradaciones
II 4 Funcionamiento del suelo local en lo regional (agua superficial y subterránea)

III VALORES DE REFERENCIA DE PROPIEDADES EDÁFICAS PRIMARIAS Y ASOCIADAS.
Propiedades físicas primarias y asociadas: Textura. CRAD. Indice de encostramiento. Permeabilidad e Infiltracion. Densidad aparente, real, porosidad total y de aereación.
Propiedades físico-químicas: pH. Salinidad. Alcalinidad.
Propiedades químicas: i- Criterio de Aportación-Extracción). ii- Criterio de Suficiencia: materia orgánica,, nitrógeno, cationes intercambiables, fosforo. Ejemplo sobre Diagnóstico, necesidad de fertilizar en N y elección de fertilizantes. iii- Relación entre Cationes para abastecimiento, y dotación.

IV LIMITANTES Y POTENCIALIDADES DEL SUELO. ORÍGENES.

FIGURAS

Figura 1 Degradaciones en el suelo, efectos en las variables edáficas y consecuencias en el ambiente
Figura 2 Sistemas de flujo de agua subterránea, tipos y zonas
Figura 3 Secuencia de suelos a partir de un material original loess y clima templado húmedo en función del drenaje que varía con la calidad y forma en que inciden los flujos de agua subterránea
Figura 4 Calidad de agua en función del tipo de flujo y zonas e indicadores ambientales asociados
Figura 5 Triángulo de textura 12 clases texturales
Figura 6 Grupos de clases texturales en base a la plasticidad
Figura 7 Agua útil en diferentes clases texturales (extraída de Darwich, 2006)
Figura 8 Agua útil (mm) según textura y diferentes profundidad
Figura 9 CRAD del suelo Argiudol típico hasta 1,20m
Figura 10 Infiltración con doble anillo: medición a campo y esquema
Figura 11 Extracción de N-P-K en diferentes cultivos de clima templado a tropical
Figura 12 Fósforo extractable y rendimiento relativo de cultivos en pradera pampeana

TABLAS

Tabla 1 Formas del K en suelos pampeanos
Tabla 2 Grupos de clases texturales por el comportamiento frente al laboreo y drenaje
Tabla 3 Contenido de humedad a CC según textura

Tabla 4 Humedad equivalente, % suelo seco
Tabla 5 Capacidad de almacenamiento de agua aprovechable (cm agua /m suelo)
Tabla 6 Humedad a CC y PMP en suelo Argiudol típico
Tabla 7 Índice de encostramiento
Tabla 8 Grados de permeabilidad según doble anillo
Tabla 9 Permeabilidad de los suelos según su textura
Tabla 10 Relación de la velocidad de infiltración en terrenos con pendiente
Tabla 11 Valores de referencia de densidad aparente
Tabla 12 Valores de referencia de densidad real
Tabla 13 Valores de densidad aparente (DA), humedad actual (HA), porosidad total (PT), y espacio aéreo (EA) en suelo Argiudol típico con diferente manejo y posición
Tabla 14 Ejemplos de DA, CC, y HA, en diferentes ambientes de Chubut
Tabla 15 Ejemplos de DA, CC, en diferentes ambientes de Catamarca
Tabla 16 Ejemplos de DA, CC, en diferentes ambientes de Mendoza y San Juan
Tabla 17 pH en agua relación 1:1
Tabla 18 Interpretación de los valores de pH en agua
Tabla 19 pH potencial en KCl
Tabla 20 Resistencia eléctrica de la pasta (ohms)
Tabla 21 Conductividad eléctrica (dS/m o mmhos/cm a 25º C)
Tabla 22 Sales en solución saturada (g/l)
Tabla 23 Salinidad de suelo en relaciones suelo-agua 1:2, 1:5 respecto a la CE en el extracto de saturación
Tabla 24 Porciento de sodio intercambiable (PSI) extraído Acetato de amonio, pH7, 1N
Tabla 25 Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 o cmol/kg)
Tabla 26 Requerimientos nutricionales de los cultivos, absorción y extracción por tonelada de órgano cosechado
Tabla 27 K asimilable (mg/100 g de suelo)
Tabla 28 K intercambiable (meq/100 o cmol/kg)
Tabla 29 Ca^{+2} y Mg^{+2} asimilable (mg/100 g de suelo) extraído con AcNH4
Tabla 30 Ca^{+2} intercambiable (meq/100 o cmol/kg)
Tabla 31 Mg^{+2} intercambiable (meq/100 o cmol/kg)
Tabla 32 Valores frecuente de cationes intercambiables en la pradera pampeana
Tabla 33 Contenido de materia orgánica (%)
Tabla 34 Contenido de nitrógeno total (%)
Tabla 35 Relación C/N
Tabla 36 Contenido de $N\text{-}N0_3^-$
Tabla 37 Interpretación de P según diferentes métodos
Tabla 38 Valores de referencia de Pasimilable, BK1
Tabla 39 Ejemplo de interpretación de variables de suelo en Costa Rica
Tabla 40 Reacción del suelo y elección de la forma del N en el fertilizante
Tabla 41 Porciento de saturación de cationes en CIC
Tabla 42 Proporción de cationes en el complejo de intercambio de un suelo agrícola
Tabla 43 Relación entre %cationes intercambiable y pH en suelos Argentinos
Tabla 44 Relación entre pH, % de saturación en bases, valor S, CIC, y MO
Tabla 45 Relaciones entre niveles de nutrientes medidos en meq/100
Tabla 46 Relaciones sinérgicas y antagónicas entre nutrientes
Tabla 47 Interacciones más comunes

Nota: *los criterios de interpretación aquí presentados en las variables edáficas son en general de uso frecuente en el mundo, con excepción de algunas que han sido especialmente ajustadas para la pradera pampeana. En las diferentes guias de TP del curso de Edafologia se amplia y complementa lo aquí presentado en forma sintetica.*

Se recomienda que Ud realice su propio análisis y conclusiones sobre los perfiles seleccionados. Lo consignado como limitantes y riesgos de manejo en las descripciones edáficas publicadas deben ser por Ud corroborado.

INTRODUCCIÓN

I 1 El estudio del suelo en el paisaje

Los principales parámetros que definen la ***fertilidad de un suelo*** fueron desarrollados en trabajos prácticos previos. Este tema puede también ser consultado en el Libro de Cátedra Suelo en el Paisaje (UNLP, Aula Virtual). Aquí, se reiteran los principales conceptos a fin de facilitar el uso de las tablas interpretativas que se presentan para cada una de las variables edáficas. Estas ***variables edáficas se interrelacionan entre si****,* y a su vez ***un horizonte*** se vinculación los ***otros***, y un ***perfil*** se integra en un ***ambiente local*****,** y este en un ***ambiente regional***. Consecuentemente se considera el estudio del suelo estableciendo como se vincula con los otros elementos del paisaje. Esta comprensión es la base para definir ***el origen de las limitantes y potencialidades.*** En este punto cabe recordar que el suelo se define como un cuerpo natural, con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles dado que resulta de la interacción de los factores formadores. Asi, si esto factores se combinan de manera análoga darán origen a suelos semejantes (se amplía en trabajos prácticos sobre Factores Formadores (guías TP y Libro Cátedra mencionado).

Cabe destacar que en curso de Edafologia, se analizan las características morfológicas y analíticas que se describen en los perfiles edáficos de la cartografía disponible en el país, principalmente INTA, Universidades y Ministerios, consecuentemente se podrá analizar lo allí consignado. Sin embargo, es posible no solo inferir otras propiedades que derivan de propiedades primarias (punto II.3) sino también, el funcionamiento del suelo local en el contexto regional (II4), así como los riesgos que supone el manejo de los suelo (II3, II4, III).

I 2 La fertilidad edáfica: dotación y abastecimiento

La ***Fertilidad de un suelo*** queda definida por los parámetros de dotación y abastecimiento, y definen las *potencialidades y limitaciones* de uso del suelo, su productividad y comportamiento frente al agua, vegetal y manejo posible a fin de preservar o mejorar una situación dada, promoviendo *producciones sustentables* en términos productivos, ambientales, económicos y sociales.

Si un suelo no es manejado conforme a sus limitaciones el mismo se degrada o se contamina. La factibilidad de revertir una limitante o coadyuvar en una situación dada mediante el manejo, por ejemplo excesos hídricos, es conociendo su origen.

Degradación, término genérico que implica una pérdida de la calidad del suelo.

Calidad de suelo, capacidad del mismo para funcionar, dentro de los límites del ecosistema, para una productividad biológica sostenible, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de las plantas y animales.

Suelo contaminado, aquel que ha sufrido un cambio en sus características químicas, físicas o biológicas, que por su naturaleza, dimensión o duración en el tiempo, resulte incompatible con sus propiedades funcionales de uso o suponga una amenaza grave para la salud pública o el medio ambiente.

Las variables a estudiar y profundidad de su análisis depende del objetivo. Sin embargo en todos los casos el concepto global de fertilidad edáfica debe ser definido a partir del estudio de todo el perfil edáfico estableciendo su funcionamiento local en el contexto regional.*Así por ejemplo, algunas* variables edáficas tal como materia orgánica, fósforo, azufre, nitrógeno total, micronutrientes, es necesario evaluarlas en los horizontes superficiales de mayor desarrollo radicular. Otras propiedades que definen por ejemplo la circulación del agua y del aire, salinización, alcalinización, rasgos hidromórficos, es necesario que se analicen en todo el perfil estableciendo si dichas propiedades resultan de factores locales y/o regionales.

En forma genérica se puede indicar que las ***evaluaciones relacionadas a la nutrición*** **(dotación)** será suficiente medirlas en superficie (con excepciones que serán analizadas) y aquellas que hacen al abastecimiento en todo el perfil.

La Dotación es definida a partir de *variables químicas de nivel y de flujo:*

- *Variables de nivel:* ⇨ *INTENSIDAD* **(I)**
  - Intensidad absoluta (valor suficiente de un nutriente)
  - Intensidad relativa (relaciones entre nutrientes)
    ⇨ *CAPACIDAD* **(Q)**

- *Variable de flujo: RENOVACIÓN*, reposición de un ión en solución **(I)** a partir de la fase sólida **(Q)** a medida que la raíz absorbe un nutriente.

Abastecimiento, propiedades físicas y físico-químicas (pH, salinidad, alcalinidad, resistencia mecánica, aireación, temperatura, agua disponible, sustancias tóxicas o en excesos, permeabilidad, drenaje). Estas propiedades son las que determinan si efectivamente el contenido de un nutriente medido en superficie (dotación) estará efectivamente disponible para la planta) dado que incide en la renovación (pasaje desde el factor capacidad, reserva del suelo, al factor intensidad, inmediatamente disponible para las plantas).Asimismo, las condiciones de abastecimiento establecen las condiciones adecuadas para el crecimiento de las plantas en relación a la aireación, circulación del agua, drenaje.

Consecuentemente, la fertilidad del suelo queda definida por ***propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas,*** e igualmente serán definidas las ***degradaciones*** ya que estas serán puestas de manifiesto en dichas propiedades.

En la Figura 1, se presenta un esquema sobre las propiedades del suelo, físicas, físico-químicas, y químicas, sus relaciones, así como las degradaciones más frecuentes, y consecuencias en el ambiente (aire, efecto invernadero; y en agua subterránea, contaminaciones).

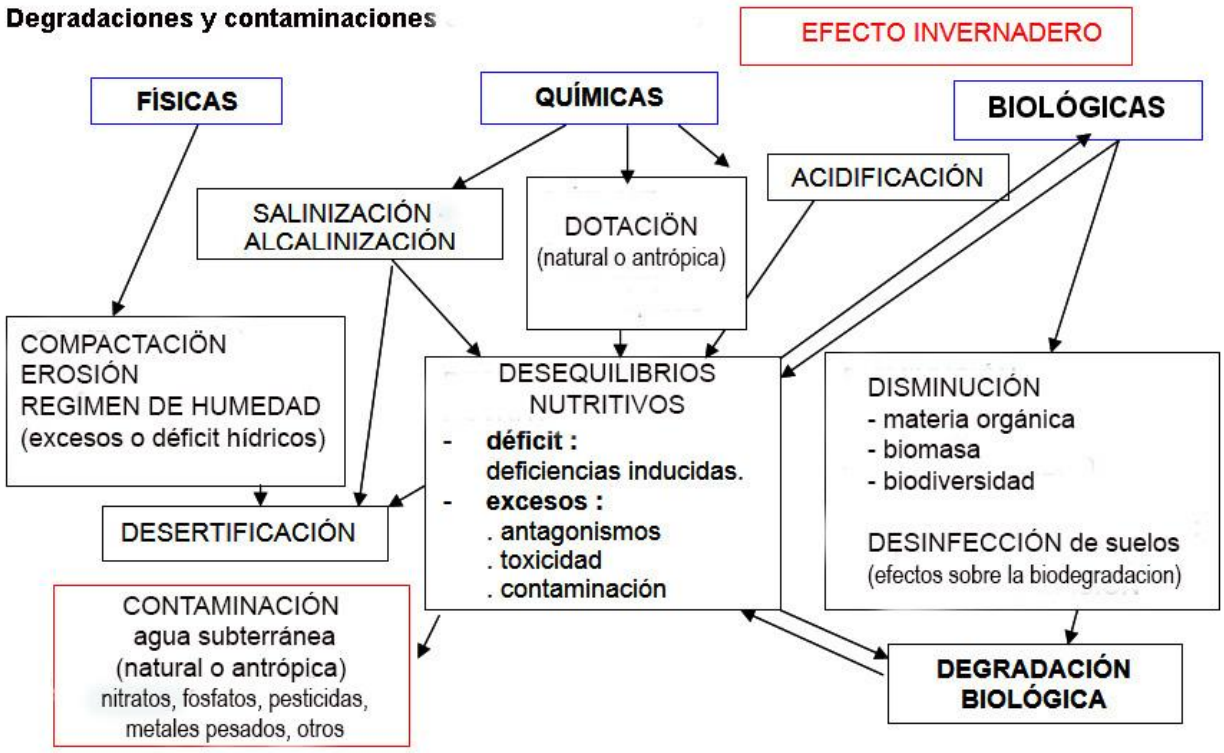


Figura 1 Degradaciones en el suelo, efectos en las variables edáficas y consecuencias en el ambiente

I 3Método de análisis: fracción extraída y alcances de la interpretación

***Método y fracción extraída_*.** Los métodos de análisis son ajustados a fin de que estos representen la respuesta en rendimiento y crecimiento de la planta. Esto es, como el valor obtenido por un método dado se relaciona con lo que podría absorber la planta para una condición de suelo. Así por ejemplo, el *extractante* que se utilice en un procedimiento de análisis debe extraer una cantidad de elemento proporcional a la cantidad de elemento que será extraído por la planta en un suelo particular. La facilidad con que la planta puede extraer un nutriente depende no sólo de su presencia en el suelo (dotación) sino también de la forma en que el mismo se encuentra, así como, de las propiedades que determinan que efectivamente un determinado nivel de nutriente esté disponible, tales como pH, CE, CIC, etc,(*Abastecimiento*).

Muchas variables son medidas por procedimientos aceptados a nivel internacional como principales tal como los métodos usados en materia orgánica, N total, cationes intercambiables, capacidad de intercambio catiónico, entre otras. Por el contrario, otras variables tal como el P puede ser medido por un gran número de métodos que extraen diferentes fracciones de P según condiciones del medio, si bien unos pocos son los procedimientos principales. Consecuentemente en estos últimos casos, debe establecerse el procedimiento de análisis pertinente conociendo por ejemplo las condiciones de pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónica (CIC), materia orgánica (MO), contenido de calcáreo, y/o contenido de arcilla.

Así, la ***dotación*** de un suelo en particular, para una región dada será medida por procedimientos para los cuales se han establecido ***niveles de referencia*** (valores asociados al método), que fueron definidos considerando las condiciones de ***abastecimiento***.

Los criterios de interpretación que aquí se presentan han sido extraídos de la bibliografía internacional, y son las que se utilizan en la pradera pampeana argentina.

En el siguiente ejemplo (Tabla 1), referido a las concentraciones de las ***diferentes formas del K de suelos pampeanos, expresado en*** diferentes unidades y equivalencias (Andreoli y Peineman, 1984) se puede apreciar más claramente lo indicado respecto a la importancia de definir el método de análisis. El extractante en función de su capacidad para disolver, hidrolizar, ionizar, etc, extraerá diferentes fracciones del elemento. El método más difundido en la pradera pampeana para medir el K intercambiable es con la extracción del *acetato de amonio* (1 N, pH 7). En la zona hortícola del Gran La Plata, es frecuente también medir el ***K soluble*** en los extractos obtenidos directamente del suelo (solución edáfica principalmente definida por el fertirriego).

Forma de K	**meq/100 o cmol/kg**	**ppm**	**kg/ha***
K total	27 – 38	10.800 -15.200	**30.400**
K estructural	24 – 32	9.600 – 12.700	**25.400**
K fijado	2 – 4	800 – 1.600	**3.200**
K intercambiable	1- 2	400 - 800	**1.600**
K solución	0,066 - 0,18	25 - 70 generalmente < 10 ppm en zonas húmedas	**140**

Tabla 1 Formas del K en suelos pampeanos (extraído de Andreoli y Peineman, 1984)
*Kg/ha se calcula para un peso de 2000tn de tierra por ha

Se destaca entonces, la importancia de entender **que es lo que evalúa** un método, y a partir de allí **como se interpreta.**

***Alcance en la interpretación de un valor individual_*.** Los laboratorios de una región en general trabajan con los procedimientos ajustados a las condiciones ambientales (métodos de rutina estandarizados). Sin embargo, estevalor es válido para interpretar una variable, en un horizonte.

Al ***analizar el perfil*** pueden producirse ***dos situaciones principales*** que modifica la interpretación en la lectura de un valor dado:

i) Que un valor de ***dotación*** *"a priori"* suficiente para el desarrollo del cultivo en la práctica no lo sea. Por ejemplo, por *condiciones de* abastecimiento*, mal drenaje* en la disponibilidad de N a partir de ***Nt***; o condiciones de *pH inadecuadas* para el desarrollo de los cultivos y consecuentemente los datos medidos no se ajustan a la realidad edáfica; o que existan *desequilibrios químicos*, tal es el caso del Ca y P (intensidad relativa), entre otros tantos ejemplos.

ii) Que las ***condiciones de abastecimiento*** *sean determinantes* de la productividad del suelo, independientemente de que exista o no niveles adecuados en todos los nutrientes.

Se destaca que en general, ***erróneamente ha sido considerada a la nutrición química*** como condicionante del rendimiento de los cultivos o desarrollo vegetal en general. Sin embargo, ***son las propiedades físicas y físico-químicas,*** que determinan el abastecimiento, las que definen la productividad del suelo (Baver, 1972).

Así si un suelo tiene ***bajo nivel de P*** puede solucionarse mediante el agregado de fertilizantes. Sin embargo, si el problema es el mal de drenaje que condiciona una serie de limitantes nutricionales y físicas, la solución no podrá ser alcanzada tan fácilmente, y tal vez para un momento dado, sólo sea posible la elección de especies vegetales adaptadas a estas condiciones.

Existen en el mundo numerosos ejemplos exitosos de recuperación de suelos con situaciones extremas de improductividad debido a condiciones de mal drenaje (FAO, El drenaje de suelos pesados, 1971). Sin embargo, esto requiere de necesidad, decisión, tiempo y dinero para hacerlo, y sobre todo, definir el origen de la limitación y la sustentabilidad de los cambios que se propongan.

I 4 Ejemplo, parámetros de la fertilidad edáfica en N, procedimientos frecuentes

Intensidad (I): NO^-_3, NH^+_4, forma disponible en solución:

- *Absoluta:* considera la concentración del nutriente, expresado en %, ppm; kg/ha (valor de laboratorio para una metodología)
- *Relativa**:*** concentración de un elemento en función de la cantidad de otros elementos. Por ejemplo, en la nutrición de los cultivos es importante la concentración de N respecto al P, Ca con respecto al Mg, K, P.

Medida de intensidad, NO_3^-: uno de los métodos frecuentemente utilizado es el del *fenol disulfónico.* Se recomienda medirlos hasta la profundidad efectiva o profundidad de enraizamiento. Esto es debido a que los nitratos son móviles en el perfil y la planta puede extraerlo más allá del horizonte superficial A. Cabe destacar que es frecuente que se recomiende su medición en tres profundidades (0-20, de 20-40, y 40-60 cm), sin embargo, resulta mas adecuado medir el contenido por horizonte a fin de considerar también las condiciones de abastecimiento.

Capacidad (Q): reserva de Nitrógeno lábil en la fracción de N orgánico:

Medida de capacidad Ntotal (%) por Kjeldahl el cual se vincula al contenido de materia orgánica. En forma aproximada puede considerarse que el Nt representa el 5% de la materia orgánica medida en laboratorio. A fin de establecer el agotamiento del suelo o posibles inmovilizaciones microbianas se analiza el contenido de C orgánico respecto al Nt (relación C/N)

Renovación (R): transformación del factor capacidad en intensidad. En el caso del N, es la mineralización de la materia orgánica para transformarse en Nt y este en NO_3^-.Así, el Nt contenido en la materia orgánica al mineralizarse (mineralización secundaria e/2 y 6%) libera NO_3^-a la solución que es tomado por la planta (factor Intensidad). Todas estas transformaciones son

realizadas por microorganismos que tienen condiciones óptimas de desarrollo asociadas a las condiciones del medio, principalmente clima y abastecimiento.Así, aún en los casos en que el nivel de Nt medido por Kjeldahl sea suficiente según valores de referencia estandarizados para dicho método (Tabla 34), si no se dan las condiciones propicias para que los microorganismos del ciclo del N efectúen cada una de las etapas hasta la producción de NO_3^-(mineralización, amonificación y nitrificación, ver trabajo práctico de N) pueden darse deficiencias de Npara las plantas. Asimismo cabe destacar que en condiciones de anaerobios pueden llegarse a producir niveles tóxicos de por ejemplo $\mathbf{NH^+_4}$, dado que los microorganismos de la amonificación son menos exigentes que los de la nitrificación y consecuentemente no continúa el proceso.

II PROCEDIMIENTO DE LA INTERPRETACIÓN DEL SUELO EN EL PAISAJE

II 1 Secuencia de análisis del perfil edáfico

El procedimiento para estudiar el perfil edáfico debe permitir alcanzar el ***objetivo principal*** *del estudio de los suelos para efectuar intervenciones sustentables: "identificar los orígenes de las limitantes y potencialidades a fin de definir la aptitud de uso y la factibilidad técnica, económica y social de intervenciones que coadyuven para revertir una situación limitante y/o preservar o mejorar la potencialidad productiva".*

Tal como se comentó al inicio (punto I), en el curso de Edafología se utiliza de base para interpretar perfiles descriptos en la cartografía disponible, debiéndose inferir el resto de propiedades que en conjunto definen la fertilidad del suelo local y como se vincula y a su vez es resultante de su entorno regional.

Etapas principales en el estudio del perfil_.

- -Evaluar propiedades edáficas en forma individual de cada grupo de propiedades físicas, físico-químicas y químicas (propiedades primarias)
- -Asociarlas para inferir propiedades derivadas de estas(propiedades secundarias)
- - Funcionamiento del suelo local en lo regional (influencia del agua subterránea y de escurrimiento).
- -Establecer aptitud de uso de los suelos a partir de sus limitantes y potencialidades indicando su orígenes de modo de establecer la pertinencia de intervenciones

A partir de esto surge el ***manejo,*** posible, sustentable, tendiente a obtener el objetivo de intervención: ***recuperación, puesta en valor o preservación de un ambiente.***

II 2 Propiedades físicas, físico-químicas y químicas en el perfil edáfico

Propiedades físicas en cada uno de los horizontes y para todo el perfil:
Textura, estructura, color y consistencia. Interpretar cada variable en forma individual, por alguno de los criterios conocidos.

Propiedades físico-químicas en cada uno de los horizontes y para todo el perfil:
pH, CE, CIC, Na^+, Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^+, valores absolutos y relativos (porciento de saturación de cada uno de ellos y relaciones entre cationes), porciento de saturación con bases e insaturación. Interpretar cada variable en forma individual, por alguno de los criterios conocidos, establecer según corresponda, potencialidad o limitante que representa.

Propiedades químicas de los horizontes superficiales (zona enraizamiento):
Propiedades a analizar: ***C, N, P, K, Ca, Mg***, desde el punto de vista de la nutrición química, a fin de establecer el nivel de un determinado elemento en el suelo y la necesidad de una fertilización o enmienda, según los siguientes criterios: i-Criterio de Aportación-Extracción; ii-Criterio de Suficiencia; iii- Relación entre Cationes.

Interpretar cada variable en forma individual, por alguno de los criterios conocidos (punto III).

En todos los casos, establecer según corresponda, potencialidad o limitante que representa la variable analizada.

II 3 Propiedades asociadas a las propiedades principales. Posibles degradaciones

En función de las propiedades analizadas en puntos anteriores pueden inferirse las propiedades que se asocian o derivan de aquellas y que no han sido medidas en el suelo en estudio. En su conjunto permiten definir el *movimiento de agua y aire* del perfil. Asimismo, se puede estimar el riesgo de ocurrencia de *degradaciones* basado en todas las características del perfil, paisaje y condiciones climáticas donde se ubica el suelo en estudio.

Propiedades a inferir e interpretar: *densidad aparente, porosidad, estabilidad estructural, retención hídrica, permeabilidad, drenaje y posibles degradaciones,* considerando además de las propiedades intrínsecas del suelo, el clima, relieve, sistemas productivos y manejos frecuentes.

D*egradaciones físicas*: establecer el riesgo que ocurran *encostramientos, compactaciones, y pérdida de estructura.* Entre las ***degradaciones físico-química*** *se consideran salinizaciones, alcalinización, acidificación, degradación de la estructura* y posibles *pérdidas de suelo por erosión hídrica, eólica, desertificación.* Las ***degradaciones químicas*** se asocian a *interacciones iónicas que puedan favorecer deficiencias inducidas y pérdida de materia orgánica.* (Figura 1).

II 4 Funcionamiento del suelo local en lo regional (agua superficial y subterránea)

Este tema ha sido desarrollado en el *Trabajo Práctico sobre suelos Salinos y Sódicos*, dado que uno de los orígenes principales de dichos suelos es la calidad de agua tanto natural (superficial y subterránea) como la proveniente del riego. Allí se analiza el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua y como estos inciden en la evolución del suelo en forma natural y cuando es intervenido por el hombre mediante alguna práctica de manejo. Asimismo se incluye el tema de los flujos de agua como factor formador de suelos en el libro de Cátedra "*Suelo en el Paisaje*' (Alconada et al., 2017).

En esta guía, sólo se presenta una breve síntesis para su aplicación. En la Figura 2 se presenta el esquema general de funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea conforme propone Tóth (2000) donde se reconocen 3 ***tipos de flujos***: local, intermedio y regional (precipitaciones a corta distancia del sitio hasta precipitaciones ocurridas a grandes distancias), cada uno con sus ***zonas*** recarga, tránsito y descarga (flujo descendente, lateral o ascendente). En la Figura 4 se presenta como *evoluciona la calidad de dichos flujos conforme su tipo y zona*, a mayor recorrido mayor salinidad y alcalinidad total aunque varía el tipo de sal que domina (Tóth, 2000) (ver guías Suelos Salinos y Sódico, y Libro de Cátedra Suelo en el Paisaje).

En la Figura 3 se presenta a modo de ejemplo una secuencia posible de suelos en el paisaje general de una región de clima templado húmedo, con precipitaciones de aproximadamente 1000 mm, con material original loess, igual tiempo transcurrido desde su depósito, siendo el relieve y la incidencia de los flujos de agua subterránea lo que define los tipos de suelo y posible manejo. Se destaca en el extremo superior derecho de dicha figura como la observación de un perfil en un sitio dado es conducente a una adecuada interpretación desde el punto de vista del manejo si es que se considera como el suelo se vincula con su entorno. Por ejemplo si es descarga el flujo es ascendente y depende de lo que suceda en la recarga de dicho flujo.

Tres de los suelos de la Figura 3, presentan régimen ácuico(rasgos hidromórficos) con drenaje *imperfecto (Argiacuol*), pobre (*Argialbol) y muy pobremente drenado (Natracualf).* Los dos primeros se vinculan a flujos de agua de relativamente corto recorrido dada la moderada a baja alcalinidad del agua que incide (Figura 2 y 4). Cabe indicar que si no se conoce la calidad del agua freática puede ser inferida a partir de los datos analíticos del perfil, analizando como evoluciona el contenido de sodio y/o sales. Respecto al *Argialbol, la* presencia de un horizonte E revela ser pobremente drenado. Estos últimos son comúnmente conocidos en la región como "bajos dulces" no obstante debe considerarse la proximidad del agua freática y que esta puede

cambiar en altura y calidad conforme se modifica el área de recarga del flujo de agua que allí descarga.

Respecto al suelo *Natracualf* los flujos de agua subterráneos son de largo recorrido muy alcalinos (Figura 2 y 4) y conducen a que dicho suelo evolucione en condiciones de alta alcalinidad y anegamiento, manifestándose en rasgos característicos de ambiente hidrohalomórficos tal como la estructura columnar, vegetación de *Distichlissp* "pelo de chancho", superficie freática con color oscuro por la presencia de materia orgánica dispersa, régimen de humedad ácuico, ambiente muy plano pendiente 0,01 ‰. Son conocidos en la región pampeana como "bajos alcalinos".

En términos muy generales, y considerando sólo hasta nivel de Gran Grupo, el suelo *Argiudol* podría corresponderse como una zona de recarga, el flujo es descendente libre de sales y álcali. Cabe destacar que si se aumenta el nivel de detalle de estudio del suelo, hasta por ejemplo la categoría de Subgrupo e incluso Serie podrían ser que la zona sea transito, por ejemplo Argiudol ácuico. Asimismo, podría darse la situación que en la parte que se describe del suelo (hasta no más de 1,5-2 m de profundidad) presente características de recarga de un flujo local pero mayor profundidad que sea descarga o transito de un flujo intermedio. Tal como se aprecia en las Figuras 2, 3 y 4, a un mismo suelo pueden llegar diferentes flujos.

En *forma sintética* puede indicarse que a mayor profundidad y distancia de recorrido de los flujos es mayor la intemperización (alteración) que se produce en los materiales geológicos por donde transita el agua y esta se carga de sales que van precipitando o solubilizándose conforme sus tipos y concentraciones. Así, en las *zonas de recarga* prevalecen los bicarbonatos y calcio por sobre los otros aniones y cationes, el pH es bajo, alto el contenido de oxígeno y menor es la temperatura, mientras que en las *zonas de descargas* prevalecen los cloruros y sodio, es elevado el pH, aumentan las condiciones anaeróbicas con disminución de oxigeno y mayor es la temperatura debido al mayor calor telúrico por donde el agua transita. En zonas de transito se producen situaciones intermedias.

Por lo expuesto, pueden considerarse a los Flujos de agua subterránea como el ***elemento integrador del paisaje***, que se relaciona con el tipo de suelo, vegetación, posición topográfica, geología, y clima (Tóth, 2000). Asimismo, se aprecia que es posible predecir el tipo de flujo que incide o si más de un tipo de flujo se reconoce en un sitio dado y zonas dentro de estos, en base a la presencia o ausencia de sales (concentración y tipo) y/o rasgos hidromórficos en el perfil edáfico Así, por ejemplo, en épocas de inundaciones generalizadas regionalmente, un flujo más profundo de tipo intermedio y salino puede incidir superficialmente aumentando temporalmente la salinidad de flujos locales (Alconada*et al.,* 2011).

La teoría de sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (2000), ***combina o considera, varios de los ciclos de salinización*** que la bibliografía clásica sobre suelos salinos describe Kovda (1965); Porta *et al.* (1994) (en Guía Suelos Salinos y Sódicos), incorporando otros elementos del paisaje en forma dinámica donde la hidrogeología, clima, vegetación, manejo, explica lo que se observa en el suelo principalmente en su hidrohalomorfismo.

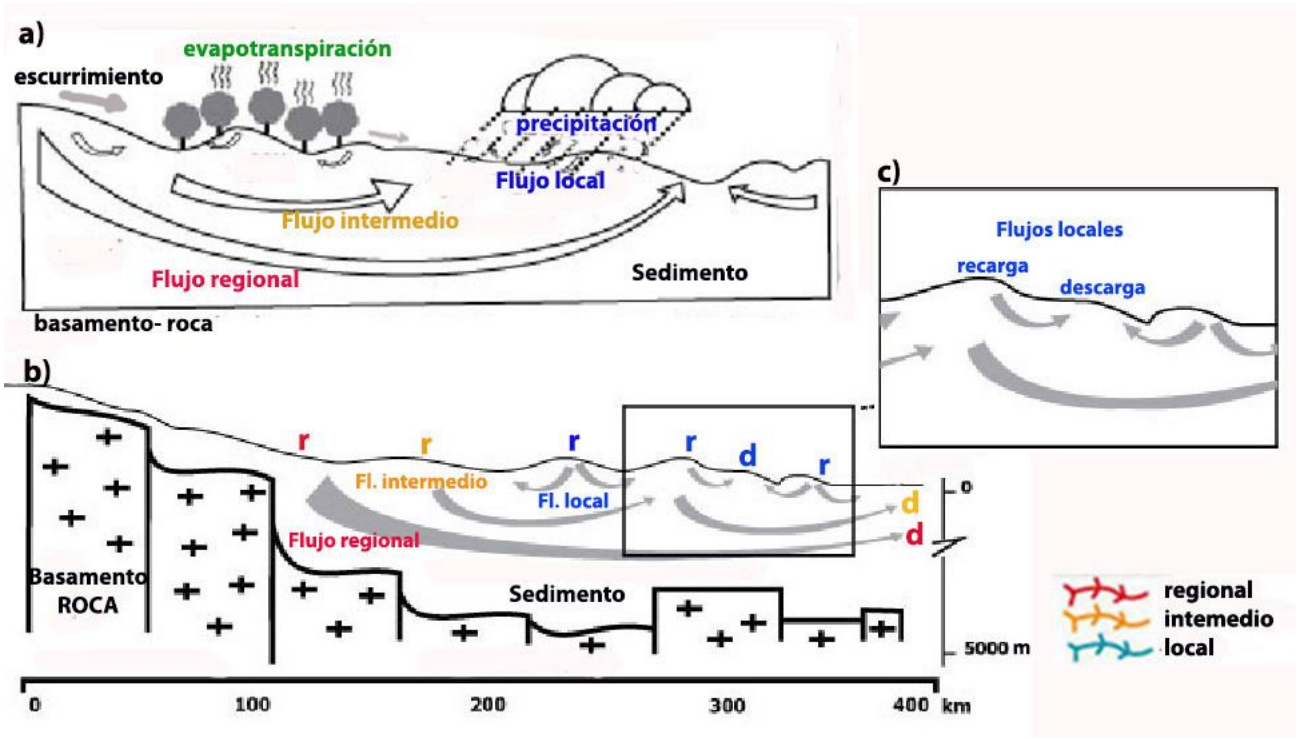
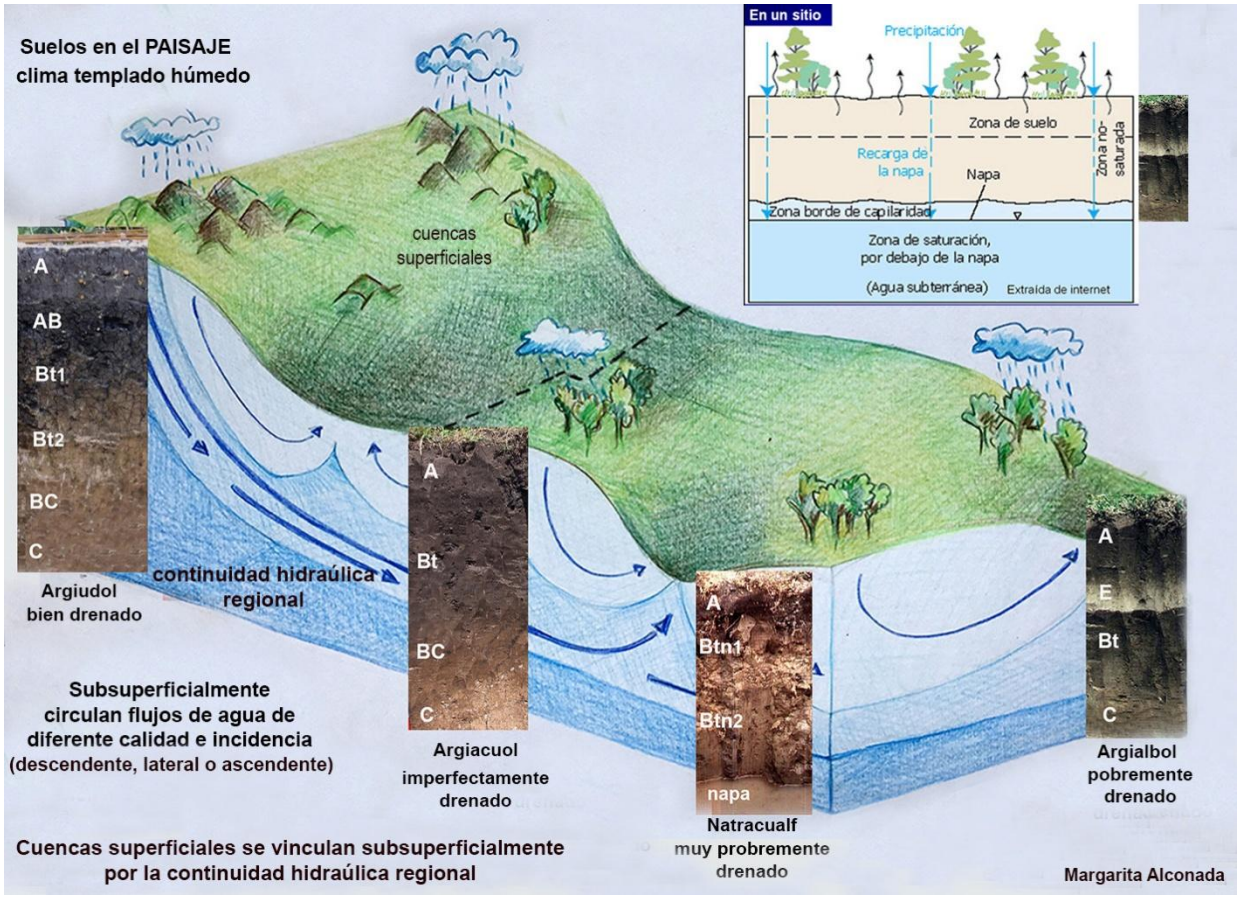


Figura 2 Sistemas de flujo de agua subterránea, tipos y zonas. a) Esquema general de funcionamiento, sistemas de flujo de agua subterránea con otros componentes del ciclo hidrológico. b) Esquema de flujos con sus zonas de recarga y decarga (r, d) en un sedimento sobre un basamento cristalino (bloques de roca). c) Detalle de un sector de b) (Alconaday Damiano, 2017)



-Figura 3 Secuencia de suelos a partir de un material original loess y clima templado húmedo en función del drenaje que varía con la calidad y forma en que inciden los flujos de agua subterránea

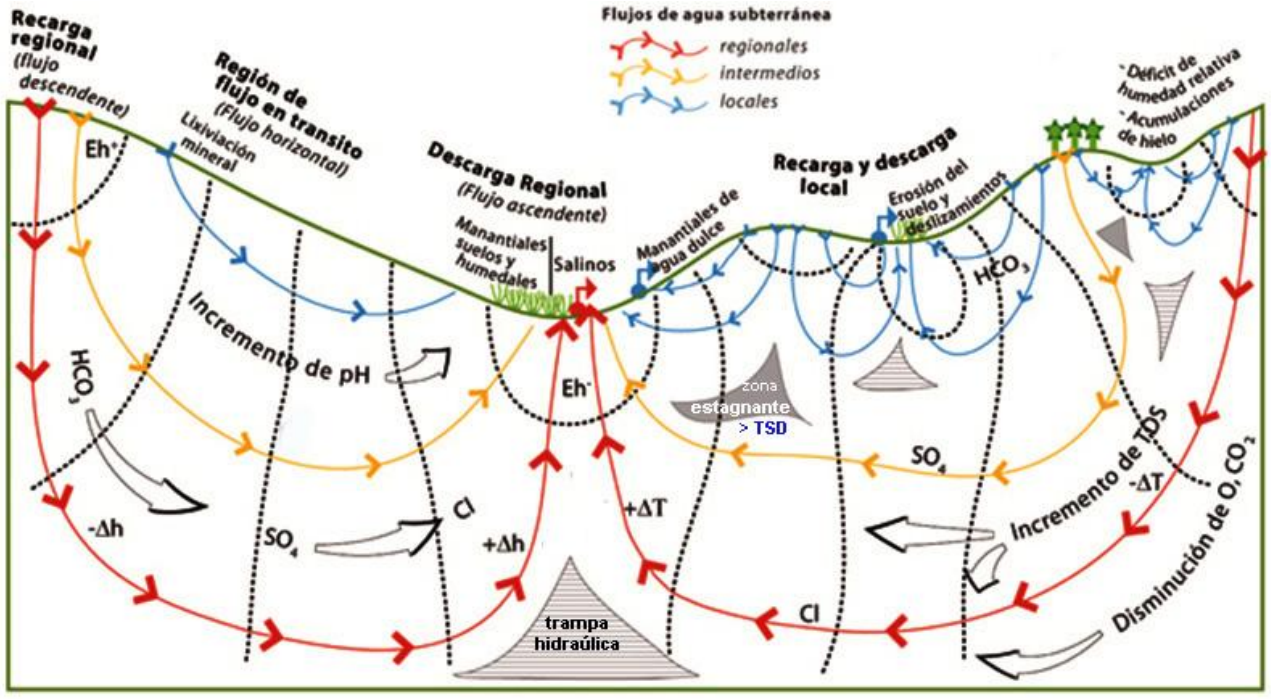


Figura 4 Calidad de agua en función del tipo de flujo y zonas e indicadores ambientales asociados (zona estagnante: disminución de O_2 con incremento de total de sólidos solubles; Trampa hidráulica: convergencia y acumulación de material transportado y calor.
Modificada de Tóth (2000) en Alconada *et a*l. (2017)

III VALORES DE REFERENCIA DE PROPIEDADES EDÁFICAS PRIMARIAS Y ASOCIADAS.

A continuación se presentan algunos criterios de interpretación, muchos de estos fueron también presentados en otras guías de trabajos prácticos. Adicionalmente, se incorporan algunos criterios o procedimientos de interpretación relativos principalmente a las propiedades que derivan de las propiedades primarias. Se destaca que previo a interpretar los resultados analíticos de un análisis de suelo debe considerarse que metodología fue utilizada y si resulta apropiada para las condiciones del medio natural.

Textura_.

Expresa la composición porcentual de *arena, limo y arcilla*, prescindiendo del contenido de grava ya que sólo considera la fracción fina del suelo, *menor a 2mm* (tierra fina). Para clasificar a los constituyentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas que básicamente difieren en los valores límites establecidos para cada fracción. En la Argentina se utilizan las de Atterberg o Internacional (aceptada por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) y la americana del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).

Según los % de cada una de estas tres fracciones principales, arena, limo, arcilla, se agrupan las texturas en ***12 clases texturales*** que se representan en forma gráfica en el "*triangulo textural*" (Figura 5).

Cada ***clase textural*** está integrada por suelos que se considera tienen un comportamiento semejante o comparable frente al laboreo y drenaje. Asimismo, se suelen agrupar las clases texturales en ***tres grupos principales*** a fin de definir en forma rápida y genérica a un suelo por su textura: *finas, medias y gruesos* (Tabla 2).Esto, puede también indicarse así:

Suelos arcillosos *(finas)* son muy activos químicamente, adsorben iones y moléculas que conducen a su floculación o dispersión (dependiendo del catión o molécula), muy ricos en nutrientes, retienen mucha agua, y conducen a la formación de suelos bien estructurados

(favorece la estructura prismática), son de muy baja permeabilidad y tendientes a producir asfixia radicular.

Suelos arenosos (gruesos) son inertes químicamente, carecen de propiedades coloidales y de reservas de nutrientes, y desde el punto de vista físico, dan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua.

Suelos limosos tienen nula estructuración, sin propiedades coloidales, muy baja permeabilidad y mala aireación.

Suelos francos (medios) presentan propiedades óptimas para el desarrollo vegetal.

En la Figura 6, se indica un agrupamiento de las clases texturales por su ***plasticidad***. La plasticidad es la capacidad de moldearse y está dada por la fracción arcilla.

Tal como se aprecia en el triángulo textural, si por ejemplo, un suelo contiene un 25% de arena, 25% de limo y 50% de arcilla, tiene una *clase textural arcillosa*, pero también será arcilloso cualquier suelo que tenga más de 38-40% de arcilla, y llevará en su denominación la palabra arcilloso (por ejemplo *franco arcilloso arcillo*) cuando al menos tenga entre 20% de ***arcilla***. Con la fracción ***limo y arena***, este límites son de aproximadamente 44%, es decir, al menos debe haber 44% de limo para que en el nombre de la clase textural se mencione su presencia, por ejemplo *franco limoso*. Igualmente para arena, por ejemplo *franco arenoso*, tiene más de 45%. Estas diferencias de % se deben a la diferente influencia que poseen estas tres fracciones en el comportamiento global del suelo, así, un 1% de incremento de arcilla tiene mayor influencia en el comportamiento del suelo que si incrementa 1% de arena.

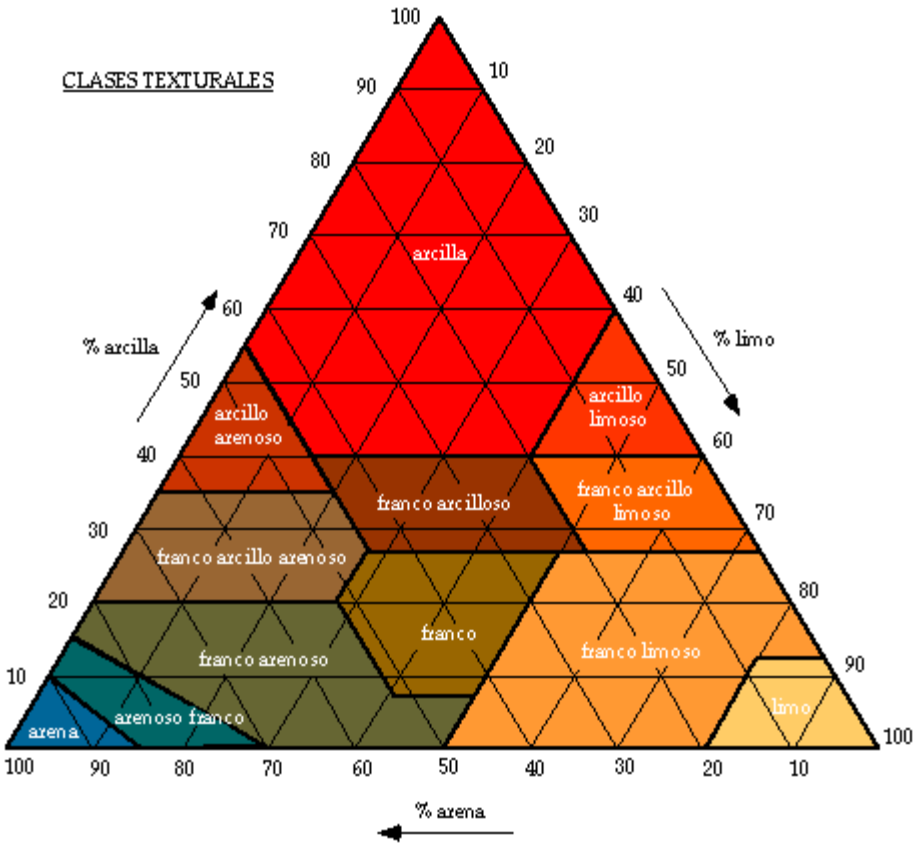


Figura 5 Triángulo de textura 12 *clases texturales* (extraído de Darronsoro, http://edafologia.ugr.es).

TEXTURA	Clase Textural	Efectos
Textura **FINA** **Suelo "pesado"***	Arcillo limosa Arcillosa Franco arcillo limosa Arcillo arenosa	Alta adsorción de nutrientes Alta retención hídrica Baja permeabilidad Fácil encharcamiento Dificultad en el laboreo Pérdidas por evaporación y escorrentía
Textura **MEDIA** **Suelo "franco"***	Franco arcillo arenoso Franca Franca arenosa Franca limosa Limosa	**IDEALES para la agricultura** (excepción: ***limosos***, pueden apelmazarse, poca circulación al agua y aire) Ver ***Índice de encostramiento.***
Textura **GRUESA** **Suelo "ligero"***	Arenosa franca Arenosa	Bajo poder nutritivo Baja retención hídrica Alta permeabilidad Pérdidas por lavado Alta oxidación de la materia orgánica Fácil laboreo

Tabla 2 Grupos de clases texturales por el comportamiento frente al laboreo y drenaje (Conti, 1986) * denominación adaptado en alguna bibliografía de divulgación

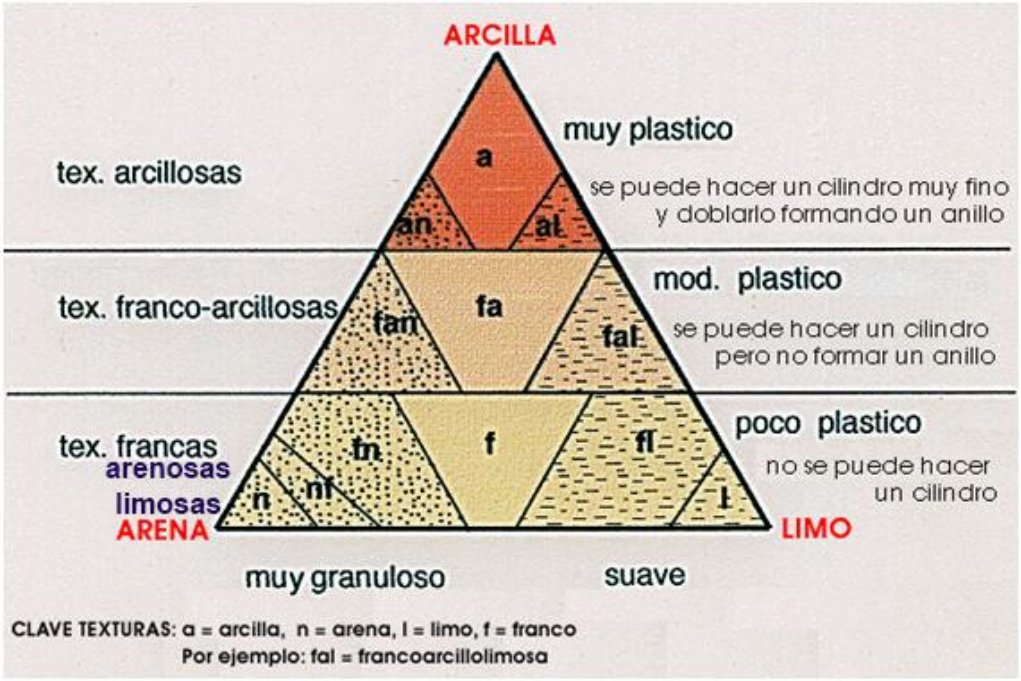


Figura 6Grupos de clases texturales en base a la plasticidad (extraído y modificado de C F Dorronsoro, (http://edafologia.ugr.es)
Nota: Algunas denominaciones no son de uso frecuente en otras fuentes

Capacidad de retención de agua

El análisis textural de cada horizonte, permite inferir cómo se comporta dicho horizonte frente al agua. Esto es debido a que a cada textura puede asociarse a una *porosidad y capacidad de retención de agua*.

En base a la textura, se indican en forma muy general, cual podría ser la c*apacidad de almacenar agua aprovechable* para las plantas, ***agua útil*** (poros comprendidos entre 2 y 50μ).

El *agua útil del perfil edáfico,* también indicada como ***Capacidad de Retención de Agua Disponible* (CRAD),** es la diferencia entre el agua retenida a ***capacidad de campo (CC) y en el punto de marchitez permanente (PMP)*** (medido en placas de succión, membrana de Richard, 1947).

La **CRAD** es una medida de gran utilidad a fin de ***manejar correctamente el riego***, ya que permite establecer, la cantidad de agua a agregar y el tiempo de cada riego en función del suelo y las necesidades de agua del cultivo. Sin embargo, a medida que disminuye el contenido de agua desde la CC hacia el PMP, se incrementa la dificultad para extraer agua, por lo que se recomienda tomar como reserva de agua utilizable sólo una parte de dicha CRAD que se denomina ***Reserva Fácilmente Utilizable (RFU***) que es aproximadamente el **50-60%** de la **CRAD(1/2 a 2/3)** o dicho de otra manera **25-30%** de la **humedad equivalente, HE (1/2 a 2/3).** Es de destacar que si bien el PMP puede variar con el cultivo y las condiciones del medio (viento, evaporación, etc), en términos prácticos, esta medida es considerada aceptable.

A continuación se definen y se dan criterios de interpretación de los parámetros mencionados, CC, PMP, HE, CRAD.

Capacidad de campo_. Es el máximo contenido de agua que puede retener el suelo en los capilares cuando el agua gravitacional ha drenado (poros > 50μ).

También puede definirse como el límite máximo de agua presente en un suelo luego de drenar libremente durante los 2 o 3 días posteriores a una lluvia o riego intenso. En esta condición, la mayoría de la macroporosidad está ocupada por aire (poros > 50μ).

La estimación de la CC en *condiciones naturales* puede lograrse provocando la saturación del suelo, cubriéndolo con plástico para evitar la evaporación, y luego de 24 a 72 horas (> en suelos arcillosos) se mide el contenido de humedad. Así, al humedecer el suelo por encima de la capacidad de retención (CC) el agua es sometida a las fuerzas de la gravedad y de la presión hidrostática, siendo esta agua libre y se filtra si el suelo está bien drenado. En CC la cantidad de agua libre es nula, y máxima en el punto de saturación.

En *laboratorio,* se estima a partir del contenido de agua que retiene el suelo en equilibrio con una presión de 33 KPa (0.33 atm = 2,7 pF).

1 atm = 1.033 cm de columna de agua; y **pF** = logaritmo de la columna de agua expresada en cm, tensión de humedad (se mide con tensiómetros o centrífuga, surge a partir del *potencial capilar*, diferencia de energía entre 1g de agua en estados libre y 1g de agua retenido en el suelo; y de la *tensión de humedad*, fuerza necesaria en cm para extraer 1g de agua del suelo).

En la Tabla 3, se presentan valores de referencia sobre contenido de humedad retenida a CC en función de la textura (De Boodt y Leenheer, 1954).

Tipo de suelo	Contenido de Arcilla	% H_2O
Arcilloso pesado	Mayor de 35%	36
Arcilloso y arcilloso ligero	Mayor de 25% y menor de 35%	28
Franco pesado y Franco	Mayor de 20% y menor de 25%	26
Franco liviano	Mayor de 8% y menor de 20%	20
Arenoso	Menor de 8%	15

Tabla 3 Contenido de humedad a CC según textura (De Boodt y Leenheer, 1954).

Humedad equivalente_**.** Esta representa el contenido de agua en el suelo cuando se aplica una presión de aproximadamente 0,5 atmósfera (medida con centrífuga, fuerza centrífuga 1000 veces superior a la gravedad durante 40 minutos) y pF de 3. Consecuentemente, si bien no es exactamente la CC puede servir de referencia y suele utilizarse como equivalente. Aproximadamente puede considerarse que en CC habrá un 10% más de agua que en HE. Se indica en Tabla 4, valores de referencia de HE.

% agua en HE	Interpretación
< 8	muy baja
8 – 16	Baja
16 – 26	Moderada
26 – 34	Alta
> 34	excesiva: (aireación deficiente)

Tabla 4 Humedad equivalente, % agua e interpretación

Punto de marchitez permanente_. Es el contenido de agua por debajo del cual las plantas no son capaces de extraer agua del suelo (poros menores a 2μ). El agua es consumida por las plantas y evaporada hasta el momento en el cual las fuerzas de succión de la planta son iguales a la fuerza de retención capilar de las partículas, no hay entonces agua disponible para las plantas.

Se estima por el contenido de agua que retiene el suelo en equilibrio con una presión de 1500 KPa (15 atm = 4,2 pF =15.484,84 cm de columna de agua).

En forma muy aproximada se puede considerar el contenido de humedad en PMP como el 50-55% de la CC. Asimismo, a partir del valor de humedad en HE la bibliografía señala la siguiente relación: HE = 1.,84 por PMP; y PMP= coeficiente higroscópico por 1.47 (Castañon Lion, 1991). Cabe destacar que el coeficiente higroscópico es el contenido de agua remante en suelo seco al aire, en equilibrio con la humedad atmosférica.

Valores generales en la bibliografía: **PMP** en la arcilla 18%, limo 9%, limo arenoso 6%, y arena 2%, y para iguales fracciones el punto de saturación podría indicarse de 35, 18, 13, y 6% respectivamente (Castañon Lion, 1991). Luego del PMP, el agua sigue evaporándose hasta el límite en que las fuerzas que retienen el agua alrededor de las partículas llegan a ser muy importantes, y se genera un cierto equilibrio que se denomina ***punto de higroscopicidad****,* el pf es de 6,5. Para un *limo arenoso,* se indica un valor de 2-5% (Castañon Lion, 1991).

Ejemplo de estimación de CC y PMP a partir de la HE: el dato de HE es el que se consigna en los perfiles descriptos en cartas de suelo INTA. Es posible estimar en forma muy general la cantidad de agua retenida en CC o PMP según la textura y adicionalmente a partir del valor de HE. Así **CC= HE*1,1;** y **PMP= HE/1,84**. Por ejemplo en un horizonte A con textura franco arcillosa la humedad retenida a HE es de 29,1 % y en CC 29,1 por 1,1= 32,01%, y en PMP 29,1/1,84= 15,8%. Si se estimase por texturas, por ejemplo en CC podría indicarse que habría retenido un 33% de agua y en PMP 20% (Tabla 3), siendo el agua útil de este horizonte 13%. En punto siguiente se analiza con más detalle como estimar estas constantes hídricas por los procedimientos comentados y a partir de otros criterios de la bibliografía que en general conducen a valores semejantes por horizonte y para todo el perfil (CRAD).

CRAD- Capacidad de almacenaje de agua útil_.
CRAD estimado por textura: A modo de referencia en la Tabla 5 se presenta la capacidad de almacenaje de agua útil, expresada en cm/m, cm de agua que puede retener el suelo hasta un metro de profundidad si la textura fuera homogénea, y solo se considera la textura. Igualmente, en la Figura 7 y Figura 8, se presenta una representación de las curvas a CC, PMP, y agua útil, para diferentes clases texturales.

En la Figura 7 el eje de la izquierda representa el % de agua contenido en suelo secoy el eje derecho los cm de agua por metro de suelo. Se aprecia que el ***mayor contenido de agua disponible*** se presenta en suelos de textura *Franca, Franca limosa, y Franca arcillosa*. Por el contrario, en las *texturas con más arcilla* es necesario agregar mayor cantidad de agua para que la misma esté disponible para las plantas. Así, la curva del PMP se eleva a medida que aumenta el contenido de arcilla, y disminuye con mayor contenido de materia orgánica. La materia orgánica aumenta la capacidad de adsorción de agua y la facilidad con que la misma es suministrada a las plantas (disminuye el PMP).

Textura	cm/m
Arenas gruesas	4.2
Arenas finas	6.2
Franco arenoso	8.3
Franco arenoso fino	10,4 - 12,5
Franco limoso	14,4 - 16,6
Franco arcillo limoso	16.6
Franco arcilloso	16,6 - 18,7
Arcillas pesadas	14.5

Tabla 5 Capacidad aproximada de almacenamiento de agua aprovechable (cm de agua /m de suelo) extraída de Velasco Molina (1983)

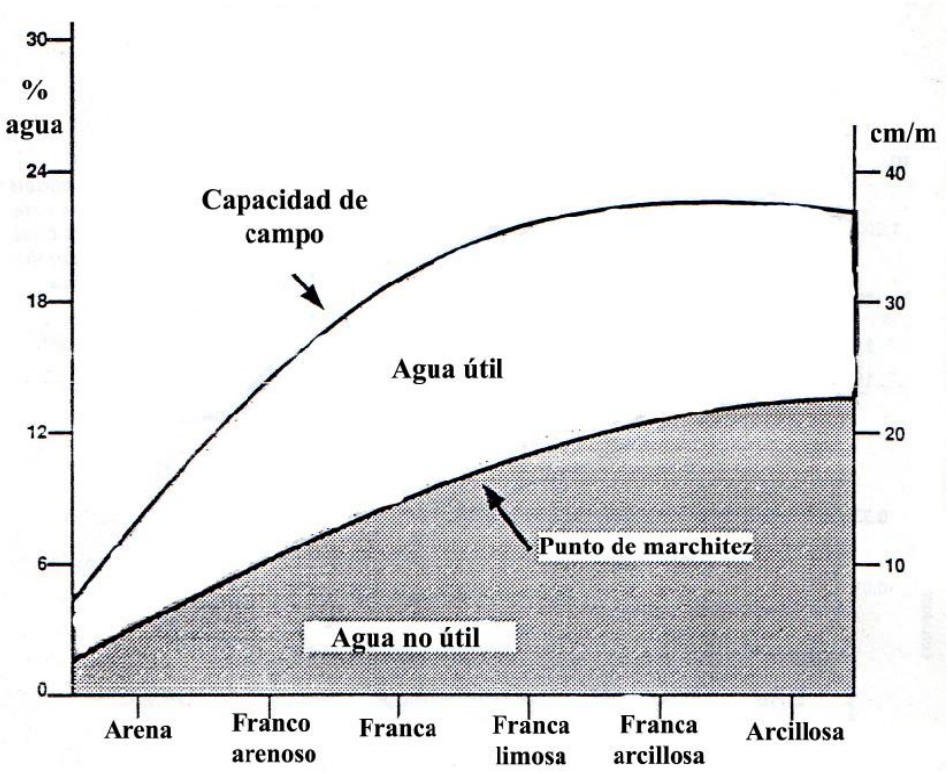


Figura 7 Agua útil en diferentes clases texturales (extraída de Darwich, 2006)

En la Figura 8 se indica el contenido de agua útil expresado en mm a diferentes profundidades. Se destaca que las Figuras 7 y 8 son en general coincidentes, expresan iguales relaciones con ligeras diferencias (Darwich, 2006).

Se recuerda la siguiente equivalencia **1 mm de lámina de agua = 1 l/m^2 = 10 m^3/ha.**

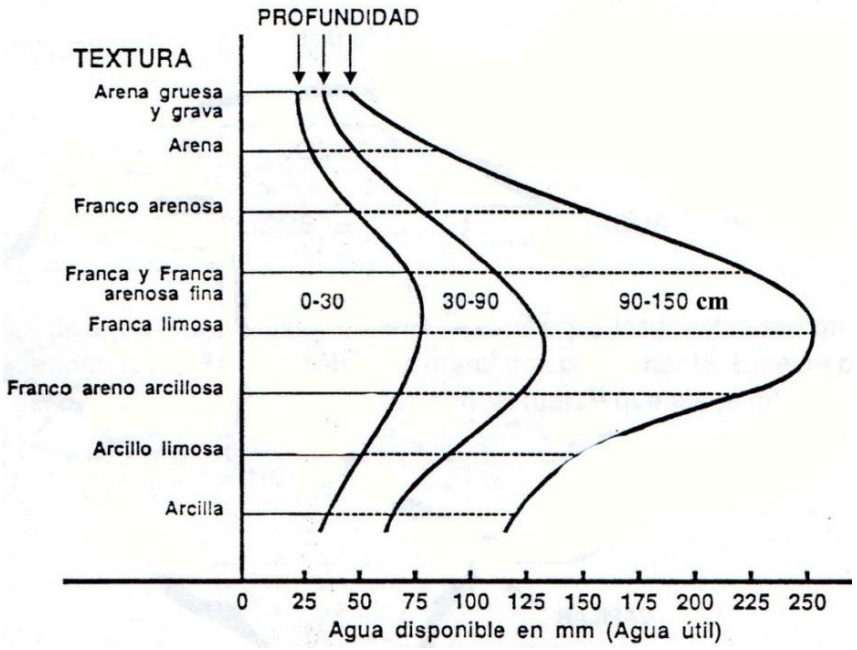


Figura 8 Agua útil (mm) según textura y diferentes profundidad

CRAD medido*:** Hasta aquí se ha mencionado la capacidad de almacenaje del suelo, considerando que tiene igual textura en un metro de profundidad. Sin embargo, ***la textura del suelo varía en cada horizonte, y además, varía la profundidad hasta la cual no existen impedimentos para el desarrollo radicular (tosca, Bt muy arcilloso o sódico, etc). Por ejemplo, en un *suelo profundo y bien drenado*, la CRAD quedará definida por un espesor mayor a un metro, mientras que en un *suelo somero* será menor.

La diferencia ***entre CC y PMP, para cada horizonte hasta la profundidad*** efectiva permite establecer la ***CRAD real*** del suelo.

A continuación en Tabla 6, se indica un ejemplo de cálculo de CRAD para el perfil edáfico de un suelo Argiudol típico, ubicado en el norte de la provincia de Buenos Aires (Detalle presentado en Guía, sobre ejemplo de estudio del suelo con fines de riego, aula Virtual).

HORIZONTE	% CC	% PMP
Ap	35.55	11.74
A	37.63	12.85
Bt_1	47.94	24.76
Bt_2	49.75	24.19
Bt_3	46.52	22.59
BC	45.79	22.29

Tabla 6 Humedad a CC y PMP en suelo *Argiudol típico*

La CRAD hasta 1 metro de profundidad es de 241,4 mm; y hasta 1,20 m (incluye el horizonte BC) es de 288,4 mm. Este valor se obtuvo a partir de la suma de las diferencias entre %CC y PMP de cada horizonte (Tabla 6) considerando su profundidad (Figura 9).

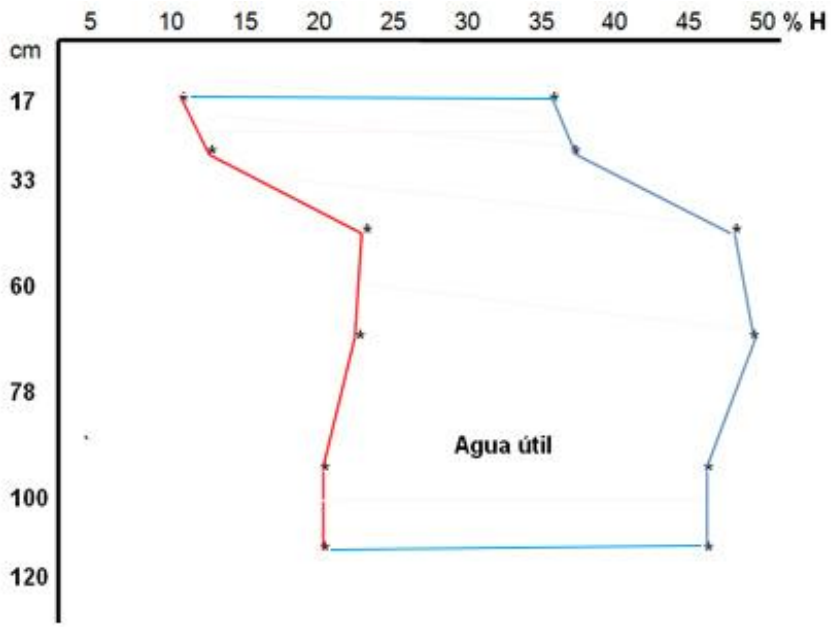


Figura 9 CRAD del suelo *Argiudol típico* hasta 1,20 m

Resulta más correcto definir la CRAD del suelo considerando además, la *densidad aparente* (humedad volumétrica) en cuyo caso, la CRAD hasta 1m es de 320.48mm (3204,8 m^3/ha) y hasta 1,20 m de 381,58 mm (3815,8 m^3/ha).

Sin embargo, el suelo analizado presenta capas con baja permeabilidad, el horizonte A se encuentra compactado en grado variable y el horizonte Bt arcilloso tiene muy baja permeabilidad, por lo que podría dificultarse la disponibilidad de agua para los cultivos y consecuentemente ser menor la CRAD real que la aquí establecida. Se indica además, que los cultivos con riego, padecen en general la sequía más que los cultivos no regados, esto se debe a que las raíces tienden a desarrollarse en superficie con riego y el espesor de suelo utilizado es pequeño. Por el contrario, los cultivos de secano, tienden a desarrollar raíces más profundas y extraer agua de mayor profundidad. Consecuentemente, son valores que sirven de referencia pero deben considerarse el resto de características del suelo, cultivo, clima y manejo.

Índice de encostramiento_. Propuesto por FAO en Bienes *et al*. (1995). Resulta útil para definir la formación de costras superficiales debido a la obturación de poros por el limo (tamaños equivalentes). Al perder estructura el horizonte superficial por disminución de materia orgánica, acción del laboreo y/o de algún agente externo (agua y viento) aumenta el riesgo al encostramiento tanto más cuando mayor es el contenido de limo, tal como se aprecia en la siguiente ecuación.

$$\mathbf{I = (1{,}5.Zf + 0{,}75.\ Zc\ ) / Ac + 10\ .\ MO}$$

Zf: % limo fino 2-20μ
MO: % materia orgánica
Zc: % limo grueso 20-50μ
Ac: % arcilla <2μ

En la Tabla 7 se indican valores de referencia considerándose tres clases.

clase	valor índice I
1	< 1,25
2	1,16 - 1,25
3	>1,61

Tabla 7 Índice de encostramiento I

Un valor del índice I de 0,2 es característico de suelos que no forman costras, siendo hasta 2, en aquellos suelos con máxima tendencia a formación de costra.

Permeabilidad e infiltración

(Velocidad de infiltración de agua, lámina total infiltrada e Infiltración básica)

La *permeabilidad* de un suelo es la cualidad que le permite transmitir agua o aire a través de sus capas u horizontes, desde la superficie del suelo hacia abajo. Esto depende del número de poros, tamaño y continuidad de dichos poros.

La permeabilidad se cuantifica midiendo la ***Infiltración básica*** (IB)(cm/h) que se define como "*la velocidad de entrada de agua al suelo luego de un período de tiempo tal que los cambios de velocidad son muy lentos"*. Es entonces, el movimiento del agua en el perfil del suelo cuando este llega a su saturación y queda definida por el horizonte o capa más impermeable que condiciona el movimiento de agua vertical'. Antes de llegar a la condición donde el agua circula debida a su permeabilidad (infiltración básica), cuando el suelo no está saturado, la infiltración del agua de lluvia o de riego depende de la ***Velocidad de Infiltración*** (VI) de dicho suelo.

La IB es una propiedad intrínseca del suelo (permeabilidad) mientras que la VI puede ser modificada por prácticas de manejo, tipo de cultivo, cobertura vegetal, estructura etc.

*Doble anillo***:** Se suele medir cuantitativamente la permeabilidad del suelo o infiltración básica según la cantidad de agua que pasa a través de una sección de suelo saturado en la unidad de tiempo mediante diferentes permeámetros. Uno de los métodos más utilizado es el de doble anillo, ajustados según ecuación de Kostiakov, utilizado para evaluar la permeabilidad de suelos a regar (Fernández et al., 1971) .

En la Figura 10 se presentan los dobles anillos, medición a campo y esquema general de funcionamiento (modificado de publicación en internet). Anillo externo actúa de buffer se mantiene con agua al límite superior, y en el anillo interno es donde se efectúa la medición de infiltración (cada 5 minutos se mide el volumen que infiltró volviendo a llenar dicho cilindro hasta el límite superior de referencia). Al inicio del ensayo se mide la ***velocidad de infiltración*** que es como el agua ingresa al suelo durante una lluvia o riego cuando dicho suelo no está saturado y consecuentemente penetra con rapidez Continuando el ensayo, se agregan volúmenes de agua en tiempos fijos yla permeabilidad disminuye progresivamente a medida que el suelo se humedece, la arcilla se expande y tapona parcialmente los poros, hasta que llega un momento en que se estabiliza debido a que el suelo se ha saturado y el movimiento que aun tiene el agua es el que resulta de su ***infiltración básica (IB)***. Así, la curva que representa la permeabilidad en función del tiempo desciende bruscamente hasta que se hace sensiblemente horizontal, y se alcanza la permeabilidad estabilizada denominada IB. Técnica puede consultarse en https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7840/AD%20Infiltrometro.pdf

El encharcamiento y escorrentía se produce y/o favorece cuando la cantidad de agua y velocidad de aporte que llega al suelo es superior a su ***velocidad de infiltración, permeabilidad y retención de agua***. Esto puede estar influenciado por la presencia de costras superficiales (índice de encostramiento) que impide el ingreso del agua; pendiente (Tabla 10) o por salinización-alcalinización debida al riego o aguas freáticas que dispersa el suelo y disminuye su permeabildad, entre otras causas naturales o antrópicas.

Se registran entonces, *tres tipos de mediciones:* ***velocidad de infiltración de agua y lámina total infiltrada***, que permiten conocer el comportamiento del agua de riego en el suelo, y así establecer el tiempo en que una determinada lámina de riego se infiltrará en el suelo; y a partir de estos, se calcula la ***Infiltración básica***, que es el drenaje interno de un suelo.

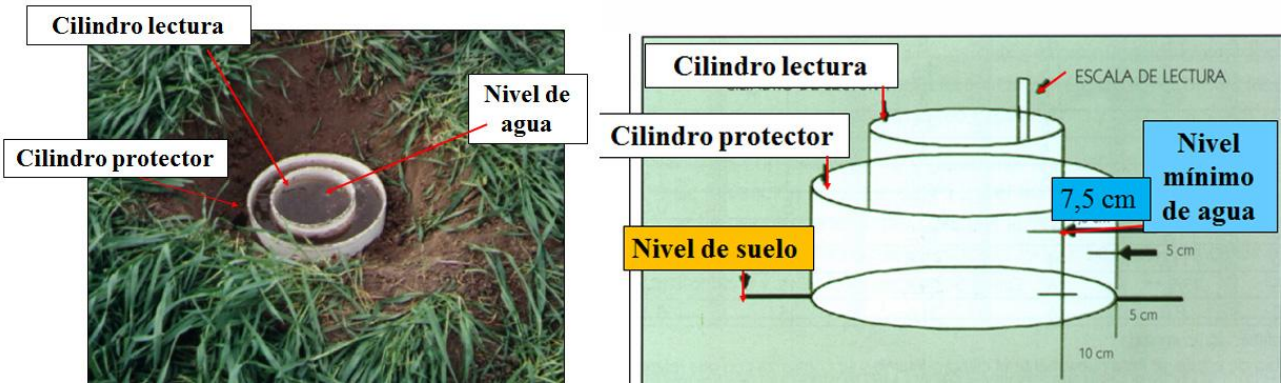


Figura 10 Infiltración con doble anillo: medición a campo (izquierda) y esquema (derecha, modificado de publicación en internet)

En la Tabla 8, se presenta la interpretación del valor de permeabilidad medido por permeámetros de tipo cilindro (doble anillo) según se indica en las Normas de Reconocimiento de suelos, Etchevehere (1976). En la Tabla 9 se presentan valores estimados de permeabilidad según su textura y en Tabla 10 los % en que la velocidad de infiltración queda reducida con respecto a la permeabilidad en función de la pendiente (http://www.inea.uva.es/web).

Grado 1	permeabilidad muy lenta a nula
	velocidad de percolación menor de 0,125 cm/h
Grado 2	permeabilidad lenta
	velocidad de percolación entre 0,125 y 0,5 cm/h
Grado 3	permeabilidad moderadamente lenta
	velocidad de percolación entre 0,5 y 2 cm/h
Grado 4	permeabilidad moderada
	velocidad de percolación entre 2 y 6,25 cm/h
Grado 5	permeabilidad moderadamente rápida
	velocidad de percolación entre 6,25 y 12,5 cm/h
Grado 6	permeabilidad rápida
	velocidad de percolación entre 12,5 y 25 cm/h
Grado 7	permeabilidad muy rápida
	velocidad de percolación mayor de 25 cm/h

Tabla 8 Grados de permeabilidad según doble anillo (Etchevehere, 1976)

Textura	Permeabilidad mm/h
Arcilloso	3,8
Arcilloso-limoso	5
Franco-arcilloso	6,4
Franco-limoso	7,6
Limoso	8,0
Franco	8,9
Limo-arenoso	10
Arenoso-limoso	15
Franco-arenoso	16
Arenoso-franco	17
Arenoso	19
Arenoso-grueso	50

Tabla 9 Permeabilidad de los suelos según su textura

Pendiente %	Disminución de la infiltración %
<5	0
5-8	20
9-12	40
13-20	60
>20	75

Tabla 10 Relación de la velocidad de infiltración en terrenos con pendiente

Densidad aparente, Densidad real y Porosidad

La ***densidad aparente*** (DA) es la razón de la masa del suelo y volumen de suelo (g/cm^3 o tn/m^3).El método más utilizado es el método del cilindro. Los valores que se dan en Tabla 11 son citados en diferentes publicaciones como densidades frecuentes según textura (método del cilindro)(Porta *et al.,* 1994).Deben tomarse sólo como una referencia, ya que se modifican por contenido de materia orgánica, tipo de arcilla, cantidad de barnices, composición catiónica, etc.

Suelo, condición o textura	**DA** g/cm^3
Arenoso	1,45-1,6
Valor crítico en arenoso, compactado	1,8
Arcillosos con estructura	1,05 - 1,2
Valor crítico en arcilloso, compactado	1,4
Muy compactados dependiendo textura	> 1,45 -1,9
Suelos muy flojos	1
Suelos turbosos	0,9
Turba	0,25-0,3
Suelos volcánicos	0,85
Franco limosos	1,25 - 1,35

Tabla 11 Valores de referencia de densidad aparente

Si se usara para medir la densidad aparente, el *método de la parafina*, los valores de referencia son mayores a los indicados por el método del cilindro.

Densidad real (DR) es la razón de la masa de suelo y el volumen de sólido (medido con picnómetro)(gr/cm3 o tn/m^3). Método más utilizado por picnómetro; En la Tabla 12se dan valores dados por Porta *et al.* (1994).

Composición que prevalece	**DR** g/cm^3
Minerales de arcilla	2,0-2,65
Cuarzo, feldespato	2,5-2,6
Minerales con elementos metálicos	4,9-5,3
Horizontes minerales	2,6-2,75
Horizontes orgánicos	1,1-1,4
Horizontes ricos en minerales pesados	2,75
Valor medio para suelos minerales	2,65

Tabla 12 Valores de referencia de densidad real

Porosidad total (PT),calculada a partir de la densidad aparente y densidad real.
Pt = (1-(Da/Dr) x100); En Tabla 13, se presenta un ejemplo del suelo *Argiudol típico* (Guia en Aula Virtual), con diferentes manejos. La densidad real que se consideró fue de 2,50 g/cm^3 y subsuperficialmente, 2,60 g/cm^3.

Asimismo, se presenta el ***espacio aéreo (EA) o porosidad de aireación (PA)***.Este último, se obtiene a partir del valor de porosidad total (%) y la humedad presente (HA) en el momento de la extracción de la muestra, siendo indicador de la posibilidad de difusión del aire en el suelo.
EA= PT – (DA*HA). Ejemplo EA= 58 – (1,05*32,27)= 24,12% (Tabla 13).

Asimismo puede calcularse la *porosidad aireación* (PA) como la aireación de dicho suelo en capacidad de campo. PA = PT – humedad a CC (Page et al., 1982). Pudiendo también incorporarse para su cálculo la densidad aparente tal como se indicó en el calculo de Tabla 13.

Lote	Horizonte	DA (g/cc)	**HA %**	**PT %**	**EA %**
lote 5	Sup	1.05	32.27	58.00	24.12
	Subsup	**1.21**	28.18	53.46	19.36
lote 6	Sup	1.25	18.03	50.00	27.46
	Subsup	**1.23**	15.97	52.69	33.05
lote 7	Sup	1.09	24.73	56.40	29.44
	Subsup	**1.41**	15.32	**45.77**	24.17
lote 18	Sup	1.02	20.73	59.20	38.06
	Subsup	**1.22**	16.71	53.07	32.63
lote 19	Sup	0.98	23.94	60.80	37.34
	Subsup	**1.26**	14.38	51.54	33.42
	Subsup				

Tabla 13 Valores de densidad aparente (DA), humedad actual (HA), porosidad total (PT), y espacio aéreo (EA) en lotes del suelo Argiudol típico con diferente manejo y posición

Ejemplos, valores obtenidos en otras zonas del país de densidad aparente, y contenido de agua en capacidad de campo_. Se indica a continuación a modo de referencia, otros ejemplos de valores medidos en suelos argentinos (Informes INTA). En la Tabla 14, se presentan valores deDA, CC por horizontes y acumulado de Chubut, en la Tabla 15 de Catamarca, en un médano sin consolidar y consolidado, y en la Tabla 16 de Mendoza y San Juan, con texturas arenosas medias en algarrobales, y textura fina en peladal. Se destacan los altos valores de DA de los materiales arenosos, y la baja CC; y como disminuye la DA con texturas más finas y aumenta la CC (Tablas elaboradas A Frias).

Trelew, Chubut, meseta intermedia, arenoso				**Trelew, Chubut,** meseta intermedia, arcilloso-gravoso			
prof	**DA**	**CC**		**Prof**	**DA**	**CC**	
cm	g/cm3	mm c/ 10 cm	acum. Mm	Cm	g/cm3	mm c/ 10 cm	acum. mm
0-10	1.46	25	25	0-10	1.24	25	25
10-20	1.41	26	51	10-20	1.21	43	68
20-30	1.28	32	83	20-30	1.32	38	106
30-40	1.28	36	119	30-40	1.39	37	143
40-50	1.39	24	143	40-50	1.46	24	167
Puerto Madryn, Chubut (Bajo del Gualicho, bajo)				**Puerto Madryn, Chubut** (Bajo del Gualicho, media loma)			
0-10	1.45	15	15	0-10	1.38	13	13
10-20	1.37	23	38	10-20	1.33	16	29
20-30	1.43	29	67	20-30	1.39	16	45
30-40	1.38	26	93	30-40	1.46	14	59
40-50	1.54	31	124	40-50	1.64	14	73
50-60	1.57	26	150	50-60	1.59	17	90
60-70	1.39	19	169	60-70	1.51	14	104
70-80	1.52	19	188				

Tabla 14 Ejemplos de DA, CC, y HA, en diferentes ambientes de Chubut

Fiambala, Catamarca, médano				Fiambala, Catamarca, consolidado			
Prof	**DA**	**CC**		**prof**	**DA**	**CC**	
Cm	g/cm3	mm c/ 10 cm	acum. mm	cm	g/cm3	mm c/ 10 cm	acum. mm
0-10	1.3	9	9	0-10	1.16	18	18
10-20	1.27	8	17	10-20	1.21	25	43
20-30	1.24	12	29	20-30	1.33	23	66
30-40	1.35	12	41	30-40	1.44	27	93
40-50	1.53	10	51	40-50	1.41	22	115
50-60	1.65	7	58	50-60	1.39	24	139
60-70	1.68	9	67	60-70	1.43	24	163
70-80	1.63	9	76	70-80	1.35	23	186
80-90	1.71	11	87	80-90	1.32	23	209
90-100	1.67	8	95	90-100	1.39	24	233
Tinogasta, Catamarca				**Sumalao, Catamarca**			
0-10	1.48	16	16	0-10	1.29	26	26
10-20	1.35	16	32	10-20	1.26	27	53
20-30	1.16	25	57	20-30	1.32	33	86
30-40	1.16	25	82	30-40	1.26	32	118
40-50	1.18	33	115	40-50	1.12	15	133
50-60	1.24	34	149	50-60	1.18	13	146
60-70	1.26	32	181	60-70	1.16	14	160
70-80	1.24	28	209	70-80	0.97	12	172
80-90	1.25	23	232	80-90	1.09	13	185
90-100	1.24	25	257	90-100	1.05	13	198

Tabla 15 Ejemplos de DA, CC, en diferentes ambientes de Catamarca

Ñacuñan, Mendoza, algarrobal				Mendoza, reserva algarrobal			
prof	**DA**	**CC**		**prof**	**DA**	**CC**	
Cm	g/cm3	mm c/ 10 cm	acum. Mm	cm	g/cm3	mm c/ 10cm	acum. Mm
0-10	1.3	23	23	0-10	1.2	20	20
10-20	1.3	22	45	10-20	1.2	20	40
20-30	1.24	20	65	20-30	1.19	21	61
30-40	1.26	22	87	30-40	1.2	22	83
40-50	1.24	25	112	40-50	1.24	20	103
50-60	1.27	27	139	50-60	1.29	20	123
60-70	1.3	37	176	60-70	1.27	22	145
70-80	1.34	37	213	70-80	1.17	16	161
80-90	1.31	37	250	80-90	1.23	19	180
90-100	1.34	38	288	90-100	1.4	22	202
Ñancuñan Mendoza, peladal				**San Juan, Valle**			
0-10	1.01	34	34	0-10	1.5	25	25
10-20	0.96	34	68	10-20	1.45	21	46
20-30	0.97	36	104	20-30	1.4	19	65
30-40	1.13	37	141	30-40	1.42	18	83
40-50	1.16	30	171	40-50	1.46	19	102
50-60	1.17	26	197	50-60	1.44	22	124
60-70	1.07	26	223	60-70	1.45	21	145
70-80	1.14	27	250	70-80	1.47	19	164
80-90	1.14	28	278	80-90	1.48	20	184
90-100	1.03	25	303	90-100	1.53	21	205

Tabla 16 Ejemplos de DA, CC, en diferentes ambientes de Mendoza y San Juan

Propiedades físico-químicas

pH, reacción del suelo

En la Tabla17se presenta la clasificación del pH en agua relación 1:1; en la Tabla 18 la interpretación a dichos valores de pH, y en la Tabla 19, la calificación del pH potencial en KCl. Se destaca que el método estandarizado en la Argentina es el método de la relación suelo-agua 1:2,5 (SAMLA). Sin embargo, en la bibliografía internacional se recomienda en suelos con posibles condiciones de salinidad y/o alcalinidad medir el pH en relación suelo-agua 1:1 (en pasta). Este

procedimiento es válido para cualquier condición. Se reitera la importancia de conocer el procedimiento de análisis para su interpretación. En guía de Trabajo Práctico *Acidez del suelo* disponible en aula virtual se analiza el tema en detalle. En esta ultima ver lo relativo al pH hidrolítico el cual es en promedio entre 1 y 1,5 unidades mayor que el pH en pasta o agua, dependiendo si prevalece el catión Ca^{+2} o Na^{+}.

pH (suelo/agua : 1/1)	
< 4,5	extremadamente ácido
4,5 – 5	muy fuertemente ácido (encalar)
5,1 – 5,5	fuertemente ácido
5,6 – 6,0	medianamente ácido
6,1 – 6,5	débilmente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	moderadamente alcalino
8,5 – 9,0	fuertemente alcalino (cultivos adaptados)
> 9,1	extremadamente alcalino

Tabla 17 pH en agua relación 1:1 (Etchevehere, 1976)

Porta *et al.* (1994) citando a USDA (1971), interpretan los valores indicados precedentemente como a continuación se indica:

5,1-5,5	• Exceso de Co, Cu, Fe, Mn, Zn • Deficiencia de Ca, K, N, Mg, M, P, S • Escasa actividad microbiana • Suelos sin carbonato de calcio
5,6-6,0	• Intervalo adecuado para la mayoria de los cultivos
6,0-6,5	• Máxima disponibilidad de nutrientes
6,6-7,3	• Mínimos efectos tóxicos
7,7-7,8	• suelos generalmente con carbonato de calcio
7,9-8,4	• disminuye la disponibilidad de P y B • deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn, Zn • clorosis férrica
8,5-9,0	• en suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse a MgCO3 si no hay sodio intercambiable
9,0-10	• presencia de NaC03
>10	• elevado PSI, >15 • toxicidad por Na, B • movilidad del P como Na3P04 • actividad microbiana escasa • micronutrientes poco disponibles,excepto Mo

Tabla 18 Interpretación de los valores de pH en agua (Porta *et al.,* 2004)

pH potencial KCl	según Scheffer y Schactschabel
< 4	extremadamente ácido
4,0 – 4.9	fuertemente ácido
5,0 – 5,9	medianamente ácido
6,0 – 6,9	ligeramente ácido
7,0	Neutro
7,0 – 8,0	Ligeramente alcalino
8,1-9,0	Medianamente alcalino
9,1-10,0	fuertemente alcalino
>10	extremadamente alcalino

Tabla 19 pH potencial en KCl (Extraída de Fassbender, 1975)

Salinidad

Puede medirse la ***Resistencia en pasta*** (R, relación suelo-agua 1:1) (Tabla 20), y la ***Conductividad eléctrica en el extracto de suelo a saturación*** (CE) con bomba de vacío a partir de la pasta 1:1 (Tabla 21).La Resistencia es la inversa de la CE. A mayor salinidad menor R y mayor CE. En la Tabla 22, se expresa la salinidad en solución saturada (g/l).

> 170	LIBRE DE SALINIDAD
170 – 95	ligeramente afectado
95 – 55	medianamente afectado
< 55	fuertemente afectado

Tabla 20 Resistencia eléctrica de la pasta (Ohms)

Si bien la Tabla 20, indica que con 170 Ohms el suelo no tendría sales, es recomendable que se efectúe la medición más precisa de la salinidad mediante la CE cuando la R es menor a aproximadamente 500 Ohms.Así se indica que los suelos totalmente libres de sales de la pradera pampeana suelen tener CE < 1 y R próxima a 1000 Ohms.

CE	Efectos sobre los cultivos
< 2	efectos despreciables de salinidad
2 – 4	afecta solo cultivos muy sensibles
4 – 8	problemas en la mayor parte de los cultivos
8 – 16	sólo cultivos específicamente tolerantes
16 – 25	solo cultivos muy tolerantes(ej: palma datilera)
> 25	no desarrollan cultivos, solo se da la vegetación halófila.

Tabla 21 Conductividad eléctrica (dS/m o mmhos/cm a 25º C)

sales totales g/l	
0 – 2,0	libre de salinidad
2,0– 3,5	ligeramente afectado
3,5 – 6,5	medianamente afectado
> 6,5	fuertemente afectado

Tabla 22 Sales en solución saturada (g/l)

Se destacan que los valores aquí consignados (Tabla 21) son de tipo general debiendo conocerse la salinidad que efectivamente afecta a un cultivo en particular, tal como se analiza en detalle en la Guía de TP sobre *Suelos Salinos y Sódicos* disponible en el Aula

Virtual Edafología. En dicha guía en Tabla 5 se presentó la tolerancia de los cultivos a la salinidad (Porta et. al., 1994), y en la Tabla 6 latolerancia de los cultivos a la alcalinidad (Bohnet al., 1993). Asimismo se explica la forma en que estos criterios pueden ser considerados.

Transformaciones y equivalencias vinculadas a iones y sales

- ppm = mg/Kg =mg/l = ug/ml = meq/l.PE (peso equivalente en gr)
- ppm/10 = mg/100 g
- 1000 mg/l = 10^{-3}.mg/l = ug/ml
- ppm / PE en gr = meq/l
- ppm/1000 = g/kg = g/l= Kg/m^3
- g/cm^3 = Tn/m^3
- CE.10^{-3} = mmhos/cm = dS/m
- CE.10^{-6} = umhos/cm

- Transformar de CEa meq/l……..**meq/l** = 10. CE.(10^{-3})
- Transformar de CE a ppm ……**ppm** = 0,64 .CE.(10^{-6})
- Transformar de meq/l a ppm……**ppm**= meq/l. PE
- Transformar de sales solubles en extractos en meq/l a meq/100 de Ca, Mg, Na o K

……..**meq/100**= meq/l **.** Hs /1000

- Hs = humedad a saturación, gr de agua/gr de suelo por 100

(Hs=es la humedad que hay en la muestra al momento de extraer los solubles de la pasta a saturación).

Salinidad en relaciones suelo-agua: tal como se comenta en punto precedente, la medición de CE en el extracto a saturación es el procedimiento adecuado y con valores de referencia ajustados para la interpretación de las sales presentes tanto en el suelo como en cualquier solución. Sin embargo, es posible que se requieran efectuar *mediciones a campo* teniendo la imposibilidad de generar vacío para obtener el extracto de saturación. Estudios realizados en la cátedra de Edafología de la FCAyF (Larrieu com pers) llegaron a la conclusión que la medición de la CE en pasta de saturación (1:1) arroja valores muy por debajo de los medidos en el extracto de saturación del mismo suelo. Consecuentemente, si se quisiera de una manera tentativa y con la finalidad de establecer comparaciones entre situaciones conocidas (por ejemplo, estudiar la evolución del suelo frente al riego) podrían establecerse valores propios de referencia utilizando por ejemplo relaciones suelo-agua 1:1, 1:2, 1:5. Existe una gran diversidad de equipos de campo que miden pH, CE y temperatura, e incluso Eh (potencial redox) que pueden ser utilizados para estos fines.

En la Tabla 23 (Boletín Hortícola, F Cs Ag y Fs) se presentan a modo de referencia y a fin de observar el orden de magnitud de valores de CE según procedimiento (CE extracto y CE medida en diferentes relaciones suelo-agua) y su interpretación general sin especificar cultivos. Se reitera que los valores aquí presentados deben ser tomados con extrema precaución ya que no se indican las condiciones de medición. Se destaca que podrían modificarse significativamente en cada suelo asociado principalmente al nivel de salinidad presente y textura del suelo.

Relación 1 : 2 CE (dS. m-¹)	**Relación 1 : 5** CE (dS. m-¹)	**Extracto saturado** CE (dS. m-¹)	**Reacción de las plantas**
0 - 0,25	0 - 0,12	0 - 0,74	Escasos nutrientes
0,25 - 0,75	0,12 - 0,35	0,75 - 1,49	Deseable para plantas sensibles a sales
0,75 - 1,25	0,35 - 0,60	1,5 - 2,99	Optimo para la mayoría de los cultivos
1,25 - 1,75	0,60 - 0,85	3,0 - 4,5	Reducción del crecimiento
1,75 - 2,25	0,85 - 1,00	4,5 - 5,5	Síntomas de toxicidad
> 2,25	> 1,10	5,50	Tóxico para la mayoría de las plantas

Tabla 23 Salinidad de suelo en relaciones suelo-agua 1:2, 1:5 respecto a la CE en el extracto de saturación

Sodicidad

En la Tabla 24, se presenta la interpretación del ***porciento de Na^+ intercambiable (PSI)*** extraído con Acetato de amonio, pH 7. Esta interpretación es muy general y no es correcta para todos los suelos.

Así es de destacar que los *mejores suelos*, de más alta productividad, el PSI suele ser *próximos e incluso inferiores a 1-2* (suelos de pradera pampeana). Asimismo, en algunos suelos y cultivos, los límites indicados en la tabla 24 son más estrictos, consecuentemente, un valor incluso inferior a 7 puede resultar muy elevado, y principalmente debe considerarse que es un suelo que se ha tenido un proceso de alcalinización debiendo establecerse su origen (ver Sistemas de Flujo punto II.4 de la presente publicación, y en Guía de TP Suelos salinos y sódicos, Aula Virtual Edafología). Por ejemplo, *un suelo con PSI 5*, el riego debería realizarse con prácticas de manejo que aseguren que no va a conducir a un agravamiento de esta situación tal como resultaría de la elevación de una superficie freática y/o aporte de sales por el agua de riego.

La agricultura con riego indefectiblemente conduce a un incremento de sales variando su tipo, magnitud, y tiempo de ocurrencia según el manejo, calidad del agua y suelo. Cabe destacar ya que dicho valor de PSI no es frecuente en suelos que no se encuentran sujetos al menos en algún periodo (meses o años) a la influencia de una superficie freática mas o menos alcalina. Esta puede tener variaciones que dependen de condiciones locales y/o regionales (Figura 3 y 4, punto II.4).

PSI=Na intercambiable/CIC

PSI	Nivel en suelo
< 7	Bajo
7 – 15	Medio
15 – 20	Alto
20 – 30	muy alto
> 30	extremadamente alto

Tabla 24 Porciento de sodio intercambiable (PSI) extraído conAcetato de amonio, pH7, 1N

Respecto a la correspondencia del **PSI con la RAS** (relación de adsorción sodio) en nomograma presentado en Manual 60 de Richard (1958) y explicado en la Guía de TP Suelos Salinos y Sódico, se destaca que la relación 15 de PSI y 13 de RAS, así como las restantes relaciones que surgen de la aplicación del nomograma de referencia son válidas para los suelos en que dichas relaciones fueron obtenidas (texturas gruesas). En suelos con alta proporción de arcillas dichas relaciones cambian aunque existen correlaciones significativas que pueden ser establecidas para cada suelo. En general en la bibliografía especializada en suelos salinos y sódicos se recomienda utilizar el procedimiento RAS a partir de cationes solubles debido a que presenta menos errores de determinación en laboratorio y es de mucho menor costo.

Capacidad de intercambio catiónico

En la Tabla 25se presenta la interpretación de la ***capacidad de intercambio catiónico*** en meq/100 o cmol/kg, extraída con Acetato de amonio, pH7, 1N. Cabe destacar que estos valores son el resultado del contenido total de arcillas, tipo de arcillas, y cantidad y calidad de materia orgánica (esto se amplia en Guía de TP sobre Materia orgánica, y Capacidad de Intercambio Catiónico).

CIC	
5	muy bajo
5 – 10	Baja
10 – 17	Moderada
17-25	Alta
> 25	muy alta

Tabla 25 C*apacidad de intercambio catiónico* (meq/100 o cmol/kg)

Propiedades químicas

Análisis de suelo: existen 3 procedimientos principalmente utilizados para evaluar la fertilidad edáfica, teniendo como valor a interpretar un análisis efectuado en el suelo. Cabe destacar que existen también *análisis en planta, en savia, y otros procedimientos óptico* (índice verde, etc) (se desarrolla en Libro de cátedraSuelo en el Paisaje, Condiciones de Dotación).

i- Criterio de Aportación-Extracción; ii- Criterio de Suficiencia y iii- Relación entre Cationes

i-Criterio de aportación-extracción*:** Varía para cada especie vegetal y momento fenológico, existe una gran disponibilidad de tablas sobre las exigencias de un determinado nutriente para un rendimiento dado de los principales cultivos. Normalmente se expresa en ***kg del nutriente necesario para producir una unidad de producción del cultivo (grano u órgano cosechable), por ejemplo ***kg/tn de grano o kg/m^3 de producción de madera*** en base seca.

La reposición considerando la ***absorción del cultivo*** consiste en la aplicación de todos los nutrientes que fueron tomados por el cultivo (planta entera incluyendo órgano cosechado). Sin embargo, la fertilización por los niveles de ***extracción de los cultivos,*** generalmente es el criterio más utilizado, procura reponer los nutrientes que son tomados por los ***órganos que se cosechan*** y consecuentemente, no retornan al suelo como rastrojo.

Si bien hay mucha experimentación efectuada a campo y/o recomendaciones que surgen de recopilaciones bibliográficas extensas, tal como la que se presenta para los principales cultivos extensivos en la Tabla 26.

Cultivos	Absorción Total (kg/ton)						Extracción (kg/ton)					
	N	P	K	Ca	Mg	S	N	P	K	Ca	Mg	S
Soja	66	6	35	14	8	4	49	5.4	17	2.7	3.1	2.8
Maíz	22	4	19	3	3	4	15	3	4	0.2	2	1
Trigo	30	5	19	3	4	5	21	4	4	0.4	3	2
Cebada	26	4	20	-	3	4	15	3	5	-	1	2
Girasol	40	11	29	18	11	5	24	7	6	1.5	3	2
Sorgo	30	4	21	-	4	4	20	4	4	-	1	2

Fuente: Recopilación de Ciampitti y García (2007 y 2008)
Disponible en www.lacs.ipni.net

Tabla 26 Requerimientos nutricionales de los cultivos, absorción y extracción por tonelada de órgano cosechado

Sobre la absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios en ***cereales, oleaginosos e Industriales***, puede consultarse a Ciampiti y García en http://lacs.ipni.net/article/LACS-1081.

Sobre la absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios ***hortalizas, frutales y forrajeras***, en http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$FILE/AA%2012.pdf

En guía sobre ***Acidez del suelo***, se indicó como fuente de acidez la extracción por los cultivos. En la Figura 11 de dicha entrega, se presentó un ejemplo de extracción por cultivos y en Figuras 8, 9, 10, se analiza la situación en la Argentina, hasta el año 2011-13.

A fin de ejemplificar la incidencia que un determinado nutriente puede tener sobre la producción de algunos cultivos, en la Figura 11 se presenta gráficamente la extracción de N-P-K, destacándose la marcada diferencia en K. Este nutriente se constituye en un nutriente clave en sistemas intensivos y cuando se aplica, deben considerarse las interacciones entre nutrientes, tal como se analiza en punto iii-*Relación entre cationes*.

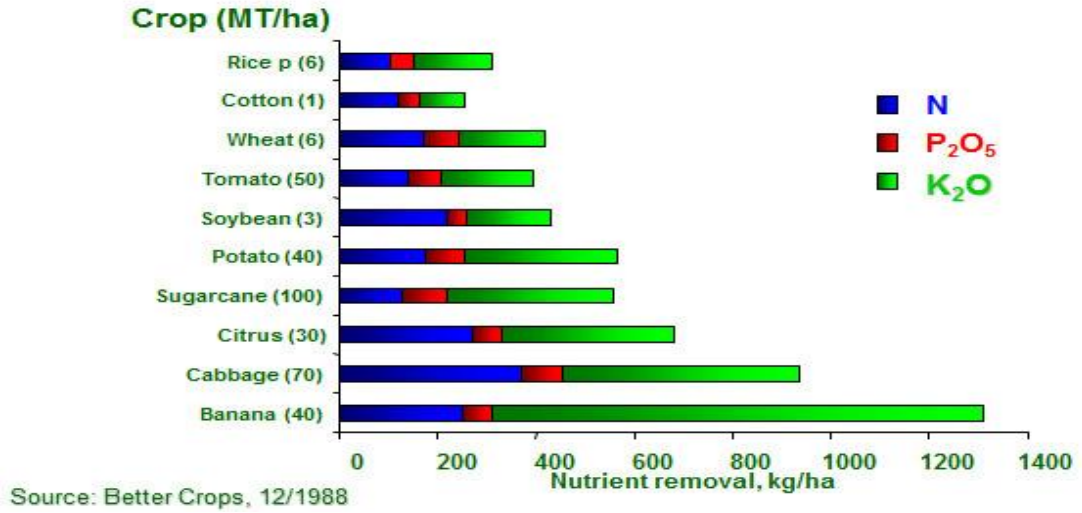


Figura 11 Extracción de N-P-K en diferentes cultivos de clima templado a tropical

ii-Criterio de suficiencia: En base a la cantidad (dotación) del nutriente medido según un método de laboratorio definido. Ejemplo, ppm de P por el método de Bray Kurtz II para el cultivo de trigo. Se analiza a continuación para los principales nutriente. Sobre este tema puede consultarse en el Libro Suelo en el Paisaje en Aula Virtual, y en Guías de TP sobre nutrición de cultivos: N, P, cationes, y taller sobre micronutrientes.

Calcio, magnesio, sodio, y potasio_.
Normalmente se indican valores de referencia en la fracción intercambiable, extraído con Acetato de amonio, 1 N, pH 7, presentándose dichos valores expresados en mg/100, me/100 ($cmol^+$/kg), porciento o partes por millón.

En cultivos intensivos, existen otros criterios que consideran las fracciones solubles. En general poco estudiado recomendándose establecer para cada ambiente y cultivo valores de referencia. Sin embargo, en algunas publicaciones pueden encontrase algunos criterios que pueden ser tomados de base Dominguez Vivancos (1989), Cadahia (1998) entre otros.

Unidades frecuentes y transformación de unidades
Los cationes intercambiables pueden expresarse en las siguientes unidades:

mg/100,meq/100, cmol/kg, ppm, *%.*

A continuación se presentan sus equivalencias, y como efectuar las *transformaciones* a fin de interpretar correctamente un nivel de nutriente (suficiencia), y con este, definir Kg/ha presente en el suelo, y la necesidad de reposición (criterio extracción).

mg/100 * 10 = ppm ⇌ ppm / 10 = mg/100

mg/100/ PE = meq/100 ⇌ meq/100 * PE = mg/100

meq /100 * PE * 10 = ppm

PE: *peso equivalente*; K = 39.1; Ca= 20 ; Mg = 12.15 ; Na = 23

Niveles de suficiencia de cationes en valores absolutos_.
En la Tabla 27, se dan valores de referencia para **K intercambiable**, en mg/100g en función del sistema de riego y textura (Cadahi, 1998) y en la Tabla 28 valores de referencia general para K intercambiable expresados en meq/100 o cmol/kg.

	muy bajo	bajo	**normal**	Alto	muy alto
SECANO					
Arenoso	0-6	6-12	12-18	18-30	30-48
Franco	0-8	8-12	**16-24**	24-40	40-64
Arcilloso	0-10	10-20	20-30	30-50	50-80
RIEGO extensivos					
Arenoso	0-8	8-16	16-24	24-40	40-64
Franco	0-10	10-20	**20-30**	30-50	50-80
Arcilloso	0-12	12-24	24-36	36-60	60-96
RIEGO Intensivo					
Arenoso	0-10	10-20	20-30	30-50	50-80
Franco	0-12	12-24	**24-36**	36-60	60-96
Arcilloso	0-14	14-28	28-42	42-70	70-112

Tabla 27 K intercambiable (mg/100 g de suelo) (Cadahia, 1998)

Potasio (meq/100g)	**nivel en suelo**
< 0,2	muy pobre
0,2 – 0,4	Pobre
0,4 – 0,6	moderadamente provisto
0,6 – 1,0	bien provisto
1,0 – 1,5	Rico
> 1,5	muy rico

Tabla 28 K intercambiable (meq/100 o cmol/kg)

En la Tabla 29 dan valores de referencia para **Ca y Mg intercambiables,** extraídos con $AcNH_4$, 1N, pH 7, expresados en mg/100. En la Tabla 30 y 31 valores de referencia en meq/100g de suelo para Ca y Mg respectivamente.

	muy bajo	bajo	**Normal**	alto	muy alto
Ca^{+2}	0-7	7-200	**200-280**	280-400	> 400
Mg^{+2}	0-7	7-18	**18-30**	30-48	>48

Tabla 29 Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiable (mg/100 g de suelo) extraído con $AcNH_4$

Ca^{+2}(meq/100g)	**nivel en suelo**
< 1,8	muy pobre
1,8 – 3,6	Pobre
3,6 – 5,5	moderadamente provisto
5,5 – 8,0	normalmente provisto
8,0-11,0	bien provisto
11,0 – 14,0	Rico
> 14	muy rico

Tabla 30Ca^{+2}intercambiable (meq/100 o cmol/kg)

Mg^{+2} (meq/100g)	**nivel en suelo**
<0,2	muy pobre
0,2 – 0,4	Pobre
0,4 – 0,6	moderadamente provisto
0,6 – 1,0	normalmente provisto
1,0 – 1,5	bien provisto
1,5 – 2,0	Rico
> 2,0	muy rico

Tabla 31 Mg^{+2}intercambiable (meq/100 o cmol/kg)

En la Tabla 32 se presentan algunos valores frecuentes en la pradera pampeana de cationes intercambiables (meq/100g=cmol/kg (Conti, 1986).

Observación	**Ca^{+2}**	**Mg^{+2}**	**K^{+}**	**Na^{+}**
Extremos generales	5 - 15	2 - 4	0.5 – 3	0.5 - >20
Asociaciones tentativas con los suelos	más bajos texturas arenosas	< 1 suelos rojos	4 – 5 hasta 6 suelos con sales	0.1 – 0.4 pradera húmeda-subhúmeda
	más altos en arcillosas	> 10 suelos hidrohalomórficos Pampa Deprimida	0.1 Ultisoles de Corrientes	5 – 7 cultivos intensivos mal drenaje
			0.4 – 4 en Delta disminuye hacia el norte	10 - 20 salinización-alcalinización

Tabla 32Valores frecuente de cationes intercambiables en la pradera pampeana

Nitrógeno y Carbono orgánico

En la Tabla 33 se presenta la interpretación del contenido de materia orgánica, medido por Walkey Black (Velasco Molina, 1983). En la Tabla 34 se presentan las interpretaciones dadas para C orgánico y N total medido por Kjeldahl (factor capacidad) (Conti, 1986) donde se corresponde la interpretación de ambas variables dado que se considera que las relaciones C/N adecuada en un suelo de pradera (humus mull) es de 10. En la Tabla 35 se dan las relaciones C/N (expresados ambos en %). En la Tabla 36 el contenido de NO_3^- expresado como N (método del 2,4 fenoldisulfónico).

materia orgánica %	
< 0,6	extremadamente pobre
0,6 – 1,2	pobre
1,2 – 1,8	medianamente pobre
1,8– 2,4	medio
2,4 – 3,0	medianamente rico
3,0 – 4,2	rico
>4,2	extremadamente rico

Tabla 33 Contenido de materia orgánica (%) Velasco Molina, 1983

C orgánico %		N total %	
0 - 0,75	muy pobre	<0,05	muy pobre
0,75 – 1,5	moderadamente pobre	0,05-0,1	moderadamente pobre
1,5 – 2,5	medio	0,1 – 0,2	medio
2,5 – 3,5	alto	0,2 - 0,4	alto
> 3,5	muy alto	>0,4	muy alto

Tabla 34 Contenido de carbono orgánico y nitrógeno total (%) (Conti, 1986)

Menor a 8	Mayor a 14
Presenta residuos orgánicos muy transformados, sin nuevos aportes	Agregado reciente de residuos orgánicos
Suelos "agotados"	Vida microbiana insuficiente
Condiciones de alta oxidación (arenosos)	Escasa liberación de nutrientes y fijación de N en formas no disponibles para los vegetales

Tabla 35 Relación C/N

$N\text{-}NO_3^-$ ppm	
<20	muy pobre
20 – 40	Pobre
40 – 80	Moderado
> 80	Bien provisto

Tabla 36 Contenido de $N\text{-}N0_3^-$

Para transformar el valor de $N\text{-}NO_3^-$ a NO_3^-, debe multiplicarse el $N\text{-}NO_3^-$ por 4,42.

Fósforo

En punto I 3 se comentó la importancia de conocer el método de análisis al interpretar un dato de laboratorio y el alcance de dicha interpretación. En la Tabla 37 se presenta la interpretación de P según diferentes métodos que extraen variadas fracciones del P en el suelo (Domínguez Vivancos, 1989). En Trabajo Practico sobre P se analizan las formas en que dicho elemento se presenta en el suelo y que fracciones se extraen según el método de análisis utilizado. Asimismo, se analizan las condiciones edáficas bajo las cuales dichos métodos resultan más adecuados. Los estudios de Correlacion y Calibración definen la pertinencia de cada metodo para predecir la suficiencia de un nutriente y su respuesta en rendimiento. En Tabla 37 se presenta una síntesis sobre los principales métodos procedimientos para medir P y su interpretación (extraída de Domínguez Vivancos, 1989).

Características e interpretación de los principales métodos de análisis para determinar el fósforo asimilable del suelo (valores en partes por millón de P)

Método de análisis y utilización	Condiciones de interpretación	Nivel de fertilidad			
		M.B	B	M	A
Olsen: 0.5 M. CO_3HNa a pH 8,5 Suelos neutros y calizos	Suelos ligeros (1)	4-8	6-12	10-20	20-40
	Suelos medios (1) (francos)	6-10	10-15	15-25	30-50
	Suelos pesados (1) (arcillosos)	8-12	12-20	20-30	30-60
Burriel-Hernando: Carbonatos de Ca y Mg. Acidos sulfúrico y acético. pH 3,25. Suelos neutros y calizos	General	—	90	120	—
Bray I: Fluoruro amónico y ClH 0,025 N. Suelos ácidos y neutros	General	3	7	20	30
Bray II: Fluoruro amónico y ClH 0,1 N. Suelos ácidos y neutros	General	5	10	20	30
Joret - Hebert: Oxalato amónico. Suelos neutros y calizos (>2%)	10% arcilla	15	30	60	85
	20% arcilla	20	40	90	110
	30% arcilla	25	50	110	130
	40% arcilla	30	60	120	140
Dyer: Acido cítrico 2%. Suelos ácidos no calizos	10% arcilla	20	45	90	125
	20% arcilla	30	60	135	160
	30% arcilla	40	75	160	190
	40% arcilla	45	90	180	210
Egner-Riehm: Lactato Ca 0,040 N ClH 0,02 N. Todo tipo de suelos	General	50	75	90	150
Truog: Acido sulfúrico 0,2 N Suelos no calizos	General	5	10	20	40
Agua (Var der Paauw). Todo tipo de suelos	General	5	8	10	20
Valor L: Cultivo y fósforo radioactivo P_{32}	General	100	200	300	—

(1) Según la exigencia de los cultivos.
MB, muy baja; B, baja; M, media o satisfactoria; A, alta.

Tabla 37 Interpretación de P según diferentes métodos (extraída de Domínguez Vivancos, 1989)

En la Tabla 38, se presentan valores de referencia de P asimilable por Bray & Kurtz I, que son los que normalmente se consideran para los cultivos extensivos en la pradera pampeana. Respecto a los valores que se presentan en Tabla 37 para este método, se aprecia que no difiere.

P BK1	
< 5	muy bajo muy pobre
5-10	bajo Pobre
10 - 20	moderado
20 - 30	rico bien provisto
> 30	muy rico

Tabla 38 Valores de referencia de P asimilable, BK1

Estos valores son generales, debiéndose considerar que el límite crítico varía para cada cultivo. Por ejemplo, para la *alfalfa es de 25 ppm*. Lo cual significa que por debajo de este valor hay respuesta al agregado de fertilizantes. En general 30 ppm es un valor suficiente incluso en los cultivos exigentes, tales como las hortícolas. En la Figura 12 se presentan valores críticos para diferentes cultivos de P asimilable por BK I, y rendimientos relativos (extraída de presentación Díaz Zorita, 2003).

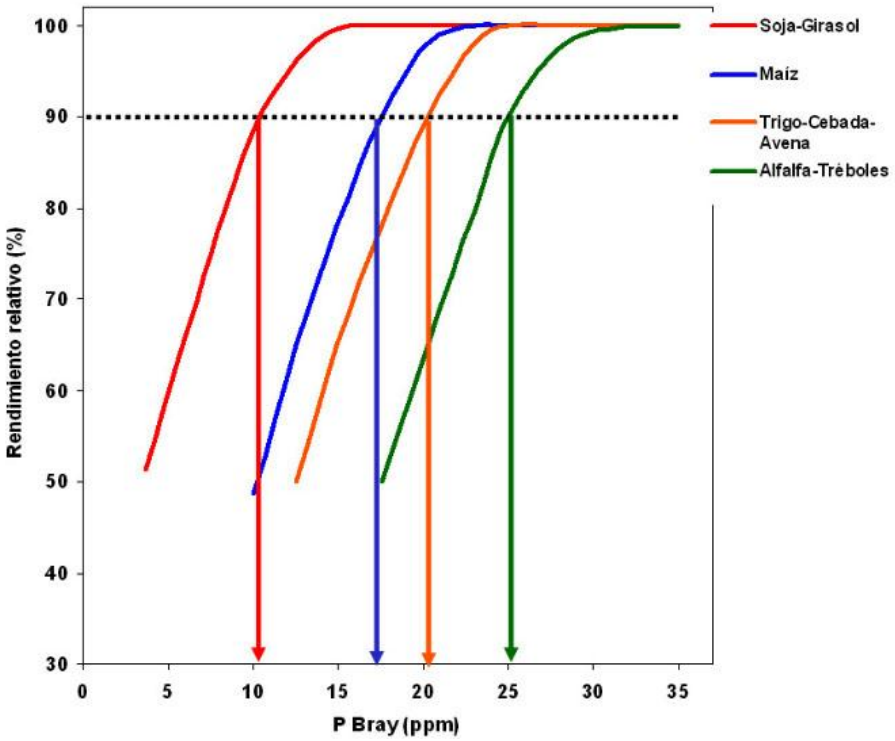


Figura 12 Fósforo extractable y rendimiento relativo de cultivos en pradera pampeana (extraído de presentación Diaz Zurita, 2003)

En la Tabla 39 se presenta a modo de ejemplo la interpretación de la nutrición edafica mediante diversos procedimientos, tal como se indican en la base de dicha Tabla. Se aprecia que con igual procedimiento de extracción para P (Olsen modificado) se miden los micronutrientes, Zn, Mn, Fe y Cu. Se destaca que para algunos de estos elementos el rango de suficiencia se produce en valores próximos al menos en algunos de sus extremos que para el P.

Características	Categoría		
	BAJA	MEDIA	ALTA
pH agua 1:2.5	< 5.5	5.6-6.5	> 6.5
acidez (cmol(+)/L)	< 0.5	0.5-1.5	> 1.5
saturación acidez (%)	< 10	10-50	> 50
suma bases (cmol(+)/L)	< 5	5-25	> 25
CICE (cmol(+)/L)	< 5	5-25	> 25
Ca (cmol(+)/L)	< 4	4-20	> 20
Mg (cmol(+)/L)	< 1	1-5	> 5
K (cmol(+)/L)	< 0.2	0.2-0.6	> 0.6
Ca/Mg		2-5	
Ca/K		5-25	
Mg/K		2.5-15	
Ca+Mg/K		10-40	
P (mg/L)	< 10	10-20	> 20
Zn (mg/L)	< 2	2-10	> 10
Mn (mg/L)	< 5	5-50	> 50
Fe (mg/L)	< 10	10-100	> 100
Cu (mg/L)	< 2	2-20	> 20

niveles críticos para la interpretación de análisis de suelos

Acidez, Ca y Mg extraídos con KCl 1N, 1:10
K, P, Mn, Zn, Cu, Fe extraídos con Olsen Modificado, 1:10
Adaptado del MAG, 1978; Díaz-Romeu y Hunter, CATIE, 1978.

Fuente: BERTSCH, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Oficina de Publicaciones, UCR.

Tabla 39 Ejemplo de interpretación de variables de suelo en Costa Rica con procedimientos internacionales (Bertsch, 1986, Costa Rica)

Ejemplo sobre Diagnóstico, necesidad de fertilizar en N y elección de fertilizante
Se presenta para el caso especifico del N el uso del criterio de suficiencia y otros procedimientos específicos para Nitrogeno al definir necesidad de **fertilización.**

En el caso ***del N,*** en función de las características de su ciclo en el suelo, además de establecer el *nivel de suficiencia* en N (dotación, forma y técnica de medición), tener en cuenta: - ***especie*** *vegetal,* duración de la estación de crecimiento, rendimiento, cantidad de N-P-K extraído. – ***clima*** durante el crecimiento y desarrollo del cultivo, respuesta a la fertilización.- ***valor*** *obtenido en laboratorio* referido a la capa arable para expresar en Kg/ha. - ***tasa de reposición de nutrientes*** durante el desarrollo del cultivo.

La incidencia de los factores mencionados precedentemente en el ciclo del N y consecuentemente, en su disponibilidad para los cultivos, puede ser comprendido a partir de la ecuación que a continuación se indica sobre el **Método del Balance de** Neeteson (1990) en Cabrera (2000) como criterio para ajustar dosis de aplicación de N. Este procedimiento considera la mineralización, aportes de fuentes orgánicas e inorgánica y pérdidas.

Dosis de N = $(R_{esp} * b) - N_{abs} - N_{ini} - N_{agr} - M_s - M_r - M_e + N_{inm} + N_{Lav} + N_{gas} + N_{fin}$

R_{esp}, rendimiento esperado
b, N absorbido por unidad de rendimiento en grano/fruto
N_{abs}, N ya absorbido al momento de aplicar el fertilizante
N_{ini}, N inorgánico al momento de fertilizar (laboratorio)
N_{agr}, N agregado por lluvia o fijación biológica
$M_s - M_r - M_e$,N mineralizado de MO suelo- residuos-estiércoles
N_{inm}, cantidad de fertilizante inmovilizado
N_{Lav}, N lavado
N_{gas}, N volatilizado
N_{fin}, N presente en el suelo al final del ciclo

En rojo, valores conocidos; en azul, valores estimados por métodos rápidos de laboratorio y en verde, valores estimados o experimentales.

Sobre la fertilización nitrogenada pueden efectuarse algunas consideraciones que fueron desarrolladas con mayor detalle en Guías sobre Acidez del suelo y Nitrogeno: En la elección del fertilizante debe considerarse, ***riqueza*** en el nutriente, otros elementos acompañantes útiles o contaminantes, ***forma*** en que se aporta el elemento, cuales son ***fuente de acidez*** (principalmente amoniacales $SO_4(NH4)$), y la ***salinidad*** que generan en el medio. Cada fertilizante tiene un ***índice salino*** que debe conocerse, principalmente en la estación seca. Por ejemplo los fertilizantes nítricos, por su elevada solubilidad y al no fijarse en el suelo, pueden elevar la presión osmótica. En suelos con drenaje deficiente o con cultivo de arroz, no deben utilizarse fertilizantes a base de NO_3^-, por la desnitrificación. Por último considerar la ***actividad de microorganismos***, que sean capaces de transformar NH_4^+ en NO_3^-, por ejemplo, la urea, para ser transformada en NO_3^-, requiere de la presencia de la enzima ureasa en el suelo, que se encuentra en la materia orgánica, y luego condiciones propicias de aireación, pH, humedad, temperatura, para la nitrificación.

En la Tabla 40 se dan lineamientos generales sobre la elección de fertilizantes nitrogenados.

Reacción del suelo	Amónico	Nítrico	Orgánico
Alcalino	Poco apto (volatilización)	Apto	Muy apto (aumenta CO_2)
Neutro	Muy apto	Muy apto	Muy apto
Acido	Poco apto (acidificación)	Muy apto	Apto

Tabla 40 Reacción del suelo y elección de la forma del N en el fertilizante

A continuación se indican bajo qué condiciones existen mayores posibilidades de éxito en la aplicación de fertilizantes nitrogenados (extraído de diversas fuentes):

- bajo nivel de N orgánico y mineral
- estrecha relaciones C/N
- baja actividad de la microflora
- número de años de cultivos anuales como predecesores, sin empleo de leguminosas
- incorporación de rastrojos inmediatamente antes de sembrar.
- siembra directa
- adecuado abastecimiento de agua, aire y nutriente no nitrogenado.
- características climáticas favorables
- técnicas culturales correctas
- capacidad genética del cultivo
- forma y época conveniente de aplicación

iii- Relación entre Cationes: Este procedimiento de análisis de los datos obtenidos en laboratorio a partir de muestras de suelo considera: iii 1) las relaciones entre cationes para asegurar adecuadas condiciones de abastecimiento (por ejemplo, contenido de Ca en la CIC que asegura adecuada estructura), y iii 2) las relaciones entre cationes a fin de asegurar una adecuada nutrición para el cultivo debido a fenómenos de competencia cationica y aniónica, antagonismos y sinergismos.

iii 1) Participación porcentual de cationes en el complejo de intercambio_.
Este otro criterio de interpretación de cationes intercambiables, considera las proporciones que condicionan la ***estructura y drenaje*** (abastecimiento). En la Tabla 41 se presenta un criterio general de interpretación del ***porciento de saturación de cationes*** en el complejo de intercambio ($AcNH_4$ 1N, pH 7) (Conti, 1986).

clasificación	**Ca^{+2}**	**Mg^{+2}**	**K^{+}**	***Na^{+}**
muy baja	< 40			
Baja	40 – 60	< 7	< 6	
algo baja		7 – 10		
Moderada	60 – 75	10 – 15	6 – 10	< 9
Buena	> 75	15 – 20	> 10	
algo elevada		20 – 30		9 – 15
Excesiva		> 30		> 15

Tabla 41 Interpretación de porciento de saturación de cationes en CIC según criterios generales
***Na** ver Guia TP suelos Salinos y sódicos, esto es incorrecto para todos los suelos y comentado precedentemente en punto sodicidad.

Gaucher y Barbut (1971) señalan que en un **suelo agrícola** sería adecuada la siguiente proporción de cationes en el complejo de intercambio (Tabla 42), y que en general un suelo fértil, posee entre **75 y 90 *%*** de ***saturación con bases totales*** (suma de bases respecto a la CIC).

	% de la CIC
Ca^{+2}	80 –90
Mg^{+2}	5 – 10
K^{+}	2 – 3
Na^{+}	1
H^{+}	5- 10

Tabla 42 Proporción de cationes en el complejo de intercambio de un suelo agrícola según Gaucher y Barbut (1971)

Otros autores indican rangos con pequeñas diferencias. En Tabla 43 se presenta un ejemplo de relación entre cationes intercambiable y pH en suelos Argentinos, y en Tabla 44 relaciones entre pH con el % de saturación en bases, valor S (suma de bases en meq/100), CIC (capacidad de intercambio catiónico en meq/100), y materia orgánica (MO) presentado en Darwich (1989).

	pH	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	K^{+}
Natralbol	6.5	65.2	21.1	1.8	11.9
Hapludol	6.3	51.0	32.7	5.0	11.3
Natracuol	9.8	50.0	13.7	36.4	9.9

Tabla 43 Relación entre % cationes intercambiable y pH en suelos Argentinos

pH	% sat	S me/100	CIC me/100	%MO
5.8	63	20.3	32.1	6.2
6.1	67	21.8	32.4	6.3
6.2	71	2.19	3.07	1.4
6.0	80	18.8	23.5	2.9
6.4	89	10.68	11.95	2.1
6.7	93	9.77	10.5	1.3
7.1	97	9.17	9.4	1.0
7.3	100	15.95	15.4	0.8

Tabla 44 Relación entre pH, % de saturación en bases, valor S, CIC, y MO

Si bien por un criterio de suficiencia puede considerarse que un nutriente tiene un nivel adecuado en el suelo, pueden producirse ***deficiencias inducidas,*** debido a que se encuentra en un nivel insuficiente con respecto a otro catión. Consecuentemente, debe asegurarse que ningún nutriente se encuentre en un nivel tal que impida la absorción, movilidad, etc de otro.

iii 2) Relaciones para asegurar absorción de los cultivos Ejemplos
Son muchas las relaciones que pueden establecerse dependiendo el cultivo y sistema productivo. Entra las mas difundidas para todos los cultivos se mencionan las presentadas en la Tabla 45 (Mizuno, 1986).

K/Ca	> 1	probable deficiencia de Ca
Ca/Mg	< 1 > 10	probable deficiencia de Ca probable deficiencia de Mg
K/Mg	 > 1, 5 > 1 > 0,6 > 0,5	deficiencia de Mg en cultivos: • extensivos • hortícolas • cultivo invernadero-frutales • hortícolas límite peligroso forrajeras

Tabla 45 Relaciones entre niveles de nutrientes medidos en meq/100

Otras relaciones que pueden resultar particularmente importantes en algunos cultivos: K/Ca - K/Mg - K/Fe - K/Zn - N/K - P/K - N/P - Ca/P - Ca/Fe - Ca/Na

A continuación se explican algunas relaciones a modo de ejemplo:
En algunos vegetales, el **K^{+}** tiene un efecto positivo en la calidad del fruto, y su nivel debe ser ajustado respecto al **Ca^{+2}** y el **Mg^{+2}** según el momento del cultivo, tal es el caso del cultivo de tomate. Sin embargo, si el agregado de K^{+} es excesivo puede conducir a deficiencias inducidas de macronutrientes como el**Ca^{+2}** o **Mg^{+2}** y de micronutrientes como el **Fe^{+3}** y **Zn^{+2}**, independientemente del nivel que exista en el suelo. Asimismo, el **Ca^{+2}** y el **Mg^{+2}** compiten con el **K^{+}** para ingresar en la raíz, consecuentemente pueden producirse deficiencias de **K^{+}** por excesos

de cualquiera de ellos. Debe entonces asegurarse una adecuada relación **Ca/Mg,** y de estos con el **K**.

Sin embargo, no sólo un nivel elevado de **Ca^{+2}**o **Mg^{+2}**puede dificultar la absorción de K, sino que también se verá altamente influenciado por la temperatura, humedad, pH, consecuentemente con el ***abastecimiento.*** El ***exceso de P***, puede disminuir en algunos frutos, los efectos positivos del **K^+**en relación a su calidad. Las condiciones de abastecimiento que condicionan la absorción de **K^+** son también condicionantes de la absorción de **P**.

Igualmente, ***deficiencias de Ca^{+2}*** se ven favorecidas por excesos momentáneos de riego, o de sales en general, y conducen a podredumbres apicales (enfermedades fisiológicas, Blossom end rot,https://www.youtube.com/watch?v=a_ric-6tKvo; Tipburn, en verduras de hoja, manzana).

Alpi (1991) señala un gran número de relaciones nutritivas y sus consecuencias para cultivos hortícolas. A continuación a modo de ejemplo se indican algunas de estas, sin embargo, esto debe ser establecido para cada cultivo, suelo, y sistema productivo.

- Excesos **P** deficiencias **Fe^{+3}** y **Zn^{+2}**.
- **Zn^{+2}** carencias por excesos y acumulación de **Fe^{+3}, Mn^{+2}, NO_3^-** y **PO_4^{-3}** en hojas
- **Ca^{+2}** en exceso inhibe absorción de **Fe^{+3}**y **Mg^{+2}.**
- **Mg^{+2},** su absorción es favorecida por **NO_3^-** e inhibida por **NH_4^+, K^+** y **Ca^{+2}**(Mg: movilidad dentro de la planta es grande a diferencia del calcio, puede trasladarse de tejidos viejos a jóvenes).
- **Fe^{+2}**carencias en suelos ricos en **Ca^{+2}, Cu^{+2}, Mn^{+2}.**
- **Mo** carencia favorecida por exceso de **NO_3^-**
- **K^+** antagónico con el **Ca^{+2}. K^+** en exceso es desaconsejable cuando hay montmorillonitas o vermiculitas.

La bibliografía sobre relaciones nutritivas, efectos de excesos-deficiencias sobre los cultivos es abundante, entre estas se destaca Domínguez Vivancos (1989), y Malavolta et al. (1989).En las Tabla 46 se presenta las relaciones sinérgicas y antagónicas entre nutrientes y en la Tabla 47, interacciones más comunes según Malavolta et al (1989).

Asimilación del nutriente	Antagonismo con	Sinergismo con
NH4+	Mg, Ca, K, Mo	Mn, P, S, Cl
NO3-	Fe, Cu, Cl	Ca, Mg, K, Mo
P	Cu, Zn	Mo
K	Ca, Mg	Mn (suelos ácidos)
Ca		Mn (suelos básicos)
Mg	Ca, K	Mo
Fe	Cu, Zn	K
Zn	Cu, P	
Cu	Zn, Mo, P	
Mn	Zn, Ca, Mo	
Mo	Cu, Mn	

Tabla 46 Relaciones sinérgicas y antagónicas entre nutrientes

Interacción	Elementos	Elementos
Competitiva	MoO_4^{2-}	SO_4^{2-}
Competitiva	Zn^{2+}	Mg^{2+}, Cu^{2+}
Competitiva	Fe^{2+}	Mn^{2+}
Competitiva	Mg^{2+}	K^{+}
No Competitiva	Ca^{2+}	Mg^{2+} (a veces)
No Competitiva	Zn^{2+}	$H_2PO_4^-$
Competitiva	SO_4^{2-}	SeO_4^{2-}
Competitiva	Cl^-	Br

Tabla 47Interacciones más comunes

- Competitiva, cuando tienen el mismo transportador.
- No Competitiva, la presencia del ión inhibe al otro.

A fin de asegurar una adecuada nutrición no sólo es necesaria un determinado nivel de un nutrientes (**criterio de aportación)** sino que también, este debe encontrarse en una adecuada relación con los otros (**criterio de relación entre nutrientes**), y que esto así suceda, puede ser en parte estimado a partir de la existencia de ese nutriente en el suelo **(criterio de suficiencia)** y de adecuadas condiciones de **abastecimiento.**

IV LIMITANTES Y POTENCIALIDADES DEL SUELO. ORÍGENES.

Luego de haber analizado las condiciones de dotación hasta la profundidad donde las raíces principalmente desarrollan (horizontes A, AB o BA), y las condiciones de abastecimiento que resultan del análisis de todos los horizontes, definiendo retención hídrica, permeabilidad, drenaje, salinización, alcalinización, acidificación, hidromorfismo, conforme se explica en puntos anteriores analice los siguientes aspectos:

1) Establecer **un orden de limitantes** para la productividad de los cultivos principales.

2) **Para cada una de las limitantes** que identifica analice **su origen tomando de base los factores formadores** de dicho suelo: material original, clima, relieve (flujos de agua), biota y tiempo. Esto último y el material original, puede establecerlo considerando la historia geológica del sitio (aparece generalmente descripta en las explicaciones de las cartas de suelo).

Por ejemplo, en la pradera pampeana en gran parte prevalece el loess (Formación Pampeana) que es anterior al depósito post pampeano (Formación Médano invasor, de texturas mas gruesas, materiales loessoides) que cubrió gran parte del Noroeste bonaerense (Trenque Lauquen, Pehuajó, 9 de Julio, Lincoln, etc) y en menor medida en muchos sitios de la pampa deprimida (Pila, Chascomus, etc) (Mapa de Suelos de la Pcia de Bs As, escala 1: 500.000, SAGyP – INTA, 1989). En todos los casos se desarrollan los suelos denominados “thapto” (discontinuidad litológica). En superficie pueden encontrarse los horizontes A AC de texturas mas gruesas, desarrollados sobre la Fm Médano Invasor, y debajo 2Bt con o sin subdivisiones, 2BC y rara vez C dado que se encuentra con frecuencia la superficie freática, desarrollados en la Formación Pampeana (loess propiamente dicho).

3) Indicar las **propiedades limitantes que son factibles de modificar** en términos técnicos, económicos y sociales, y **cuáles no sería posible** indicando las razones en todos los casos.

4) Indicar **las potencialidades** para la producción de un cultivo o pastura, estableciendo su aptitud de uso posible.

5) Indicar **riesgos de degradaciones,** físicas, físico-químicas, y químicas. Considere las propiedades principales y asociadas y como estas podrían modificarse conforme a las limitantes e intervenciones que no las consideren.

6) Enunciar en forma sintética y basada en lo estudiado en el curso de Edafología, cuales serian las **principales acciones a realizar a fin de preservar y/o mejorar** las condiciones descriptas en el suelo estudiado.

7) Relea el objetivo de la Interpretación de suelos a fin de efectuar intervenciones en el paisaje que se comenta al inicio de esta guía y cerciórese que efectivamente pudo alcanzarlo en su trabajo de interpretación.

Nota*: efectué la interpretación edáfica tomando de base lo precedentemente indicado en forma sintética y enunciativa. Utilice lenguaje técnico en tercera persona (voz pasiva), Por ejemplo, se observa. No utilice expresiones autorreferenciales, por ejemplo "observo". Procure realizar una redacción lo más objetiva posible con los elementos que dispone.*

Bibliografía

Alconada M, F Damiano.2017. Caracterización de suelos y del agua subterránea para definir intervenciones sustentables. Seminario Pedogénesis y cartografía de suelos como herramientas para la planificación sustentable en XX Congreso Geológico Argentino.

Alconada Magliano M.M., J.R. Fagundo-Castillo, J.J. Carrillo-Rivera, y P.G. Hernández. 2011. Origin of flooding water through hydrogeochemical identification, the Buenos Aires plain, Argentina. Environmental Earth Sciences. Vol 64, No 1, pp 57-71. http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-010-0817-7#page-2

Alconada M, J.W.Lanfranco, A. Pellegrini. 2017. Libro de Cátedra "*Suelo en el Paisaje*' Aula Virtual.Edafologia. F Cs Ag y Fs, UNLP.

Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José. Oficina de Publicaciones UCR.

Bienes, R., Nieves, M, Rodriguez, C.,Moscoso, J., and del Olmo, A. 1994. Soilovercrustingindexmap of the Madrid community. XV International CongressScience of Soil. Mexico. 5b: 58-59.

Bohn, H.L., B.L. McNeal y G.A. O Connor. 1993. Química de Suelos. Ed.Limusa.

Cadahia López, C. 1998. Fertirrigación.Cultivos hortícolas y ornamentales. Ed. Mundi Pr. 475p.

Castañon Lion, G. 1991. Riego por aspersión. Ed Mundi-Prensa 199 p.

Ciampiti y García, F. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios en cereales, oleaginosos e Industriales. http://lacs.ipni.net/article/LACS-1081

Ciampiti y García, F. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios hortalizas, frutales y forrajeras http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$FILE/AA%2012.pdf

Conti, M. 1986. Guías de Curso de Magister Sciencie en Cs del Suelo.

Darronsoro, C. Universidad de Granada. http://edafologia.ugr.es

Darwich, N.A. 1998. 2006. Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes.1º y 3ºed. FERTILIZAR. 289p.

Domínguez Vivancos, A. 1989.Tratado de fertilización. Ediciones Mundi-Prensa. España. 601p.

FAO. 1971. El drenaje de los suelos pesados. Riego y Drenaje 6. 114p.

Gaucher, G. y M. Barbut. 1971. El suelo y sus características agronómicas. Colección de agricultura EditorOmega. 647p.

Guías de Trabajos Prácticos, varias, en Aula Virtual. Edafología, F Cs Ag y Fs, UNLP.

Fernández P.C., Luque J.A., Paoloni J.D. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseños de riego en el Valle Inferior del Río Colorado. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Argentina. N^{o} 29.

Malavolta, E.; G.C.Vitti y S.A. De Oliveira. 1989. Avaliacao do estado nutricional proncipios e aplicacoes. Editora Gráfica NAGY ltda. 201p.

Page AL, Miller RH, Keeney DR. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical Properties Second Editions. Madison, Wisconsin, USA, 1982

Porta, J., M.López-Acevedo y C. Roquero. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. 807pág.

Tóth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero, Instituto Tec. GeoMinero España, 8:49-26.

Velasco Molina, H.A. 1983. Uso y manejo del suelo. Ed. Limusa. México D.F.