

Suelo en el paisaje

PARTE II

Condiciones de abastecimiento

Margarita M. Alconada Magliano
y Jorge W. Lanfranco

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES


EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

SUELO EN EL PAISAJE

PARTE II CONDICIONES DE ABASTECIMIENTO

Margarita M. Alconada Magliano
Jorge W. Lanfranco

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



A los alumnos de Edafología

Índice

Presentación	8
---------------------	----------

Margarita M Alconada Magliano

Capítulo 1

Conceptos de la fertilidad edáfica, dotación y abastecimiento	9
---	---

Margarita M Alconada Magliano

1.1 Dotación y abastecimiento	9
1.1.1 Síntesis de conceptos presentados en Parte I (Suelo en el paisaje)	9
1.1.2 Definiciones de las principales propiedades fisicoquímicas y físicas que definen el abastecimiento	12
Bibliografía	15

Capítulo 2

Reacción del suelo. Acidez	16
----------------------------	----

Margarita M Alconada Magliano

2.1 Introducción. Definiciones	16
2.1.1 Reacción del suelo, Acidez del suelo, pH del suelo	16
2.1.2 Acido-base	17
2.1.3 Teoría del hidrógeno y del aluminio	18
2.2 Origen de la acidez y basicidad del suelo	19
2.2.1 Fuentes que modifican el pH de la solución edáfica	19
2.2.2 Relaciones pH, meteorización y pedogénesis de materiales originales	22
2.2.3 Acidificación proveniente de Arcillas y Óxidos de Fe y Al	26
2.2.3.1 Rotura de bordes	26
2.2.3.2 Hidrolisis de Al y especiaciones de formas solubles	27
2.2.4 Acidificación proveniente de la Materia orgánica	30
2.2.5 Balance de cargas en la nutrición. Respiración y exudados de la biota	32
2.2.6 Fertilizantes de carácter ácido y básico, y enmiendas inorgánicas	33
2.2.7 Enmiendas orgánicas	36

2.2.8	Procesos de transporte, lavado y extracción de cationes básicos	39
2.2.9	Drenaje del suelo	45
2.2.10	Deposición de contaminantes atmosféricos	46
2.2.11	Agua de riego	47
2.3	Poder regulador de los suelos	47
2.4	Formas de medir la reacción del suelo	49
2.4.1	Métodos colorimétricos	49
2.4.2	Métodos potenciométricos	50
2.4.3	Interpretación del pH	56
2.5	Influencia del pH en el suelo y en la planta	56
2.5.1	Efectos directos sobre la nutrición de los cultivos	56
2.5.2	Efectos indirectos del pH sobre la nutrición	60
2.6	Suelos ácidos. Ejemplos	61
	Bibliografía	70

Capítulo 3

Suelos salinos y sódicos	74
--------------------------	----

Margarita M Alconada Magliano

3.1	Importancia de la salinización como proceso natural y antrópico en la sustentabilidad de ecosistemas	74
3.2	Suelos afectados por sales	77
3.3	Enfoque de estudio de suelos con sales	78
3.3.1	Enfoque Agrofisiológico	78
3.3.2	Enfoque pedogenético. Relaciones Na-CE	79
3.4	Sodificación – Alcalinización	81
3.5	Principales tipos de suelos afectados por sales	81
3.5.1	Suelos salinos	82
3.5.2	Suelos sódicos	84
3.5.2.1	Suelos sódicos sin formación de horizonte B	87
3.5.2.2	Suelos sódicos con formación de horizonte B	87
3.5.3	Suelos salino - sódicos	90
3.6	Origen de las sales	91
3.6.1	Factores que inciden en la formación de los suelos salinos y sódicos	91
3.6.2	Ciclos de Salinización Ciclos continentales. Ciclos marinos. Ciclos deltaicos. Ciclos artesianos. Ciclos antropogénicos	91
3.6.3	Sistemas de flujos de agua subterránea como integrador de elementos del paisaje. Aporte de sales a los suelos	95
3.6.3.1	Explicación de los sistemas de flujo y origen de las sales	97

3.6.3.2	Ejemplos de aplicación de la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea: Cuba y Argentina	98
3.7	Principales tipos de sales	100
3.7.1	Solubilidad de las sales y migración	100
3.7.2	Factores que condicionan la solubilidad de las sales	101
3.7.2.1	Temperatura	101
3.7.2.2	Presencia de otros iones (efecto de ión común)	101
3.7.2.3	Contenido de agua	102
3.7.3	Características principales de las sales más frecuentes en suelos:	
	Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Nitratos, Boratos	103
3.8	Consecuencias de la salinidad y sodicidad en las plantas	106
3.8.1	Efectos sobre el crecimiento, desarrollo y rendimientos	106
3.8.2	Causas por las cuales se afecta el crecimiento, desarrollo y rendimiento	110
3.9	Efecto de las sales sobre el suelo	112
3.9.1	Efecto sobre las propiedades hidrofísicas. Régimen de humedad extrema	112
3.9.2	Reversibilidad de los efectos según tipo de arcilla y contenido de limo	113
3.9.3	Proceso de formación natural y antrópico de suelos sódicos	117
3.10	Suelos afectados con sales en la Argentina: Ejemplos por procesos naturales y antrópicos	122
3.11	Determinaciones analíticas en suelos afectados por sales	131
	Bibliografía	137

Capítulo 4

Dinámica de las fases del suelo.	144
----------------------------------	-----

Jorge Washington Lanfranco

4.1.	Los componentes y propiedades	144
4.1.1.	Elección de propiedades físicas para elaborar diagnósticos de abastecimiento	145
4.1.2	Afectaciones en el abastecimiento	146
4.2.	Fase sólida	147
4.3.	Fase gaseosa. Aire en el suelo	149
4.3.1.	Incidencia sobre el abastecimiento	149
4.3.2.	Mecanismos de intercambio de gases en el suelo	150
4.3.3.	Efectos de la aireación sobre el abastecimiento	151
4.4.	Fase líquida. El agua en el suelo	152
4.4.1.	Contenido de agua del suelo	154
4.4.2.	Potencial del agua del suelo (Ψ_t)	156
4.4.3.	Histéresis	162
4.4.4.	Movimiento del agua en el suelo	163

4.5. Temperatura en el suelo	165
Bibliografía	167

Capítulo 5

Diagnóstico y estudio de la fertilidad edáfica	169
--	-----

Margarita M Alconada Magliano

5.1 Objetivo, importancia e integración del estudio del suelo con otras disciplinas	169
5.2 Procedimiento de interpretación del suelo en el paisaje	171
5.2.1 Secuencia de análisis del perfil edáfico	172
5.2.1.1 Propiedades físicas, físico-químicas, químicas y biológicas del perfil edáfico	173
5.2.1.2 Propiedades asociadas a las propiedades principales, y posibles degradaciones	174
5.2.1.3 Funcionamiento del suelo local en lo regional (agua superficial y subterránea)	175
5.2.1.4 Valores de referencia de propiedades edáficas primarias y asociadas	180
5.2.1.5 Origen de limitantes y potencialidades	181
5.2.2 Etapas de estudio del paisaje para definir aptitud de uso e intervenciones	183
Bibliografía	193

Los autor/es	197
--------------	-----

Presentación

Margarita Alconada Magliano

*Este libro propone el estudio del suelo como un
elemento del paisaje local y regional, como base para
comprender su funcionamiento y las posibilidades de
intervención
y manejo sustentable*

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO

SUELO EN EL PAISAJE

Este libro junto con el denominado **Suelo en el Paisaje: Parte I Dotación**, desarrollan los diferentes aspectos a considerar a fin de evaluar la **fertilidad edáfica** y planificar intervenciones sustentables. En ambos volúmenes se dan aspectos teóricos y prácticos que intentan transmitir el objetivo general que es *“la comprensión del suelo en el paisaje”*. El suelo se vincula con la vegetación, geomorfología, sistemas de flujo de agua subterránea y con el hombre. Estas relaciones entre elementos del paisaje local deben también ser analizadas en el contexto regional debido a que el suelo resulta de factores formadores locales y regionales, actuales y pasados.

Se requiere entonces una *perspectiva dinámica en el estudio del suelo*, definiendo su funcionamiento a fin de prever los *cambios posibles frente a diferentes escenarios naturales o intervenciones del hombre*. Normalmente el suelo es descripto en un perfil modal en sus propiedades morfológicas y analíticas, y si bien se incluyen otras variables y elementos del paisaje, tal como posición topográfica, materiales originales, suelos asociados, entre otros, en general se interpreta de forma estática para el momento en que fue estudiado, y no se analiza de modo de inferir como dicho suelo funciona y es causa-efecto del resto de elementos del ambiente local y regional. Esto tiene su origen en que *no se incluye ni se considera al agua subterránea en los estudios del suelo a fin de definir aptitudes, y manejos agropecuarios y forestales*. Si bien esto a priori podría considerarse costoso, no es así. Se propone, al menos en esta instancia, incluir un *enfoque hidrológico de análisis* a partir de la información existente del suelo, suelos asociados, y otros elementos del paisaje. *Se aspira para el futuro* que esta perspectiva de estudio sistémica y dinámica del suelo sea el procedimiento de rutina para decidir aptitudes, limitantes, posibilidades de uso e intervención del paisaje. Algunos de estos aspectos aquí se analizan.

CAPÍTULO 1

Conceptos de la fertilidad edáfica, dotación y abastecimiento

Margarita Alconada Magliano

El presente capítulo incluye una síntesis de algunos conceptos dados en la Parte I de Suelo en el paisaje: Condiciones de dotación (Capítulos 1 y 2) que son base y complemento de los aspectos que se analizan con mayor detalle en el presente libro relativos al abastecimiento.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO

SUELO EN EL PAISAJE

1.1 Dotación y abastecimiento

1.1.1 Síntesis de conceptos presentados en Parte I (Suelo en el paisaje)

En la primera parte del presente libro *Suelo en el paisaje. Condiciones de dotación*, se incluyen en los Capítulos 1 y 2, diferentes conceptos y ejemplos que permiten dar las bases para el estudio del suelo a fin de decidir intervenciones sustentables desde la perspectiva sistémica y dinámica que en el presente libro se propone.

En el Capítulo 1 sobre “*El suelo en el paisaje*”, se describen conceptos generales y relevantes para definir la *Fertilidad de suelo* desde una perspectiva de paisaje, siendo este la unidad de estudio (punto 1.1.1.). El paisaje resulta de la interrelación de factores naturales y antrópicos, abarca un mosaico de ecosistemas y sistemas productivos, dinámicos en su funcionamiento y vinculados entre sí, siendo el agua subterránea el elemento integrador del resto de elementos del paisaje. Las características locales de un ambiente son causa-efecto del contexto regional (punto 1.1.2) (Alconada *et al.*, 2018).

Se analizan con ejemplos de diferentes regiones del país y de otros países, la importancia de los estudios de suelos desde esta perspectiva, partiendo de establecer el origen de las propiedades edáficas (punto 1.1.3 sobre Factores formadores del suelo como base de interpretación de su funcionamiento). Asimismo, se describen los principales conceptos relativos a la calidad del suelo (punto 1.1.4) y el enfoque hidrológico de su estudio (descripto en punto 1.1.3)

con ejemplos de diferentes ambientes de la Pradera Pampeana; Cuenca sedimentaria Chaco-Paranaense (Chaco) y Cuenca del río Chubut (Chubut) (punto 1.1.4.2).

En el Capítulo 2 de la Parte 1, denominado “*Conceptos generales de la fertilidad edáfica*”, se incluye los conceptos del suelo, perfil, profundidad efectiva y productividad del suelo (punto 1.2.1) y los de dotación y abastecimiento (punto 1.2.2) (Alconada *et al.*, 2018).

En este Capítulo, se presenta una síntesis de algunos conceptos desarrollados detalladamente en Parte 1, de modo de facilitar la lectura de lo que específicamente aquí se analiza que es lo relativo al **abastecimiento**. Se recomienda que cada tema sea consultado en Parte 1.

Conceptos de suelo, perfil, profundidad efectiva y productividad_. El **suelo** fue definido desde diferentes perspectivas, en esta instancia se hace hincapié a aquella definición que mejor permite entender la dinámica del suelo “*cuerpo natural con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles*” (Porta *et al.*, 1994). Así si se combinan los factores formadores de una manera dada, se prevé que se reconocerán determinadas características en el suelo “*distintivas*” que resultan “*previsibles*”, pudiendo esta combinación de factores “*repetirse*” y dar suelos análogos. Las propiedades del suelo resultan de los procesos edafogénicos que se producen por la interacción de los factores formadores que pueden haberse dado por:

i) condiciones *pasadas o presentes*, ii) derivar de una *posición* en el paisaje *local o regional* y/o iii) a condiciones *naturales o antrópicas*.

Estas propiedades que resultan de procesos edafogénicos son analizadas en cortes verticales del terreno denominados **perfiles edáficos**. En estos se reconocen horizontes (con procesos) y/o capas (sin procesos) hasta una profundidad variable, dependiendo de la naturaleza de los suelos y la finalidad de estudio. El límite inferior del suelo es la profundidad a partir de la cual las características son constantes con independencia de la distancia a la superficie, o presentan secuencia de carácter estratigráfico (Porta *et al.*, 1994). En general se estudian hasta 1 a 2 m (en volumen no menos de 1-1,5 m³), donde puede encontrarse el material original u horizonte C, escasamente explorado por las raíces, o hasta alguna impedancia mecánica tal como tosca, piedra, agua freática. La **profundidad efectiva** es aquella hasta la cual las raíces pueden desarrollarse, pudiendo estar limitada por la presencia de capas u horizontes subsuperficiales tales como *fragipán*, *duripán*, *petrocálcico*, *petrogypsico*, *plintita*, *contacto lítico*, elevado contenido de arcilla (*claypan*), salinidad, alcalinidad, superficie freáticas cercanas. La **productividad del suelo** es la capacidad del mismo para producir una planta específica bajo un determinado sistema de manejo, características del suelo, subsuelo, agua subterránea, y clima.

Dotación y abastecimiento_. La fertilidad de un suelo está definida por 2 parámetros principales, dotación (propiedades químicas) y abastecimiento (propiedades físicas y físico-químicas). Estos parámetros se encuentran estrechamente vinculados y si bien, cada uno debe ser analizado en forma individual, resulta imprescindible establecer sus relaciones en el paisaje a fin de definir sus orígenes (aptitudes y limitantes) y prever las consecuencias del uso, manejo, o intervención.

Dotación_. Es la cantidad de nutriente que podría ser tomado por los cultivos en el corto, mediano y largo plazo. Es definido por tres factores: **Intensidad - Capacidad - Renovación.** Se mide por algún procedimiento estandarizado de laboratorio que con frecuencia resultan de los estudios de correlación y calibración (Havlin *et al.*, 1999), donde se establece que método representa más adecuadamente lo que la planta toma de la solución edáfica. Cada método extrae una fracción del elemento, dependiendo del objetivo se utilizan diferentes extractantes (agua, ácidos, álcalis, entre otros).

Intensidad: es la cantidad de nutriente disponible en el corto plazo. Puede ser de 2 tipos:

- *Intensidad absoluta*, es la cantidad del nutriente en el suelo medido por algún procedimiento de laboratorio que sólo extrae lo que es fácilmente tomado por la planta. Por ejemplo, valor absoluto de algún elemento soluble (NO_3^- , HPO_4^- ppm, mg.l^{-1}).

- *Intensidad relativa*, es la cantidad de un nutriente con respecto a otro. Se destacan las siguientes relaciones: N/P; Ca/Mg; K/P, K/Ca, con valores de referencia para los cultivos en general. No obstante algunas relaciones son específicas o adquieren particular importancia en determinados cultivos. En general en cultivos intensivos las relaciones nutritivas adquieren particular importancia al definir por ejemplo, calidad de fruta (Cadahia López, 2005).

Capacidad: es la reserva del nutriente en el suelo que puede estar disponible para la planta en el mediano a largo plazo. Por ejemplo, el elemento contenido en fracciones poco solubles de la materia orgánica o formando sales precipitadas o en minerales.

Renovación: es el proceso mediante el cual el factor capacidad se transforma en el factor intensidad. Si bien varía con el elemento, en general se asocia a las condiciones que promueven la mineralización de la materia orgánica, solubilización de precipitados, sales, y meteorización de minerales.

Ejemplo, en el nutriente Nitrógeno:

- *Intensidad:* cantidad de nitratos (NO_3^-) inmediatamente disponibles para la planta.
- *Capacidad:* cantidad de nitrógeno total (Nt) medido por Kjeldahl.
- *Renovación:* proceso de mineralización de la materia orgánica que contiene el Nt, que se transforma en NO_3^- . Todas las etapas desde mineralización hasta nitratación son realizadas por microorganismos que dependen de factores ambientales tales como temperatura, humedad, aireación, entre otros factores, que están asociados a las condiciones de abastecimiento. Así, puede ser que exista un alto contenido de materia orgánica pero un bajo contenido de NO_3^- inmediatamente disponible para las plantas.

En la parte 1 de Suelos en el paisaje (Alconada *et al.*, 2018) en Condiciones de Dotación, punto 2.2.1, se analizan las *Propiedades Químicas que definen la Dotación*, y en los Capítulos 4 y 5 se desarrolla con mayor detalle los principales macro y micronutrientes: N, P, S, K, Ca, Mg, Mo, Zn, Cl, Mn, B, Fe, y Cu.

Abastecimiento_. Condiciones del medio que posibilitan que un determinado nivel de nutriente medido en laboratorio (dotación) efectivamente esté disponible para las plantas. Si cambian las condiciones en el medio natural respecto de las condiciones estandarizadas del método de laboratorio, cambiará el valor de referencia indicado como suficiente. Las propiedades

del suelo que definen el abastecimiento son las que posibilitan que ocurran los procesos responsables de la transformación de las *reservas* del nutriente (capacidad) a formas asimilables por las plantas (intensidad). Por ejemplo, *materia orgánica se mineraliza a Nt esta se oxida a NH_4^+ y luego a NO_3^-* , en cada etapa participan bacterias con condiciones definidas y diferentes de desarrollo.

Las principales propiedades que determinan al abastecimiento son: **pH, salinidad, alcalinidad, y drenaje**. Estas propiedades inciden marcadamente en la *solubilidad de los nutrientes, movimiento del agua y aire* para la vegetación y biología edáfica. Con frecuencia las propiedades químicas han sido consideradas como las más íntimamente asociadas a la producción, sin embargo, son las propiedades físicas (estructura) la clave de la productividad (Baver *et al.*, 1972). La estructura se asocia directamente con las propiedades químicas y fisicoquímicas, aspectos que se comentan en punto siguiente y con mayor detalle en Capítulo 3.

1.1.2 Definiciones de las principales propiedades fisicoquímicas y físicas que definen el Abastecimiento

En la parte 1 de Suelo en el Paisaje, en el punto 2.2.2, se enuncian las principales variables fisicoquímicas y físicas que definen el abastecimiento (Alconada *et al.*, 2018). En Capítulo 2, 3 y 4, del presente libro, se analiza con detalle los aspectos relativos a la *reacción del suelo, salinidad, alcalinidad, y consecuencias en la circulación del agua, aire, y absorción de nutrientes*. En este punto se sintetizan y definen las variables principales del abastecimiento.

Propiedades fisicoquímicas_. Son las propiedades que derivan de las reacciones de superficie en la interfase suelo-solución edáfica, y son debidas a los *coloides* del suelo (arcillas, materia orgánica, sesquióxidos Fe y Al). En la Figura 1.1 se presenta 2 esquemas generales del intercambio iónico entre coloides y cationes, soluciones internas y externas, y en cada una de estas, las variables que se miden. En el esquema de la izquierda se presenta el suelo floculado (A) y en el de la derecha dispersado (B). Se indican en cada caso los valores de referencia que pueden indicarse respecto al porcentaje de cationes en relación a la CIC (capacidad de intercambio catiónico). Todos estos temas se presentan con detalle en el Capítulo 2 (Reacción del suelo), y en Capítulo 3 (Salinidad y alcalinidad del presente libro).

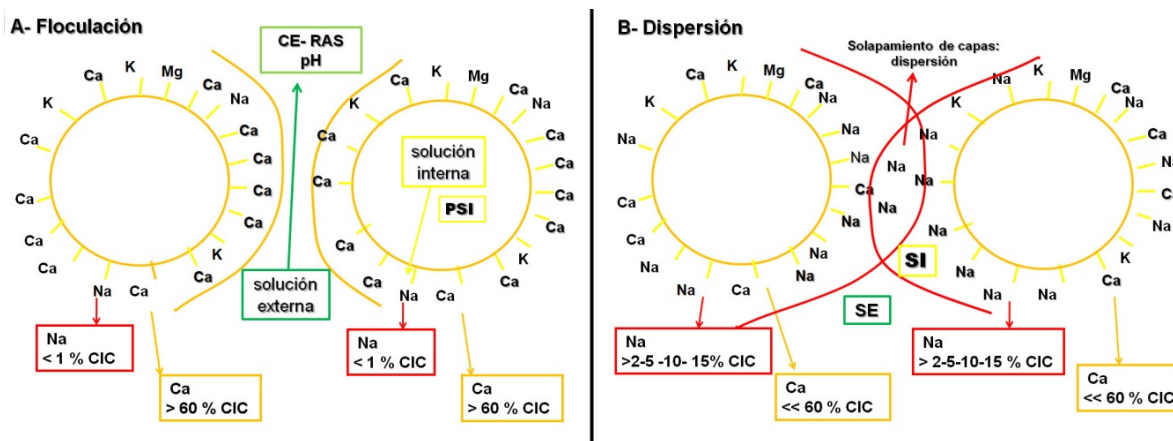


Figura 1.1. Esquemas generales del intercambio iónico entre coloides y cationes, soluciones internas y externas, variables que se miden: A- Flocculación B- Dispersión

Las principales propiedades que se indican en Figura 1.1 son:

- *pH*, mide la concentración de protones en una solución utilizando como extractante el agua destilada (diferentes proporciones suelo: agua) o una sal (KCl o $CaCl_2$) (Cap. 2).
- *Conductividad eléctrica (CE)*, mide sales solubles en agua, en diferentes relaciones suelo: agua aunque más frecuentemente en el extracto de suelo a saturación (Cap. 3).
- *RAS* (Relación de Adsorción Sodio), Na^+ soluble respecto a Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles (Cap.3).
- *PSI* (Porcentaje de Sodio Intercambiable), Na^+ intercambiable respecto a la CIC (capacidad de intercambio catiónico medido por $AcNH_4$, pH 7, 1N) (Cap. 3).

Propiedades físicas . Son las propiedades vinculadas a la organización de los componentes del suelo: fracción orgánica (materia orgánica, humus, microflora) e inorgánica (textura, cementantes). Las proporciones de los cationes presentes (principalmente Ca^{+2} y Na^+) determina la flocculación o dispersión (Figura 1.1), y asociado a esto la circulación del agua, aire y nutrición (Capítulo 4).

Pueden organizarse en dos grupos principales:

Propiedades físicas primarias: textura, estructura, porosidad, densidad real y aparente, color, profundidad y estratificación (secuencia de capas u horizontes).

Propiedades físicas secundarias: expansión, contracción, compactación, temperatura, capacidad de aire, capacidad de agua, capacidad soporte (aireación, almacenamiento de agua, drenaje, enraizamiento).

Las *propiedades físicas primarias* se relacionan entre sí, pudiéndose inferir propiedades a partir de estas (Porta *et al.*, 1994). Sin embargo, las relaciones son tendencias que pueden modificarse por como se presenta algún otro componente del suelo. Por ejemplo, texturas finas (elevado contenido de arcilla) tienden a dar estructuras en prismas y elevada porosidad total (aproximadamente 60%) con una elevada proporción de microporos. Si además, el contenido de materia orgánica es elevado la estructura puede ser bloques. Asimismo, todas estas estructuras pueden resultar masivas con elevado contenido de Na^+ y condiciones de hidromorfismo.

Las combinaciones son diversas, por lo cual debe interpretarse cada variable por separado e ir integrando el resto de propiedades que son las que definen la *circulación de fluidos del suelo* (*agua, aire, nutrientes, gases*), y se incluyen en las denominadas *propiedades “secundarias”* (Capítulo 4). En relación al funcionamiento de flujos, se destacan los *sistemas de flujo de agua subterránea* como integrador de elementos del paisaje, y en la comprensión del funcionamiento del paisaje, tema que fue parcialmente desarrollado en la Parte 1 de Suelo en el paisaje: en punto 1.2 sobre los sistemas de flujo de agua y en punto 2.2.5 ejemplos en la Argentina de relaciones suelo-agua-geomorfología-vegetación (Alconada *et al.*, 2018). Estos aspectos y ejemplos serán ampliados en el presente libro en el Capítulo 3.

Sobre los efectos en las **propiedades biológicas**, principalmente en las propiedades físicas, se analiza en detalle en el Capítulo 3 sobre *Materia orgánica del suelo* en Parte I del Suelo en el paisaje (Alconada *et al.*, 2018).

Bibliografía

- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. Universidad Central de Venezuela. Ed. Arauco. 390p. Recuperado de:
https://books.google.com.ar/books?id=rjeVU6XFajEC&pg=PA121&hl=es&source=gbbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false
- Alconada Magliano, M.M., Lanfranco J.W. y Pellegrini A.E. (2018). El suelo en el paisaje. Parte 1 Condiciones de dotación. La Plata: Edulp. Recuperado de:
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1>
- Alconada Magliano, M.M., Bussoni A., Rosa R. y Carrillo Rivera J.J. (2009). El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires. Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 68: 50-72. Recuperado de:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56912236005>.
- Cadahia López, C. (2005). *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. España: Ed, Mundi Prensa. 681p
- Havlin, J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L. and Nelson W.L. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers*. United States; Ed. Prentice Hall. 499p.
- Porta, J., López-Acevedo M. y Roquero C. (1994). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Madrid. España: Ed. Mundi Prensa. 804p.

CAPÍTULO 2

Reacción del suelo. Acidez

Margarita Alconada Magliano

Se desarrollan los conceptos teóricos básicos y aplicados requeridos para comprender el origen de la "Reacción del suelo", especialmente la "Acidez", y como debe ser abordada a fin de evitar una disminución de la productividad de los suelos por sus efectos en la nutrición de los cultivos. Se presentan ejemplos de suelos ácidos en la Argentina por causas naturales, y antrópicas.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO

SUELO EN EL PAISAJE

2.1 Introducción. Definiciones

El pH del suelo es una variable que incide marcadamente en la mayor parte de los procesos que ocurren en el suelo y en la biota. La elección de especies vegetales y su manejo debe partir de conocer el origen del pH y las posibilidades de modificarlo conforme su origen.

En este Capítulo se analiza el origen de la reacción del suelo, como se modifica por acciones naturales y antrópicas, y su influencia en los procesos edáficos y de la vegetación. Se dan también algunas referencias de interpretación para las diferentes técnicas de medición del pH.

Diferentes expresiones se utilizan a fin de establecer el origen del pH, y a que reacciones se asocia. En puntos siguientes se analizan los conceptos: Reacción del suelo, Acidez del suelo, pH del suelo; Acido-base y Teoría del H^+ y del Al^{+3} .

2.1.1 Reacción del suelo, Acidez del suelo, pH del suelo

Las expresiones "*pH*" y "*reacción del suelo*" son frecuentemente utilizadas como sinónimos. Sin embargo, resulta más apropiado indicar "*reacción del suelo*" ya que hace referencia a la existencia de un "*sistema*" que es la suma de diversos sistemas químicos que interaccionan, siendo la medida de "*pH*" el indicador indirecto de las reacciones que están ocurriendo.

La clasificación de la acidez del suelo en tres factores presentada por Zapata Hernández (2004) avalan la utilidad de distinguir entre pH y reacción del suelo. Los tres factores son: *Intensidad*, *Cantidad* y *Capacidad*. Este autor los define como a continuación se indica.

Factor Intensidad, está representado por el pH, que es la concentración de protones en la solución del suelo o en la suspensión suelo-agua-solución que se utilice para medirlo (punto 2.4). El pH se relaciona con la fuente de H^+ que lo origina, por lo cual se puede estimar que tipo de sustancia presente en el suelo puede ser responsable de dicho valor de pH.

Factor Cantidad, hace referencia a dichas fuentes, esto es, si prevalecen aquellas que tienen capacidad de neutralizar la acidez (CNA) o neutralizar la basicidad (CNB). Se define como la suma de las cantidades, fuentes de ácidos o de bases, que se miden por una titulación (punto 2.4). Esto explica porque dos suelos con igual pH tienen diferente contenido de Al^{+3} intercambiable, por ejemplo, pH 4.5, uno posee Al^{+3} intercambiable $0,5 \text{ cmol.kg}^{-1}$ y otro 3 cmol.kg^{-1} . Dos suelos pueden tener igual factor de intensidad, pero diferente factor cantidad, y factor capacidad.

Las fuentes que aportan los H^+ son diversas, pueden provenir de diferentes procesos complejos que actúan solos o en combinación con otros que se hallan interrelacionados (Sposito, 1981, en Zapata Hernández, 2004). Cada uno de estos procesos puede aportar H^+ a la solución con distinto grado de energía, el pH estará determinado por aquel de mayor fuerza, el de mayor *constante de acidez*. Sólo cuando esa fuente es neutralizada se podrán expresar las otras fuentes de menos fuerza de acidez.

Factor Capacidad, es la habilidad que tiene el suelo para resistir cambios al agregar ácidos o bases (poder buffer). Este factor depende del factor *Cantidad*, y varía según el factor *Intensidad*. Consecuentemente, la capacidad amortiguadora del suelo es definida por los contenidos y tipos de acidez; tipo y cantidad de arcillas; sales; materia orgánica; y del pH inicial del suelo. Asimismo, dos suelos pueden tener diferentes capacidades amortiguadoras a diferentes valores de pH (punto 2.3).

Consecuentemente, si otras variables del suelo se conocen, en *términos prácticos* resulta en general suficiente medir un valor de pH (*intensidad*) e inferir posibles procesos que estén sucediendo en el suelo. En algunos casos, tal como cuando se dan condiciones extremas de pH y se plantean prácticas de manejo que reviertan dichos extremos, resulta adecuado conocer además, los factores cantidad y capacidad.

2.1.2 Ácido - Base

A continuación, se sintetizan algunos conceptos desarrollados en los cursos de Química.

La comprensión del fenómeno de la reacción del suelo, es decir su carácter ácido, básico o neutro, requiere del conocimiento de los *conceptos ácido y base*:

En *sistemas acuosos* un **ácido** es una sustancia que dona H^+ a otra sustancia que es una base (acepta H^+). Ejemplo ácido: HCl cede protones al agua y forma ión hidronio u oxonio: H_3O^+ (protón hidratado). $HCl + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + Cl^-$

Una **base** es aquella sustancia que al disociarse recibe H^+ del agua (que actúa como ácido), y origina ion hidróxido. Ejemplo base: $NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + OH^-$

Al mezclarse un ácido con agua se ioniza en H^+ y *aniones acompañantes*. Los iones H^+ o **acidez activa** se incrementan con la fuerza del ácido. Un ácido es tanto más fuerte cuanto mayor es su capacidad de ceder protones. La acidez que no se disocia es la **acidez potencial**. Por ejemplo, si la acidez activa es de 0,099 M y la pasiva de 0,001 M, la acidez total será 0,100 M. Dado que la actividad del H^+ es casi igual a la **actividad total**, este es un **ácido fuerte**, tal como el **ácido clorhídrico**, en el cual la disociación de protones es del 100 %: $HCl \longrightarrow Cl^- + H^+$

Por el contrario, en un **ácido débil** la actividad de H^+ (acidez activa) es mucho menor que la acidez potencial. Por ejemplo, un ácido débil en una concentración de 0,100 M donde sólo 1 % se disocia la actividad de H^+ es de sólo $0,1 * 0,01 = 0,001$, tal como ocurre con el **ácido acético**, donde sólo un 1 % de H^+ se disocian: $CH_3COOH \longrightarrow CH_3COO^- + H^+$

El **agua pura** tiene una suave ionización: $H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$, consecuentemente al producir H^+ y OH^- es un ácido débil y una base débil. Se amplía sobre la *hidrolisis de sales* en punto 2.4 de esta presentación (pH hidrolítico).

2.1.3 Teoría del hidrógeno y del aluminio

Antiguamente se asociaba a los “*suelos ácidos*” como aquellos que contenían un elevado porcentaje de iones H^+ en las sedes de intercambio, y se consideraba al *suelo como un ácido débil*. Bradfield (1923 en Porta *et al.*, 1994) formula la *teoría del hidrógeno o de las arcillas como ácidos débiles*. Posteriormente, diversos autores concluyen que esta hipótesis es falsa (Porta *et al.*, 1994). El **H^+ intercambiable** no es el que prevalece, sólo está presente en suelos con **pH inferior a 4** (suelos *sulfato ácidos*, tales como los provenientes de llanuras aluviales de origen marino) (Bohn *et al.*, 1993). Chernov (1947 en Bohn *et al.*, 1993), encuentra que los minerales saturados de hidrógeno eran altamente inestables y se alteraban rápidamente, liberando Al^{+3} , Mg^{+3} , y Fe^{+3} del interior de sus estructuras cristalinas. Asimismo, este autor señala que la mayoría de los minerales se saturan en primer lugar con iones trivalentes, como el Al^{+3} y el Fe^{+3} , y luego con el H^+ .

Actualmente si bien persiste parcialmente aquel **enfoque inicial de las arcillas- H^+** , ha sido *sustituida por la teoría del aluminio* (Porta *et al.*, 1994). Se destacan los trabajos de Jenny, Coleman y otros, en la década del 50 (Bohn *et al.*, 1993) apoyando esta última teoría, quienes demuestran que las propiedades de ácidos débiles, atribuidas a las arcillas hidrogenadas, eran en realidad *el resultado de una saturación parcial o completa de los sitios de intercambio con iones Al^{+3} hidratados débilmente ácidos, estos son los que liberan H^+* , incidiendo en el pH, y a

su vez, depende de dicho pH para continuar en uno u otro sentido en las reacciones que se originan, tal como se explica en punto 2.2.3.2.

Consecuentemente, los suelos minerales ácidos no son simplemente **suelos- H_3O^+** , sino esencialmente **suelos- Al^{+3}** y son las especies del Al^{+3} las que liberan más o menos H^+ dependiendo de las condiciones del medio (Porta *et al.*, 1994).

En síntesis, el comportamiento químico de los materiales ácidos se encuentra íntimamente ligado con las propiedades del **Al^{+3} en solución y en el intercambiable**, siendo la medición del **pH**, una medida que permite un *diagnóstico rápido* de los efectos potencialmente perjudiciales de la acidez al medio en la relación suelo-planta, aunque **no describe las causas ni el origen de la reacción que condujo a la presencia de H^+ en solución** (Wild, 1992; Bohn *et al.*, 1993). Consecuentemente, se mide una concentración de H^+ en solución que define la acidez del medio, pero estos H^+ son producto de diversas **reacciones** en el suelo, que se vinculan en el extremo de la acidez a las especies de Al^{+3} y Fe^{+3} presentes.

En cada valor de pH, habrá en el suelo una determinada especie de Al^{+3} y una diferente contribución al Al^{+3} soluble total, siendo mínima su presencia a pH 7 (Bohn *et al.*, 1993). Este tema se amplía en punto 2.2.3.2.

2.2 Origen de la acidez y basicidad del suelo

2.2.1 Fuentes que modifican el pH de la solución edáfica

La concentración de H^+ en la solución edáfica depende de diferentes procesos complejos e interrelacionados que se producen a partir de diferentes fuentes (Figura 2.1, adaptada de Zapata Hernández, 2004). En la Figura 2.1, se consigna: i) **contaminación local**, es la derivada de aportes tales como abonos, fertilizantes; ii) **contaminación difusa**, son los ácidos transportados por el aire y llevados al suelo por la lluvia; iii) **procesos de interflujos**, son los movimientos laterales de la solución edáfica entre paisajes con diferentes alturas (flujos de agua subterránea); iv) **materia orgánica**, es la producida a través de su descomposición y transformación; v) **meteorización** de minerales primarios contenidos en las rocas y los minerales secundarios (punto 2.2.2) ; vi) hidrólisis del CO_2 , vii) hidrólisis de los **hidroxipolímeros de Fe y Al** (punto 2.2.3.2), a través de los procesos de hidrólisis; y viii) **absorción de nutrientes** por las plantas.

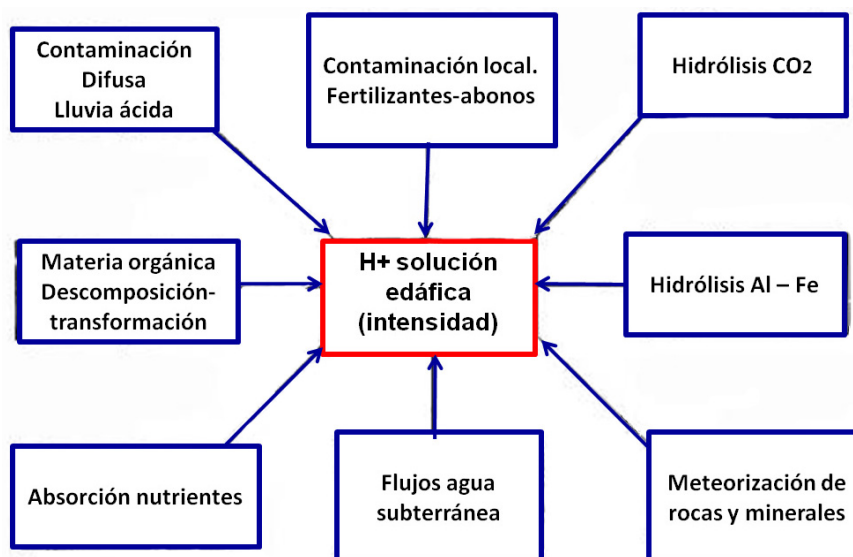


Figura 2.1 Fuentes que definen el factor Intensidad (pH, concentración de H^+) (adaptada de Zapata Hernández, 2004)

Cada uno de estos procesos puede aportar H^+ a la solución con distinto grado de energía. El pH estará determinado por aquel proceso que tenga **mayor fuerza, mayor constante de acidez**. Cuando esas fuentes son neutralizadas podrán expresarse otras fuentes con menor fuerza de acidez (punto 2.1.2). En la Figura 2.2 se presenta la *curva de titulación de un suelo* en los rangos de pH donde están presentes las **diferentes fuentes** que determinan el nivel de energía del protón y por lo tanto el pH del suelo (adaptada de Zapata Hernández, 2004).

Los equilibrios y procesos responsables de la concentración de H^+ en el suelo son los que resultan de los **ácidos fuertes** (S^{2-} - SO_4^{2-} , *lluvia ácida*), **hidrólisis del Al^{+3}** , **equilibrio CO_2 - H_2O** , y **disociación de grupos ácidos de la materia orgánica**. Al ir neutralizándose las diversas fuentes en la curva de titulación, se irán produciendo *puntos de inflexión* que corresponden a la neutralización de un *protón* característico de cada fuente. Los ácidos de mayor nivel de energía de protón, con mayor constante de acidez, presentan un cambio de inflexión a pH más bajos.

Diversos autores (Fassbender, 1975; Wild, 1992; Bohn *et al.*, 1993; Porta *et al.*, 1994; Adam, 1995; Zapata Hernández, 2004; Jaramillo, 2002, entre otros), analizan los diferentes procesos que suceden en los suelos y que son fuente de variadas concentraciones de H^+ u OH^- en la solución edáfica.

En la Figura 2.2 se indican las principales fuentes y pH en las cuales dichas fuentes predominan. Los pH más bajos se generan por la presencia de **ácidos fuertes**, naturales o por contaminación, llegando hasta pH 4,2. Esta concentración tan alta de H^+ disuelve parcialmente las arcillas en horas, libera Al^{+3} y $Si(OH)_4$. Si es continuo el aporte de ácido libre, el pH puede bajar a 3 y ser altamente tóxicos en Al^{+3} . Esto es el caso de los **suelos sulfato ácidos**, con formación de S^{2-} y con salinidad debido a que suelen darse en ambientes marinos. La hidrólisis de gases producto de la combustión de fósiles que contamina la atmósfera acidifica también la lluvia a pH menores a 5.5 (ciclo del S en parte 1, Alconada *et al.*, 2018).

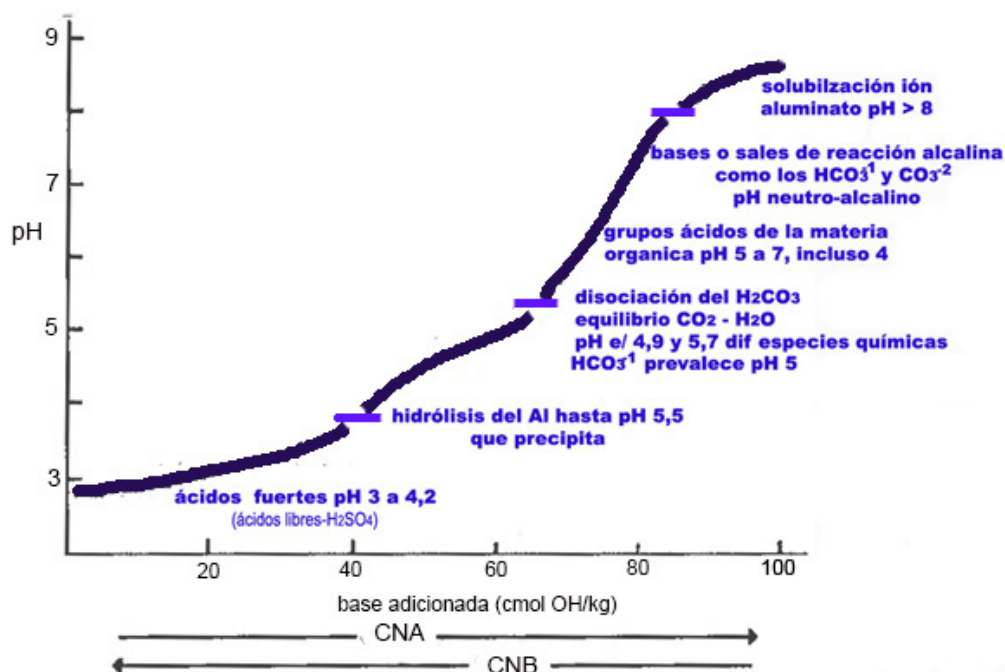


Figura 2.2 Curva de titulación de un suelo a los rangos de pH donde están presentes las diferentes fuentes (modificada de Zapata Hernández, 2004)

CNA Capacidad neutralización ácida- CNB básica

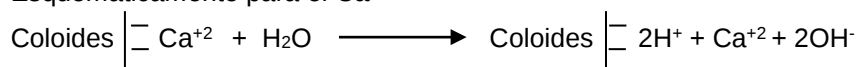
Valores de pH algo mayores se generan cuando se **hidroliza el Al^{+3}** en solución (punto 2.2.3.2), mientras que la **disociación del H_2CO_3** genera un pH un poco mayor y queda definido por el equilibrio **$CO_2 - H_2O$** . En relación a esto último, se destaca que cuando en el suelo no existe una fuente de acidez más fuerte que el **H_2CO_3** , este determinará el pH y estará definido por su presión parcial (concentración) (pH entre 4,9 y 5,7). Sin embargo, cuando se disuelve CO_2 en agua se genera un número variados de especies químicas: **CO_2 gaseoso, CO_2 acuoso, H_2CO_3 , HCO_3^{-1} , CO_3^{-2} , H^+** , que participan en los procesos de **hidrólisis y disolución de los minerales** e incide de manera diferente en el pH del suelo. El ion HCO_3^{-1} prevalece principalmente en pH 5. Los pH neutros y alcalinos son debidos a fuentes de acidez muy débil o la presencia de **bases o sales de reacción alcalina** como los HCO_3^{-} y CO_3^{-2} .

Los **grupos ácidos de la materia orgánica** son una fuente que aporta H^+ con muy variada energía, algunos grupos pueden producir **pH menores de 4** y por la **polimerización** en el humus hace que la fuerza de acidez disminuya, y **eleva el pH** (punto 2.2.4). Los grupos ácidos totales de las sustancias húmicas sumando $-COOH$ y $-OH$ de los ácidos húmicos y fúlvicos, pueden llegar a concentraciones que generan una fuerza que se disocia en un rango de pH entre 5 y 7 (Figura 2.2).

En el suelo funcionan como **fuentes de alcalinidad** aquellas sustancias que al reaccionar con el agua dan origen a iones hidróxilos (OH^-). Los elementos alcalinos y alcalino-térreos como el K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+} tienden a elevar el pH al generar OH^- proveniente de la hidrólisis de sus bases. Los cationes acidificantes son reemplazados y/o se presentan en sus formas insolubles. En el caso particular del **Na^+** estos incrementos pueden elevar el **pH a valores próxi-**

mos a 10 (punto 2.2.2 y en Capítulo 3). Esto se produce como consecuencia del equilibrio que existe entre el complejo de cambio y la solución edáfica.

Esquemáticamente para el Ca^{+2} :



Nota: H^+ se encuentran unidos al complejo de intercambio conforme se explicó en punto 2.1.3.

Cuanto mayor es la participación de los elementos alcalinos y alcalino-térreos en el complejo de cambio mayor será el pH del suelo, el valor que este alcance dependerá del catión interviniente, siendo mayor con Na^+ que con Ca^{+2} (Fassbender, 1975). Sin embargo, el anión acompañante de las sales presentes en el suelo determina el extremo de alcalinidad alcanzada. Así por ejemplo, si las sales de sodio son a base de Cl^- no desarrollan pH tan alcalinos como sucede con los CO_3^{2-} (punto 2.4, Tabla 2.12).

Respecto a las **fuentes de acidez**, Jackson (1963), Adams (1995), analizan la necesidad de establecer el origen de la acidez a fin de decidir la enmienda química a utilizar. En los **suelos sulfato ácidos** con pH menor 4,2, debido a que las fuentes son **ácidos fuertes** (ácidos libres y H_2SO_4), *el encalado* no genera un aumento del pH, resultando más adecuado lavar e inundar el suelo. Por el contrario, *resulta adecuado agregar enmiendas cálcicas* en los casos donde la fuente de acidez proviene de **ácidos débiles** (Al intercambiable, grupo carboxilo de la materia orgánica, pH 4,2 a 5,2), y **ácidos muy débiles** (COOH , Al polimérico, grupo fenólico, y H_2CO_3 , pH 5 a 7) (Molina, 1998; Espinosa y Molina, 1999).

2.2.2 Relaciones pH, meteorización y pedogénesis de materiales originales

Las reacciones que ocurren en el suelo resultan de todos los factores formadores, sin embargo, alguno de estos puede prevalecer en las características del suelo. En relación al material original es variable la tendencia a la acidez o alcalinidad que generan, dependiendo no sólo de la composición mineralógica sino también, de su alterabilidad, del clima, y condiciones del medio tal como la aireación y el contenido de materia orgánica.

La *meteorización* se produce porque los minerales que constituyen la roca dejan de ser estables en la corteza terrestre al cambiar las condiciones bajo las cuales se formaron, transformándose *las rocas más duras a materiales más porosos y livianos*, que en conjunto se denomina **saprolito**, con una composición química y mineralógica notablemente modificada respecto a la roca original, siendo estos cambios mucho menos marcados en rocas sedimentarias (Lanfranco *et al.*, 2014).

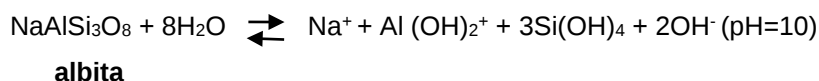
Peinemann (1998) señala que en el material original el pH inicial es producto de los cationes presentes, y a medida que son liberados durante la meteorización, en función del clima, la

edad, y otros factores formadores, el pH en general disminuye. Sin embargo, es posible también que el pH aumente, dependiendo del momento en que se encuentra el proceso pedogénico y del tipo de roca, composición y origen.

Meteorización química _ Zapata Hernández (2004) señala que la *acidificación* se produce durante la pedogénesis por meteorización química, con pérdida de cationes alcalinos y alcalino-térreos (K, Ca, Mg, Na), e incremento asociado de cationes metálicos (Al, Fe, y Mn) que pueden tener hidrólisis ácida. Simultáneamente se produce la salida de Si^{+4} como $\text{Si}(\text{OH})_4$. Esto puede llevar al suelo a un pH de 4,2 e incluso más ácido cuando se drenan suelos que contienen formas reducidas de S o por descomposición de restos orgánicos por producción de ácidos orgánicos de cadenas cortas.

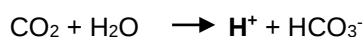
La alteración se produce por iones H^+ (H_3O^+) provenientes de ácidos o del agua que penetran en la estructura iónica de los minerales, descompensando su neutralidad eléctrica. Este desequilibrio tiende a compensarse a través de la liberación de iones retenidos con menor fuerza que el H^+ , conduciendo inicialmente a la expansión de la red cristalina y por último a su colapso.

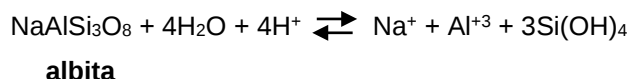
Así, el agua puede disolver por ejemplo un mineral *feldespatos como la albita*, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, y los iones y moléculas pasan a la solución edáfica. El proceso de disolución continúa si es que se empobrece la solución de los iones liberados debido a que precipitan para formar otros minerales, denominándose esto *reacción incongruente*, o son lavados de la solución siendo entonces la *reacción de tipo congruente*. En las reacciones *incongruentes*, se forman dos fases, una sólida diferente a la original, y otras que entran en solución (algunos carbonatos de Mg, y silicatos complejos), y en las reacciones *congruentes* el mineral se disocia y entra en disolución sin formar otras fases (ClNa, calcita, sales solubles, algunos silicatos simples) (Fagundo, 1990). En la hidrólisis del feldespato se alcaliniza el medio, si es un feldespato sódico (albita) el pH es 10 y si es potásico el pH es 9. La albita tiene reacción congruente y finaliza su disolución:



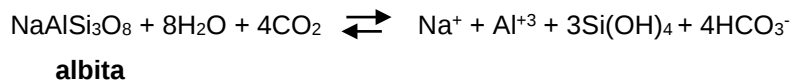
El pH que se genera en la hidrólisis de minerales, se utiliza para clasificar dichos minerales, y se denomina **pH de abrasión**. Este en general tiende a valores mayores a 8. *Oligoclasa*, *anortita*, *ortoclasa*, *biotita*, *hipersteno*, *calcita*, todos pH 8. *Microclina*, pH 8-9. *Feldespato* y *dolomita*, pH 9-10. *Hornblenda* y *augita*, pH 10. *Olivino*, pH 10-11. *Nefelina* y *actinolita*, pH 11. Los minerales primarios que se indican con pH de abrasión más bajos son *moscovita* pH 7, y *siderita* pH 5-7 (Steven et al., 1948 en Zapata y Hernández, 2004).

El suelo en contacto con agentes meteorizantes que acidifican, y con el aporte de H^+ **provenientes de la hidrolisis del CO_2** , puede generar también la siguiente reacción en el feldespato:





Ambas reacciones resultan en una reacción de **hidrólisis ácida**:



Las reacciones de hidrólisis de *anortita*, *albita* y *ortoclasa* para formar minerales de arcilla puede consultarse en

http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Tema03/Tema_03_Suelos_2.htm, y en

<http://es.scribd.com/doc/86922925/8/Formacion-de-arcillas-en-los-suelos>.

De esta última publicación, se destacan los ejemplos de formación de arcillas. La **arcilla caolinita** (mineral secundario) puede formarse a partir de tres feldespatos diferentes debido a la reacción con el H_2CO_3 y el agua: i) **anortita**, plagioclasa cálcica; ii) **albita**, plagioclasa sódica; y iii) **ortoclasa**, feldespato potásico. En los productos de reacción aparece Ca^{+2} , Na^+ y K^+ respectivamente, siendo para todas común la producción de *bicarbonato* y *la caolinita*. Adicionalmente, se produce **ácido silícico** con la albita y ortoclasa. Asimismo, se destaca como la presencia de **oxígeno** hace inestable los minerales que tienen varios estados de óxido-reducción como el Fe y Mn. Por ejemplo, olivino, piroxeno, anfíboles con O^- e H^+ dan como productos $\text{Fe}(\text{OH})_3$, Mg, Ca y $\text{Si}(\text{OH})_4$, entre otros.

Consecuentemente, en estas reacciones pueden ocurrir *diferentes procesos*, siendo uno de estos, la formación de **minerales secundarios** por una reacción incongruente, donde el Si^{+4} y el Al^{+3} reaccionan para formar arcillas del tipo **1:1 o 1:2**, según las concentraciones de Si^{+4} en el medio. El HCO_3^- y los **cationes** básicos formados son lavados, pudiendo precipitar en la base del perfil. Los **óxidos de Fe** se transforman luego en diferentes minerales del Fe (goetita, hematita, entre otros).

pH y Eh en la Meteorización. Zapata Hernández (2004) cita a Chesworth (1992) quien sintetiza la complejidad de procesos de meteorización que se producen en el suelo en base a dos variables principales, **pH** y **Eh** (potencial óxido-reducción), señalando tres **tendencias de meteorización** que están directamente relacionadas con el comportamiento del agua: **ácida, alcalina y rédox**. Este tema ha sido tratado en diversas publicaciones destacándose a Freeze y Cherry (1979), Fagundo (1990), Price (2003), en relación a la intemperización de rocas por el pasaje del agua subterránea en su recorrido entre la recarga y descarga de los flujos de agua, y en Argentina en Pereyra y Torres Duggan (2016) sobre la evolución de los suelos asociados al ambiente y material original.

Las tendencias **ácidas y alcalinas**, se dan en **ambientes insaturados**, condiciones oxidantes, siendo ácida cuando los iones producto de la meteorización son lavados ($P > \text{EVT}$), y alcalina, cuando el clima es seco ($P < \text{EVT}$). La tendencia **reductora**, se produce en ambientes saturados.

Tendencia ácida, es la más común de las meteorizaciones, en regiones *de clima templado y húmedo*, materiales porosos con drenaje. Las reacciones de hidrólisis y el tiempo de residencia del agua determinan la composición de las fases sólidas y líquidas. Los materiales finales que se forman en la fase sólida son **arcillas de tipo 1:1 y óxidos e hidróxidos de Fe y Al**, asociada a una *progresiva acidificación* del suelo. Los cationes alcalinos y alcalinos térreos, que no generan hidrólisis ácida, son lavados con elevadas precipitaciones, y reemplazados por H^+ y cationes metálicos que generan acidez al hidrolizarse (Al^{+3} , Fe^{+3} , Mn^{+4}). Si la lixiviación es intensa el Si^{+4} es liberado, el Al^{+3} queda en la solución del suelo y precipita como **gibbsite**. El proceso de dilución de minerales primarios y formación de nuevos productos continúa con la lixiviación, hasta que se agotan y comienzan a *disolverse los minerales secundarios* formados. La composición de la fracción arcilla guarda relación con la lixiviación y con las precipitaciones pluviales. A mayor lavado de Si^{+4} (principalmente como $Si(OH)_4$) por mayor precipitación se favorece la acidificación de los suelos y la ocurrencia de la siguiente secuencia:

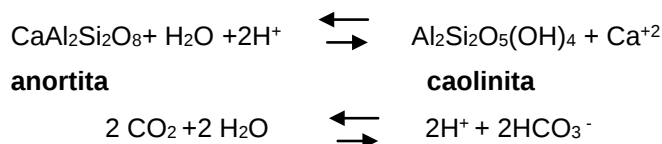
mineral primario $\rightarrow$ arcilla 2:1 $\rightarrow$ arcilla 1:1 $\rightarrow$ óxidos e hidróxidos de Fe y Al

Esta es la razón por la cual los suelos de las zonas lluviosas son más ácidos, hasta llegar a valores de 4,2 debido a la hidrólisis del Al y Fe (Punto 2.2.3).

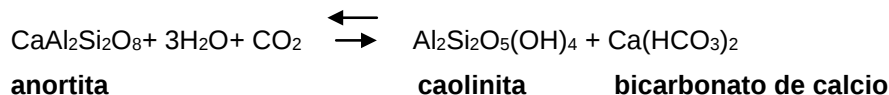
Tendencia alcalina, ocurre en regiones *áridas*, con déficit neto de humedad en el perfil edáfico o en ambientes con superficies **freáticas próximas**, con independencia del clima. En el primer caso el agua asciende por capilaridad con los productos de meteorización con excepción de momentos de lluvias estacionales, y en el segundo el agua asciende por carga hidráulica y/o por capilaridad desde la superficie freática (punto 3.6.3, Capítulo 3). En estos suelos aumenta el contenido de Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , HCO_3^- , CO_3^{+2} , SO_4^{+2} y Cl^- , pueden formar sales que precipitan, y alcanzar altas concentraciones. La forma en que estas sales precipitan, los cationes y aniones que prevalecen, así como otras propiedades fisicoquímicas asociadas (pH, Eh) son definidas por el origen de los flujos de agua (tipos), y zonas dentro de estos (Freeze y Cherry, 1979; Price, 2003; Tóth, 2000). Se analiza en punto 3.6.3 del Capítulo 3)

La característica principal de los aniones como HCO_3^- y CO_3^{+2} es que tienen **hidrólisis alcalina** confiriendo alto pH en presencia de cationes alcalino-térreos. El suelo con una matriz carbónica y elevado contenido de Ca^{+2} o Na^{+2} desarrolla pH superior a 8 (Adams, 1995; Zapata Hernández, 2004).

Sin embargo, son complejas las relaciones de equilibrio entre el CO_2 y el H_2O , pudiendo ser fuente de acidez y alcalinidad (Freeze y Cherry, 1979; Fagundo, 1990). Asimismo, son complejas las reacciones que se producen entre dichos componentes y minerales. Por ejemplo, la reacción de formación de los **carbonatos** resulta de la **hidrólisis ácida** de mineral que aporta Ca^{+2} , tal como **anortita (feldespato cálcico)**, y la formación de **arcilla caolinita** como mineral secundario. El bicarbonato de calcio ($Ca(HCO_3)_2$) formado en la reacción incongruente forma concreciones de carbonato de calcio en el perfil. A continuación se presentan las reacciones comentadas:



Ambas ecuaciones resultan en:



Tendencia reductora, se requiere exceso de agua, presencia de materia orgánica u otras fuentes reductoras, y de microorganismos que catalicen las reacciones. La meteorización se realiza en anoxia, por lo cual los elementos, Fe, Mn, S u otros (con más de un estado de valencia), se reducen a Fe^{+2} , Mn^{+2} , S^{-2} solubles, y pueden ser lavados de la zona de meteorización. En la reacción de reducción además de que **el elemento acepta electrones, se consumen protones**. Así, por ejemplo, la reducción de la **goetita** consume 3 H^+ por cada electrón que toma el Fe^{+3} . En este continuo consumo de protones el **pH aumenta**.

En los ambientes reducidos independientemente del pH del medio, se acerca a la neutralidad con el tiempo de inundación (autores en Zapata Hernández, 2004). Los óxidos de *Fe* se reducen al aceptar los electrones provenientes de la materia orgánica, y tiende a *aumentar el pH*, mientras que durante los períodos secos los óxidos de *Fe* se oxidan, produciendo un exceso de H^+ y *acidifican* el medio (proceso denominado **Ferrolisis**). En suelos alcalinos disminuye el pH por aumento de la presión del CO_2 a medida que aumenta la inundación. Se aprecia entonces que por diferentes procesos se van produciendo iones H^+ u OH^- que dan origen a la acidez-basicidad del suelo.

2.2.3 Acidificación proveniente de Arcillas y Óxidos de Fe y Al

En este punto se presenta con mayor detalle la acidificación asociado a las arcillas y óxidos de Al-Fe, hidrolisis y polimerizaciones, temas que fueron comentados y enunciados en puntos anteriores.

2.2.3.1 Rotura de bordes

Havlin *et al.* (1999) señala a las **arcillas y óxidos** como fuente de acidez debido a la disociación de H^+ por **roturas de bordes** de arcillas caolinitas y montmorillonitas, además de la hidrólisis de grupos terminales de óxidos de Fe y Al. La rotura de bordes Jackson (1963 en Adams, 1995) la incluye como fuente ácida muy débil, en pH entre **6,5-7**.

En Figura 2.3 se presenta un esquema de rotura de bordes de arcilla que libera H^+ u OH^- conforme el pH del medio (Havlin *et al.*, 1999).

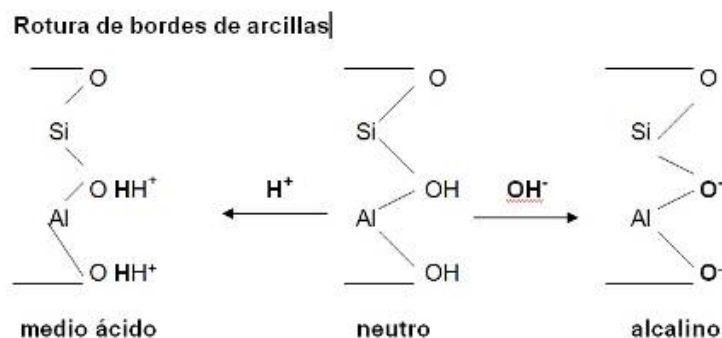


Figura 2.3 Disociación por rotura de borde de arcillas (Havlin *et al.*, 1999)

2.2.3.2 Hidrolisis de Al y especiaciones de formas solubles

En punto 2.1.3 se comentó los motivos por los cuales la clásica “*teoría del hidrógeno*” fue reemplazada por la “*teoría del aluminio*” como fuente de acidez. La acidez intercambiable de un suelo es esencialmente Al^{+3} ya que no existe H^+ intercambiable como tal, sino que este H^+ - H_3O^+ , proviene del $Al(OH_2)_6^{+3}$:



Las formas intercambiables del Al son: Al^{+3} , $Al(OH)^{+2}$ y $Al(OH)_2^+$, que son todas especies del Al^{+3} que derivan del complejo monómero hexaacuo (Al intercambiable posee 6 moléculas de agua, $Al(H_2O)_6^{3+}$) (Figura 2.4) (Adams, 1995; Jaramillo, 2002; Zapata Hernández, 2004). Esto se produce cuando el Al^{+3} en solución acuosa rápidamente se hidroliza dando lugar a especies monoméricas de Al^{+3} (diferentes formas y solubilidades) en una secuencia de **etapas de hidrolisis** que finaliza en la precipitación del $Al(OH)_3$, liberándose H^+ o H_3O^+ en cada una de dichas etapas (Figura 2.5). A pH 5,5, por debajo de este pH las formas del Al^{+3} son solubles siendo muy solubles y muy tóxicas a pH menor a 4,5. En pH mayor a 8 se produce otra solubilización del Al^{+3} como anión aluminato (Figura 2.5) (Adams, 1995; Porta *et al.*, 1994; Zapata Hernández, 2004).

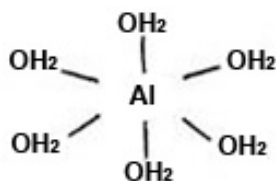


Figura 2.4 Iones hexahidronios de Al monomérico intercambiable $Al(H_2O)_6^{3+}$ (adaptado de Adams, 1995)

En la Figura 2.5 se muestra el rango de pH en que ocurre la hidrólisis de cada especie de Al^{3+} y las formas químicas que resultan indicadas en la figura de manera **esquemática**, dependiendo del pH (modificada de Porta *et al.*, 1994). Un ión monomérico de Al^{3+} con 6 moléculas de agua (Figura 2.4), al hidrolizarse da lugar a otras especies. Estas representan (a) y (b) formas intercambiables $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ que varían con la hidrólisis y liberación de H^+ (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$); (c) fase sólida-precipitada, gibsita; y (d) formas aniónicas. Estas formas se sintetizan en las reacciones que se indican en la parte inferior de la Figura 2.5 (Porta *et al.*, 1994; Adams, 1995). Se aprecia que cada etapa de hidrólisis y formación de especie química ocurre a valores de pH cada vez más alto hasta llegar a un valor de pH, en el cual ya **no hay liberación de H_3O^+** , las especies químicas del Al^{3+} ya no están presentes en formas disponibles o están ausentes, y **aumenta el contenido de OH^-** . Esto permite que la reacción continúe hacia la derecha. Se aprecia entonces, que la presencia de una especie química sólo es posible en determinado rango de pH, y a su vez estas especies del Al^{3+} participan en la definición del pH según liberan H_3O^+ u OH^-

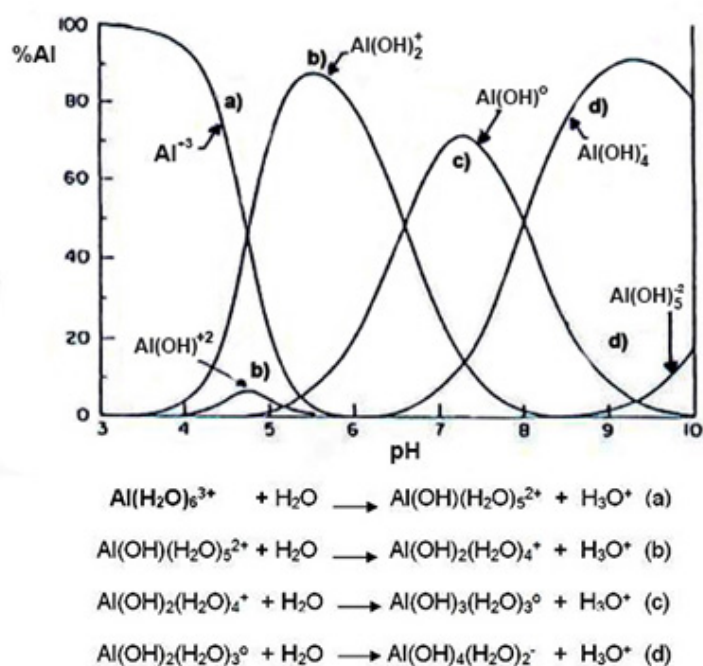


Figura 2.5 Comportamiento del Aluminio en el suelo en función del pH
(modificado de Porta *et al.*, 1994)

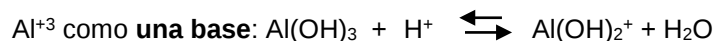
a) y b) formas intercambiables $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ que varían con la hidrólisis y liberación de H^+ (Al^{3+} ; $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$)
(c) fase sólida, gibsita; y (d) formas aniónicas

Estas sucesivas etapas que dan origen a las diferentes formas del aluminio (solubles e intercambiables), con liberación de H^+ u OH^- , pueden explicarse como se indica a continuación:

Si una base es agregada al suelo, los H^+ del medio serán neutralizados. Cuanta más base se agrega, más Al^{3+} se hidroliza con producción de H^+ en cantidad equivalente al Al^{3+} presente,

base agregada, y pH del medio. Cada OH^- producido en la hidrólisis, se une a una carga positiva del Al^{+3} , así, las cargas positivas se van neutralizando con los OH^- y es el H^+ libre (como H_3O^+) el que se opone al aumento del pH. Al desplazarse hacia la derecha la reacción, hay un consumo de H_3O^+ ya que se incrementan los OH^- . Consecuentemente, los monómeros y polímeros hidratados de Al^{+3} se hidrolizan, liberan H^+ como H_3O .

Las especiaciones que se producen se debe a que el Al^{+3} , al igual que el agua, puede actuar como **una base o un ácido**.



El Al^{+3} también puede actuar como **un anión**: $\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_4^-$

El **aluminio** sólo actúa con un único estado de valencia (+3), la *presencia de una especie u otra depende exclusivamente del pH*. Esto lo diferencia del **Fe** y del **Mn**, con dos estados de valencia, por lo cual las especies químicas que forman no sólo dependen del pH, sino también **del potencial redox** (contenido de oxígeno) (Porta, *et al.*, 1994).

Polimerización de monómeros de Al. Como se analizó en punto anterior, el Al *intercambiable*, es el monómero hexaacuato $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ y las especies $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ que se forman por hidrólisis (monómeros Figura 2.5). Los iones hidroxialumínicos hidratados tienden a polimerizarse (polímeros de aluminio hidratados). Las unidades de estos polímeros son entonces, los productos de las reacciones anteriores: $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, etc.

El mecanismo de polimerización se produce por el reemplazo de OH^- por el Al^{+3} adyacente. Así, los hidróxidos de Al^{+3} se combinan hasta formar polímeros hidroxialumínicos con alta carga. La **composición de los polímeros** que se forman no está bien establecida, su fórmula general puede describirse así: $\text{Al}(\text{OH})_x (\text{H}_2\text{O})_{6-x}^{(3-x)+}_n$, siendo “n” el promedio de iones aluminio por polímero. Salvo excepciones, estas formas polimerizadas se comportan **como no intercambiables y son las formas solubles** del Al^{+3} , cuya presencia es mínima a pH 7.

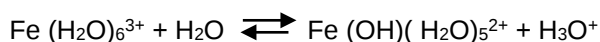
Estos polímeros con cargas eléctricas en número variable, aumentan de tamaño con el tiempo y mejoran su polimerización en presencia de coloides que los retienen fuertemente. El Al polimérico es muy estable con las arcillas y está relacionado a la CIC dependiente del pH (Adams, 1995). Sin embargo, este autor indica que diversos factores afectan en forma variable el Al^{+3} polimérico tales como: *tiempo, sales, temperatura, concentración de Al^{+3} , ciclos de humedecimiento y secado, CIC, materia orgánica, cantidad de OH^- y tipo de arcilla*.

Los **efectos negativos de la acidez para las plantas** proviene de la **toxicidad del Al^{+3} y Mn^{+2}** presente en solución e intercambiable, **no son los H_3O^+** la causa del deficiente crecimiento de las plantas. Así, *si no hay Al^{+3} y Mn^{+2} en exceso no resulta necesario elevar el pH, siendo suficiente suministrar Ca^{+2}* (Porta *et al.*, 1994). Adicionalmente, cabe destacar, que tal como indica estos autores, en las superficies de intercambio la presencia de H^+ en suelos minerales es muy escaso excepto en suelos con pH < 4.

Formación de complejos con el Al^{+3} . La formación de los complejos de Al^{+3} con otros iones modifica su comportamiento. Esto es importante en los procesos de edafogénesis tal como el de la **podzolización** donde los compuestos orgánicos se unen con el Fe^{+3} y Al^{+3} aumentando su movilidad en el perfil (formación de horizonte Bhs). Asimismo, los compuestos orgánicos y otros **ligandos o bases fuertes** presentes en el suelo (*materia orgánica, yeso, sulfatos, fosfatos, hidroxilos, polímeros de $\text{Si}(\text{OH})_4$*), dependiendo de la capacidad de formar complejos, modifican la **toxicidad** debido al Al^{+3} soluble en solución. La concentración total de Al^{+3} en solución disminuye con el agregado de materia orgánica, yeso, fosfatos, sulfatos, hidroxilos, polímeros de $\text{Si}(\text{OH})_4$, *no siendo las formas que se complejan fitotóxicas*. Por el contrario, otros elementos o compuestos aumentan la concentración de Al^{+3} en solución tales como presencia de flúor, citrato, oxalato, fulvatos entre otros (Zapata Hernández, 2004).

Respecto a los *grupos ácidos de la materia orgánica*, cabe indicar que algunos tienen especificidad para complejar al Al^{+3} en solución, siendo diversa la forma en que se disocian los grupos funcionales de la materia orgánica y como se ligan con el Al^{+3} . La formación de complejos depende del pH, inicialmente se deben disociar los grupos ácidos y luego formar el enlace covalente con el Al^{+3} (R-COO-Al). Los complejos formados con *grupos fenólicos* son más estables que los formados con *grupos carboxílicos* (Porta *et al.*, 1994; Zapata Hernández, 2004; Gallardo Lancho, 2016).

Hidrólisis del Fe^{3+} . Es similar a la del aluminio, pero ocurre a valores de pH menor. El H^+ producido por la hidrólisis del hierro está regulado por las reacciones del aluminio. La mayor parte de las reservas de aluminio del suelo reaccionarían antes que la hidrólisis del hierro regule el pH del suelo (Bohn *et al.*, 1993). El pK de la primera etapa de hidrolización del Fe^{3+} es 3, mientras que la del Al^{3+} es próxima a 5.



2.2.4 Acidificación proveniente de la Materia orgánica

Los grupos ácidos de la materia orgánica aportan H^+ que provienen de los grupos funcionales que actúan como ácidos débiles, **grupos carboxílicos (R-COOH) y fenólicos (R-OH)**. Estos grupos confieren un considerable poder tampón al suelo al dar cargas eléctricas negativas que provienen de la disociación de dichos grupos ácidos y contribuyen a la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónica) dependiente del pH (Porta *et al.*, 1994; Gallardo Lancho, 2016).

A continuación, se esquematiza el aporte de H^+ proveniente de grupos ácidos de la materia orgánica (R, grupo aromático - grupo funcional, radicales libres):



El *contenido de materia orgánica* varía con el ambiente, clima, relieve (sistemas de flujo de agua según sean zonas de recarga o descarga), vegetación y suelo. Por ejemplo, en posiciones topográficas más bajas, zonas de descarga de flujos de agua subterránea, si es que estos flujos no son muy salinos y alcalinos, aumenta la materia orgánica respecto a igual ambiente pero en posición más elevada. Son diversas las combinaciones posibles entre factores formadores del suelo, el nivel de materia orgánica, y su interpretación.

Un criterio de interpretación y análisis, es considerar las “*formas del humus*”, en relación a su origen e incidencia en el ambiente. Las propiedades que confieren al suelo varían conforme a la proporción de “*componentes del humus*” (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas) (Gallardo Lancho, 2016, Alconada *et al.*, 2018).

Respecto a los *componentes del humus*, los *ácidos húmicos* y *huminas* prevalecen en suelos neutros a débilmente ácidos con alta actividad biológica y los *ácidos fúlvicos* en suelos ácidos, pobres en nutrientes con baja actividad biológica (Peinemann, 1998). La proporción en que estos componentes del humus se presentan varía con las diferentes *formas del humus*, los cuales son el producto principalmente de las condiciones de aerobiosis-anaerobiosis y actividad biológica en que se desarrollan (Gallardo Lancho, 2016). Este autor, indica las propiedades de las diferentes formas del humus (acuático: *turba*; semiacuático: *anmor*; terrestres: *mor*, *moder*, *mull*) respecto a la acidez del suelo, grado de saturación y relación C/N, tal como se explica a continuación.

El *humus anmor* y la *turba*, pueden desarrollarse en condiciones mesotróficas (sápico, pH neutro, relación C/N < 40) u oligotróficas o fíbricas (pH muy ácido y C/N > 40). El *humus de Mor* tiene elevada proporción de *ácidos fúlvicos* con fuerte carácter ácido, que se producen en forma continua dada que no son estables en el suelo; el *humus Mull*, predominan los ácidos húmicos (con menor acidez), y las huminas. El ordenamiento decreciente de contenido de *ácidos fúlvicos* en las formas comunes del humus son ***Mor > Moder > Mul forestal > Mull cálcico > Mull estepa***.

Consecuentemente el *humus Mor* es el más agresivo y acidificante de todos, y el *Mull de estepas*, forma complejos arcillo-húmico más estable por la presencia de macromoléculas polimerizadas menos solubles con ácidos húmicos y principalmente huminas.

Por lo expuesto, se destacan dos aspectos relevantes: i) En relación al ***efecto de la materia orgánica sobre la acidez del suelo*** debe considerarse: *componentes húmicos* (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas) que integran las diferentes *formas de humus* y las condiciones bajo las cuales estos se desarrollan de modo de interpretar en forma integral un contenido de materia orgánica edáfica. ii) Respecto al ***efecto*** de la acidez proveniente de la materia orgánica ***sobre los cultivos*** varía significativamente del efecto derivado de la hidrólisis de Al^{+3} , como se indicó en punto 2.2.3.2, son los **iones Al^{+3} y Mn^{+2} y no los H^{+}** , los que resultan **tóxicos** para los cultivos (punto 2.5).

Manejo y materia orgánica. Las prácticas de manejo que favorecen la remoción, pérdida o adición de materia orgánica modifica la reacción del suelo. La mineralización muy intensa de la materia orgánica produce gran cantidad de ácidos orgánicos solubles, que si bien varía con la composición del sustrato orgánico y condiciones del medio, en general tiende a la aci-

dificación. Sin embargo, si este proceso continúa sin nuevos aportes de materia orgánica al suelo, paulatinamente irá disminuyendo su contenido de humus, con efectos negativos en las propiedades física, físico-químicas y químicas del suelo. Ejemplo: *desforestar, labrar, modificar la cobertura del suelo, aportar agua con mayor temperatura*, aumentan la mineralización de la MO se producen ácidos orgánicos solubles y se liberan nutrientes principalmente NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CO_2 y micronutrientes. La producción de NO_3^- implica una oxidación de NH_4^+ con generación de dos H^+ liberados por cada molécula de NH_4^+ oxidada. Este tema se desarrolla con detalle en la primera parte de esta publicación (Alconada *et al.*, 2018). Puede entonces la **materia orgánica aportar acidez** por las reacciones que suceden con los grupos radicales libres que la integran, y la que proviene de la nitrificación del N contenido en la materia orgánica (factor capacidad). Gallardo Lancho (2016) presenta un detallado análisis de la materia orgánica y su manejo en diferentes sistemas productivos (agrícolas, pecuarios, forestales y mixtos), indicando las consecuencias en el reciclado de nutrientes y otras variables del suelo.

2.2.5 Balance de cargas en la nutrición. Respiración y exudados de la biota

Balance de cargas_. Las raíces toman del suelo los **cationes y aniones** (Ca, Mg, K, NH_4^+ , $\text{H}_2\text{PO}_4^{3-}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ etc). Esta absorción está acompañada de una transferencia desde la raíz a la solución edáfica de **H^+ , OH^- y HCO_3^-** , a fin de mantener el **balance de cargas eléctricas en el citoplasma**. Si la planta absorbe cationes libera H^+ y genera un ambiente rizosférico con pH algo menor que el resto. Un caso particular es la fertilización nitrogenada que afecta el pH de la rizosfera dependiendo de la forma en que tomen el N del suelo. Si la planta absorbe NH_4^+ , el pH del suelo baja porque libera H^+ . Si la planta absorbe NO_3^- el pH del suelo sube porque libera OH^- (Adams, 1995). Esto en general no es de gran importancia en cultivos extensivos, pero puede tener importancia en cultivos intensivos donde la fertilización nitrogenada es muy elevada (Cadahia López, 2005).

Procesos metabólicos, respiración_. La respiración de los **microorganismos**, y de las **raíces** pueden ser fuente de acidez. Los procesos metabólicos generan **CO_2** , y **ácidos orgánicos solubles** acidificantes, que se comportan como ácidos libres en el suelo (concentraciones en el suelo de ácidos orgánicos totales entre 0,01 y 5 mmol.l⁻¹). Por hidrólisis de dicho CO_2 , a la presión que se alcanza en el suelo, el pH puede llegar a ser menor a 5 (autores en Adams, 1995). Esto se explicó con mayor detalle en punto 2.2.1 (Figura 2.2.).

Exudados_. Los **ácidos orgánicos de cadena corta** son los exudados más comunes en el suelo producidos por las raíces, y tienen una vida muy corta en el suelo, incluso horas. El grupo ácido cede fácilmente su protón en el rango de pH del suelo. Estos H^+ liberados ataca a los minerales y promueve su alteración, y el COO^- (base Lewis) forma complejos solubles con los cationes metálicos liberados del mineral (ácido Lewis), al igual que lo mencionado en punto anterior.

2.2.6 Fertilizantes de carácter ácido y básico, y enmiendas inorgánicas

Fertilizantes de carácter ácido Estos fertilizantes aplicados en forma intensiva en suelos de baja capacidad tampón pueden generar acidificación. Sin embargo, no todos presentan igual riesgo.

Fertilizantes nitrogenados, son los que más participan en la acidificación de los suelos. Cada fertilizante tiene un índice de acidez que condiciona su elección (Havlin *et al*, 1999). Índice de acidez fisiológica (IA), representa la cantidad de CaCO_3 necesario por cada 100 Kg de fertilizante. Este autor indica los siguientes IA: sulfato de amonio 112, urea 84, fosfato diamónico 74, fosfato monoamónico 65 y nitrato de amonio 63. Otra forma de expresar la cantidad de CaCO_3 necesaria para neutralizar la acidez es el equivalente de CaCO_3 por Kg de N aplicado, amoniaco, úrea, y nitrato de amonio es de 3,6; sulfato de amonio 7,2 y fosfato monoamónico de 5,4.

Diferentes autores atribuyen la acidez proveniente de los fertilizantes a diferentes causas, no siendo estas excluyentes entre sí. Fassbender (1975) indica que los fertilizantes a base de sulfatos y nitratos de amonio pueden provocar acumulaciones de ácido nítrico y ácido sulfúrico. Para otros autores esto no sería importante, ya que la persistencia de estos ácidos en el suelo es muy baja, no siendo entonces aquella la principal causa de acidificación. Sin embargo, en general la bibliografía es coincidente en indicar que la acidez se produce por la liberación de H^+ durante la **oxidación de amonio a nitrato**, consecuentemente, cuanta mayor es la cantidad de amonio en el fertilizante tanto mayor la acidez que produce. Los fertilizantes nitrogenados tienen en general reacción ácida, siendo menor cuando presentan el nitrógeno en forma nítrica y/o presenta calcio en su composición (Darwich, 2006; Wild, 1992). En IPNI (1991) se indica que la acidez producida por el amoniaco anhidro, urea, nitrato de amonio es de $1 \text{ mol H}^+ \cdot \text{mol}^{-1} \text{ N}$, y el sulfato de amonio, fosfato diamónico es de $2 \text{ mol H}^+ \cdot \text{mol}^{-1} \text{ N}$. Havlin *et al*, 1999) indican como relevante en el grado de acidificación que provocan los fertilizantes si el **anión acompañante** favorece o no el arrastre en profundidad de los cationes presentes en la solución edáfica.

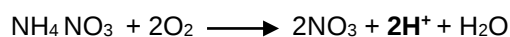
A continuación, se presentan algunos ejemplos:

Sulfato de amonio



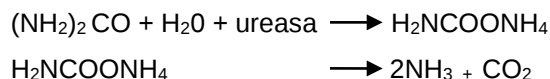
La producción de estos H^+ puede desplazar al Ca^{+2} y Mg^{+2} , y estos perderse por lavado. .

Nitrato de amonio es menos acidificante que el anterior, sólo tiene un NH_4^+ en su composición, la reacción de nitrificación es la siguiente:



Úrea, en el suelo inicialmente es transformada por la enzima ureasa facilitando su hidrólisis y formando carbamato amónico que es un compuesto inestable. Esta reacción eleva el pH en la cercanía del gránulo a valores mayores que 8.0. En este ambiente alcalino el carbamato de

amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2) y luego la forma amoniacal pasa a la forma nítrica (nitrificación) liberando H^+ y acidifica. No tiene exigencias en el tipo de suelo donde pueda ser aplicada, con excepción de los muy ácidos por la poca actividad biológica. La reacción de la urea en el suelo es la siguiente:



Si bien como se indicó precedentemente se dan valores de referencia expresados en el Índice de Acidez, diversas experiencias muestran resultados variables. Para el Reino Unido, Wild (1992), señala que en teoría, se necesitan alrededor de **7,2 kg de CaCO_3 por kg de N aplicado** como sulfato de amonio a fin de reponer el Ca^{+2} perdido y neutralizar los H^+ producidos. Sin embargo, aunque desconoce las causas, a campo esta cantidad disminuye a valores próximos a **4-5 kg**. Este autor destaca, que no existe un ajustado balance de protones con la fertilización. En el caso de nitrato de amonio, Wild (1992), señala que son necesarios entre **1,4 y 4 kg de CaCO_3 por kg de N agregado**. Sin embargo, en términos prácticos este autor concluye que se requiere en general esta última cantidad por kg de N aplicado para ambos fertilizantes (sulfato y nitrato de amonio).

Las variaciones obtenidas en los resultados de aplicaciones de encalado para corregir la acidez se explican por lo indicado por IPNI (1991). En esta publicación se recomienda ajustar la técnica de laboratorio para definir la necesidad de encalado al tipo de suelo, debido principalmente a la presencia de *arcillas illita, montmorillonitas, caolinitas o alófanas*. Se analiza en IPNI (1991) el encalado en suelos de zonas templadas con arcillas 2:1, arcillas 1:1 *Oxisoles*, *Ultisoles*, y arcillas alófanas en *Andisoles*. Se destaca que el valor de pH a elevar mediante el agregado de una enmienda cálcica es menor en suelos tropicales rojos que en otros con arcillas de tipo 2:1, asociándose esto al tipo de carga de la CIC, y alteración de los minerales ante el incremento de H^+ .

Fertilizantes fosfatados, el efecto ácido de esto está dado por la presencia de amonio (ejemplo, fosfato diamónico 18:46:0, aporta 2NH_4^+ por cada PO_4^{3-}), ya que los fosfatos tienen un efecto despreciable sobre el pH al ser directamente absorbidos por los vegetales o adsorbidos por el suelo (Domínguez Vivancos, 1989; Wild, 1992). Como se indicó precedentemente, el índice de acidez fisiológica (IA), que representa la cantidad de CaCO_3 necesario por cada 100 kg de fertilizante, son elevados para la mayoría de los fosforados utilizados e incluso superior a algunos nitrogenados. Así por ejemplo el fosfato diamónico y monoamónico, tienen un IA mayor que el nitrato de amonio (IA 74, 65, 63 respectivamente), y expresado en moles el sulfato de amonio es equivalente al fosfato diamónico ($2 \text{ mol } \text{H}^+ \cdot \text{mol}^{-1} \text{ N}$) (Tisdale y Nelson, 1991; Havlin *et al*, 1999). El fosfato monoamónico es recomendado para todo tipo de suelo dada su alta solubilidad aunque es más indicado por su carácter acidificante para los de pH elevado. Se destaca sin embargo que en suelos calizos hay una importante pérdida por precipitación como fosfato bicálcico y tricálcico. Respecto al *superfosfato* no ejerce acción sobre el pH (Domínguez Vivancos, 1989; Wild, 1992).

Fertilizantes potásicos, a base de *cloruros o sulfatos*, producen acidez en el suelo al reemplazar el Ca^{+2} y Mg^{+2} por el K^{+} agregado. Así, los cationes reemplazados quedan en solución y pueden ser arrastrados por lavado. Se estima que aproximadamente se requiere **1,1 kg de CaCO_3** para neutralizar la acidez aportada por cada kg de K^{+} agregado como fertilizante (Wild, 1992). En otras publicaciones se indica una descalcificación producto del agregado de KCl y K_2SO_4 pero asociado al efecto del anión acompañante tal como se comenta a continuación.

Cloruro potásico, es una sal neutra que resulta potencialmente ácida ya que el K^{+} es absorbido por la planta en mayor cantidad que el Cl^{-} , y este con el Ca^{+2} del suelo forma CaCl_2 muy soluble, descalcificando el horizonte superficial. **Sulfato potásico**: acidificante debido a que el SO_4^{+2} es menos absorbido por la planta que el K^{+} (puede unirse al Ca^{+2}). **Nitrato de K**: reacción prácticamente neutra. Complejos NPK, pueden tener diferentes pH, en general son ácidos o neutros.

Se destaca que no obstante lo comentado en relación al efecto de los fertilizantes en la reacción del suelo, esta varía con el suelo, cultivo, manejo, clima, composición del fertilizante, dosis y tiempo en que dicha aplicación se realiza.

Fertilizantes de carácter básico_. Los fertilizantes **nitrogenados**, *nitratos de K* (grado 13-0-46), *Ca* (grado 15.5-0-0 19) y *nitrato de Na* (sal de chile, 16%N, 35% de sosa y de esta 26%Na y unos 30 oligoelementos), *cianamida cálcica* (CaCN_2 , 3% de C_2Ca), tienen reacción neutra o básica. Entre los **fosforados**, tienen reacción básica algunas *escorias*, y el *fosfato bicálcico* (Domínguez Vivancos, 1989). Actualmente en la Argentina se utiliza como fertilizantes fosforados principalmente el *fosfato monoamónico*, *fosfato diamónico* (ambos de reacción ácida), y el *superfosfato simple*, el cual tiene una acidez muy baja (0,6-2,4%) y se utiliza por su aporte de P_2O_5 (20%), S 12% y Ca (20%). El aporte de Ca^{+2} resulta importante a largo plazo en los sistemas productivos agrícolas.

Otros fertilizantes, si bien son de reacción ácida y fueron mencionados como fuentes de acidez, inicialmente al solubilizarse en el suelo producen una elevación del pH importante que debe ser considerada cuando el fertilizante se agrega a la siembra. Ejemplos de estos son: *úrea*, *carbonato de amonio*, *fosfato diamónico* y *fosfato de potasio*.

Enmiendas inorgánicas, encalado_. Diversos compuestos de calcio son utilizados a fin de elevar el pH del suelo a fin de disminuir el contenido de Al^{+3} y Mn^{+2} soluble y aumentar la solubilidad de los nutrientes. El más utilizado es la cal, óxido e hidróxidos de Ca (cal viva y apagada). Otros compuestos con calcio y/o magnesio son carbonato de calcio (calci-ta), carbonato de calcio y magnesio (dolomita), sulfato de calcio (yeso), fosfoyeso, silicatos de calcio y/o magnesio. La bibliografía sobre el tema es muy amplia. Molina (1998); Espinosa y Molina (1999), presentan un material muy completo sobre la práctica de encalado para la corrección de la acidez del suelo, materiales disponibles, y la forma de calcular dosis de aplicación, y efectos en el pH.

La elección de una u otra fuente depende de diversas variables, cabe destacar lo señalado por Adams (1995) respecto a la necesidad de establecer el origen de la acidez a fin de decidir la enmienda química a utilizar. Así por ejemplo, indica que en *suelos sulfato ácidos* con pH menor 4,2, debido a que las fuentes son *ácidos fuertes* (ácidos libres y H_2SO_4), *el encalado* no genera un aumento del pH, resultando más adecuado lavar e inundar el suelo. Por el contrario, *resulta adecuado encalar y/o enyesar*, en los casos donde la fuente de acidez proviene de *ácidos débiles* (Al intercambiable, grupo carboxilo de la materia orgánica, pH 4,2 a 5,2), y *ácidos muy débiles* (COOH , Al polimérico, grupo fenólico, y H_2CO_3 , pH 5 a 7). El encalado actúa en superficie mientras que el yeso debido a su mayor solubilidad puede ser usado para corregir pH en profundidad. Espinosa y Molina (1999) analizan la utilidad del uso del yeso en siembra directa a fin de permitir la profundización del calcio teniendo efectos adicionales por el agregado de sulfatos sobre la nutrición de los cultivos.

2.2.7 Enmiendas orgánicas

El efecto de las enmiendas orgánicas sobre el suelo es muy variable en función de su origen, calidad, y dosis (diversos autores en Alconada *et al.*, 2018). Labrador Moreno (1996) analiza el origen de los diferentes productos orgánicos que se obtienen en función del tipo de animal, edad, alimentación, así como el material vegetal que se utiliza como cama. Las camas donde se recoge el estiércol animal, es también de composición variada, tales como cáscaras, afrecho, y afrechillo de diferentes cereales o aserrín.

En la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se presentan características de abonos orgánicos utilizado en diferentes lugares del mundo (modificadas de Domínguez Vivancos, 1989 y Labrador Moreno, 1996 respectivamente). En la Tabla 2.3 se presentan valores de pH y micronutrientes de materiales orgánicos utilizados en un ensayo en Corrientes (Castillo y Benito, com pers.). En la Tabla 2.4 se presenta el pH y salinidad de estiércoles en camas de arroz o girasol, utilizados en sistemas intensivos del Gran La Plata (Lavado, Alconada y Álvarez, inédito), y en la Tabla 2.5 la composición de un estiércol de pollo en cáscara de arroz, fresco que es el abono orgánico más utilizado en la actualidad en la región del Gran La Plata y el mismo material compostado según proceso desarrollado en primer parte de este libro (Alconada *et al.*, 2018) (Alconada, Pellegrini y Cuellas, datos inéditos medidos en 2017).

Los valores de pH son muy variados para iguales productos tal como se aprecia al comparar las Tablas 2.1 a 2.5. Las diferencias se deben a lo indicado precedentemente y se explican con gran detalle en Labrador Moreno (1996). Se destaca que en la zona de producción intensiva hortícola del Gran La Plata el uso de estiércoles animales en diferentes camas, tienden a elevar el pH y aumentar la salinidad, esto es debido no sólo a las características de abonos orgánicos sino también, a otras prácticas realizadas y características naturales del suelo y agua de riego (Alconada y Zembo, 2000; Alconada *et al.*, 2000).

	MS%	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	S	Reacción
		Kg.tn ⁻¹ de producto					
Estiércol vacuno	100	20	13	20			A
Estiercol caballo	100	17	18	18			A
Estiercol oveja	100	40/50	15/20	35/40			A
Estiercol cerdo	100	20	14	18			A
Gallinaza	100	30/50	30/150	20/25			B
Harina de huesos	100	20/30	200/250		10	2	-
Sangre seca	100	130					A
Residuos pescado	100	40/100	30/60		5	2	
Residuos lana	100	30/90					
Tortas de algodón	100	30/70	20/30	10/30			

Tabla 2.1 Características y riqueza media de elementos nutritivos de los principales materiales orgánicos (varios autores, modificada de Domínguez Vivancos, 1989)

	gallinaza	oveja	ternero	vaca	conejo
MS%	22	25	23	23	26
pH	6,8	7,8	7,9	8,2	7,5
CE	5,8	2,8	4,7	4,0	2,9
MO%	64,7	64,1	73,2	66,3	69,4
N%	1,7	2,5	2,4	1,8	2,8
P ₂ O ₅ %	4,2	1,2	1,5	1,7	4,8
K ₂ O%	3,8	2,8	3,1	3,1	1,9
C/N	20	10,1	14,5	13,9	10,9
CaO%	8,9	7,8	3,0	3,7	6,6
MgO%	2,9	1,5	0,9	1,1	2,1
Na ₂ O%	0,6	0,6	0,8	0,6	0,3
Fe %	0,5	0,3	0,2	0,4	0,2
Mn ppm	506	306	160	172	258

Tabla 2.2 Composición media de diferentes estiércoles (modificada de Labrador M., 1996)

Tipo de abono	pH	Cu	Mn	Zn	Fe
Ave	7.3	128	500	318	952
Lombricompuesto	6.1	7.8	583	115	1190
Vacuno	8.2	8.9	666	115	5714
equino	7.0	8.9	1000	88	952

Tabla 2.3 Composición de diferentes abonos orgánicos, Corrientes (Castillo y Benito, com pers)

	cama caballo	cama pollo fresca	barro
pH	7.0	8.0	7.2
CE dS.m ⁻¹	5.0	3.8	4.5

Tabla 2.4 Estiércoles de uso frecuente en el Gran La Plata y de barros cloacales producidos en la Argentina (biosólidos) (Lavado, Alconada y Alvarez, inédito)

	Estiércol pollo en cáscara de arroz	
	fresca	compostada
pH	8,88	6,74
CE dS m ⁻¹	23,6	13,51
MO%	72	38
Nt%		2,0
Pppm	142	182
RAS	54,8	11,8
Na me.l ⁻¹	106,7	64,3
K me.l ⁻¹	77	196
Ca +Mg me.l ⁻¹	7,6	59,0

Tabla 2.5 Composición estiércol en cama de pollo fresca vs compostada
(Alconada, Pellegrini, Cuellas, inédito)

En base a lo expuesto, puede afirmarse que el agregado de una enmienda orgánica en función de sus características, *tiene un efecto variable en la reacción del suelo*, así como, en sus otras propiedades químicas y físicas. El agregado de una enmienda debe ser controlada a fin de evitar *aumentos en el pH, salinizaciones y aporte de materiales contaminantes*, frecuentes en los abonos provenientes de estiércoles (autores en Alconada *et al.*, 2018). Consecuentemente, es importante considerar que el origen natural de un producto no garantiza cualidades positivas en todos los casos y situaciones, debiendo tenerse las precauciones y/o tratamientos que se requieren para eliminar o controlar los efectos negativos mencionados.

Cabe destacar que es frecuente el uso de los estiércoles en camas de diverso origen a fin de mejorar la estructura. Al respecto cabe destacar que Domínguez Vivancos (1989), y Labrador Moreno (1996) indican que el estiércol animal no genera humus, aportan nutrientes y microorganismos, siendo los materiales vegetales que los acompañan los que se transforman en humus. Sin embargo, Gallardo Lancho (2016) indica que el humus puede provenir de restos de origen vegetal y animal. Sobre la materia orgánica y abonos puede consultarse Lanfranco en Alconada *et al.* (2018).

Enmiendas orgánicas de origen vegetal. En la Tabla 2.6 se presenta a modo de ejemplo, las propiedades físicoquímicas y químicas, del extracto de saturación, de diferentes turbas de *Sphagnum* denominadas “rubias”, y mezclas de estas con turbas “negras”. Los datos fueron obtenidos de 7 turbas rubias y 5 turbas mezcla (Abad *et al.* 1996, en Cadahia López, 2005). Se aprecia que estas turbas presentan condiciones de pH, salinidad y nutrición muy variables, e incluso con valores extremos en un mismo tipo de turba. Pueden ser fuente de acidez o basicidad. Existen también las denominadas turbas cálcicas cuya reacción es básica. Consecuentemente, el uso irrestricto de las turbas sin un conocimiento de su composición, puede conducir a resultados muy variables en la nutrición de los cultivos, desde situaciones de carencia hasta de fitotoxicidad.

Puede concluirse que en relación a las enmiendas orgánicas dos aspectos principales deben considerarse a fin de establecer sus efectos en la *reacción del suelo*, sus propiedades físicoquímicas y químicas, y asociado a esto, su potencialidad para mejorar efectivamente la estructura del suelo.

	Turba rubia	Mezclas
	Intervalos	
pH	3,7-7,1	4,8-5,9
CE dS.m ⁻¹	0,4-4,6	1,8-3,3
N-NO ₃ ⁻	<0,2-793	100-355
P	0,7-83	8-51
K ⁺	17-326	75-236
Ca ⁺²	22-630	190-436
Mg ⁺²	7-205	23-147

Tabla 2.6 Intervalo de variación en la caracterización físicoquímicas y químicas de turbas, utilizando el método del extracto de saturación, nutrientes en ppm (modificada de Cadahia López, 2005)

2.2.8 Procesos de transporte, lavado y extracción de cationes básicos

La entrada y salida de protones del sistema que resultan de la salida y entrada de cationes alteran la reacción del suelo. En punto 2.2.5 se analizó el balance de carga que se produce en la rizósfera a fin de mantener la electroneutralidad (cambios de pH asociado a la nutrición vegetal). Sin embargo, los procesos más importantes que conducen a la acidificación del medio son el **lavado de bases** en un régimen percolante con abundante agua, y la **extracción de cationes por parte de los cultivos**.

La extracción de bases por las plantas es muy variable dependiendo de diferentes factores locales y de la planta. Fassbender (1975) indica valores de OCa entre 50 y 100 kg.ha⁻¹, OMg entre 40 y 80 kg.ha⁻¹, K₂O entre 100 y 150 kg.ha⁻¹, y Na₂O entre 10 y 30 kg.ha⁻¹. Wild (1992) para el cultivo de trigo menciona una extracción de 8 kg de Mg y 25 kg de Ca.ha⁻¹. En la Tabla 2.7 se presenta la absorción y extracción de nutrientes N, P, K, Ca y Mg para los principales cultivos de grano recopilado de diferentes fuentes por Ciampitti y García (2008). Estos autores indican que la absorción del cultivo se refiere a todos los nutrientes que fueron tomados por el cultivo (planta entera incluyendo órganos cosechables), mientras que la **extracción** (que es generalmente lo que procura reponerse mediante una fertilización), son los tomados por los **órganos que se cosechan**, y consecuentemente, no retornan al suelo como rastrojo.

	Absorción (kg.tn ⁻¹)						Extracción (kg.tn ⁻¹)					
	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

Tabla 2.7 Absorción y extracción de nutrientes para los principales cultivos de grano Absorción: planta entera. Extracción, nutrientes en el grano. (adaptada de Ciampitti y García 2008)

En Tabla 2.8 se presenta la exportación absoluta de nutrientes en madera comercial de *Eucalyptus sp* y *Pinus taeda*, siendo los factores que inciden la densidad, especie, suelo, duración de la plantación, método de cosecha, entre otros (Hernández, 2015), y en la Tabla 2.9, se comparan la exportación anual de cultivos de grano respecto a *Eucalyptus dunni* (Hernández, 2015). Se aprecia que la variabilidad es grande, incluso para igual cultivo.

Plantaciones a término 10 años	Árboles ha ⁻¹	Biomasa tn.ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg
			Kg ha ⁻¹				
E. grandis	1030	189	117	9	80	284	32
E. globulus	970	107	44	5	35	138	26
E. maidenii	1050	199	91	13	65	322	49
E.dunni	1200	144	132	19	86	240	98
Promedio Eucalyptus	1063	160	96	12	67	246	51
Pinus taeda (15 años)	200	190	157	31	56	106	35

Tabla 2.8 Exportación absoluta de nutrientes en madera comercial de *Eucalyptus sp.* y *Pinus taeda* (adaptada de Hernández, 2015)

		N	P	K	Ca	Mg
	Biomasa tn.ha ⁻¹ .año ⁻¹	Kg ha ⁻¹ .año ⁻¹				
Alfalfa	10	200	20	170	125	24
Maíz planta entera	20	260	46	172	31	31
Maíz grano	10	150	27	37	2	9
Trigo grano	3	56	13	14	1	7
Soja	2,5	128	13	39	7	6
Eucalyptus dunni biomasa total	28	55	6	52	166	27

Tabla 2.9 Exportación anual de nutrientes en cultivos respecto a *Eucalyptus dunni* (adaptada de Hernández, 2015)

Consecuentemente, estas tablas tienen un valor de referencia si es que se plantean fertilizaciones basadas en lo que los cultivos extraen o exporta. Al respecto Hernández (2015) haciendo referencia a especies forestales, señala que la diferencia entre la oferta del suelo en nutrientes asimilables y la demanda de las plantas, varía entre sitios, por lo cual **no existe una "receta" de fertilización**. No es posible utilizar un criterio de fertilización y ajustarlo para otras situaciones, siendo necesario desarrollar pautas para cada condición. Esto último es también válido para todos los cultivos, pero adquiere particular importancia en ambientes donde las restricciones edáficas más importantes no es la baja fertilidad química o si así fuese, su origen se debe a causas más complejas, tal como *hidromorfismo u otras condiciones de abastecimiento*.

No obstante, el balance de nutrientes es una herramienta útil en todos los sistemas productivos y especies vegetales, incluso como punto de partida para profundizar otros estudios que en general son escasos en muchas especies vegetales y ambientes. En el caso particular de las especies vegetales perennes, capaces de extraer nutrientes a diferentes profundidades, con momentos variables de cosecha o corte, el balance adquiere particular importancia.

Gallardo Lancho (2016) presenta resultados en diferentes sistemas productivos (pastoriles, agrícolas, forestales, agroforestales y silvopastoriles) sobre el reciclaje de nutrientes y el manejo de la materia orgánica. *Cada especie vegetal y sistema productivo tiene particularidades que deben ser consideradas para entender y manejar la nutrición de las plantas en los diferentes tipos de suelos y ambientes.* Al respecto, cabe destacar a modo de ejemplo, que los suelos dedicados a la **forestación** suelen ser suelos con restricciones edáficas de variado tipo. Este es el caso de los *suelos rojos tropicales*, con pH muy ácido, baja fertilidad química y alto contenido de Al^{+3} y Mn^{+2} , es entonces la disminución de elementos tóxicos y aumento de pH lo que modifica el nivel de extracción de nutrientes y rendimiento del cultivo

Hernández (2012), Rojas Restrepo (2015) presentan diferentes experiencias donde analizan el reciclaje de nutrientes en **plantaciones forestales** en función del sistema de tala, quema, especies arbóreas y suelos. Encuentran así diferentes balances que incluyen las pérdidas de nutrientes por exportación, por la quema de residuos, erosión y lavado. En la Tabla 2.10 se presenta la extracción de nutrientes por cosecha de *Eucalytus maidenii* de 10 años (1050 árboles por ha) sobre un suelo Argiudol. Se obtuvo que el 70% de la biomasa producida fue exportada como madera, y sólo el 30% de los nutrientes en promedio se mantiene en el ecosistema (reciclaje). En la Tabla 2.11 se presenta el contenido de nutrientes remanentes en el mantillo forestal en la cosecha y luego de 2 años de descomposición (Hernández, 2015).

		N	P	K	Ca	Mg
	Biomasa, tn.ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				
Madera	199	91	13	65	322	49
Restos	78	296	17	359	1618	139
total	277	387	30	425	1939	188

Tabla 2.10 Extracción de nutrientes por cosecha de *Eucalytus maidenii* de 10 años (1050 arb.ha⁻¹) sobre un suelo Argiudol (adaptada de Hernández, 2015)

				N	P	K	Ca	Mg
	Año	Biomasa, tn.ha ⁻¹	C tn.ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹				
<i>Eucalyptus dunnii</i>	0	18	9	114	8	34	357	28
	2	8	4	105	7	9	232	11
<i>Pinus taeda</i>	0	14	7	113	6	14	61	8
	2	11	5	118	1	4	33	4

Tabla 2.11 Nutrientes remanentes en el mantillo forestal en la cosecha y luego de 2 años de descomposición (adaptada de Hernández, 2015)

Rojas Restrepo (2015) cita diversos autores quienes indican que la hojarasca foliar es el responsable de cerca del 80% de la cantidad total de nutrientes retornados al suelo por los árboles. Sin embargo, diversa bibliografía muestra marcadas diferencias entre especie vegetal, manejo, y ambiente (Hernández *et al.*, 2012; Gallardo Lancho, 2016). En forestación, Rojas Restrepo (2015) destaca a fin de estudiar el reciclaje de los nutrientes, que es importante estudiar y entender su movimiento a través del suelo, comportamiento de la infiltración y patrón de lluvias, relacionándolo con el dosel del sistema forestal y con la hojarasca que cubre el suelo. Así por ejemplo, este autor estudia plantaciones de *Quercus humboldtii*, *Pinus patula* y *Cupressus lusitánica*, encuentra que el *Pinus patula* muestra mayor producción de hojarasca y por ende es el que más bioelementos regresa al suelo, sin embargo, hay un bajo retorno al suelo del fósforo (P) a través de la hojarasca, que resulta insuficiente para suplir la demanda de este elemento por los árboles.

Lo expuesto son sólo algunos de los ejemplos que la extensa bibliografía muestra sobre movimiento de nutrientes, lavados, y extracción por parte de la vegetación. En todos los casos, el **profesional debe conocer el sistema suelo-agua-planta-ambiente**, a fin de definir manejos, no siendo en ningún caso suficiente conocer la especie vegetal en producción.

La acidificación por **extracción continua de cationes sin reposición** se constituye en una de las principales causas de acidificación de los suelos de la Pradera Pampeana. Tal como se analiza a continuación, no se reponen los cationes contenidos en los granos (Figura 2.6 y 2.7) por lo cual se desbasifica el suelo. La acidificación por aplicación de fertilizantes nitrogenados, si bien puede tener importancias locales, no es algo que suceda a nivel general en cultivos extensivos.

Respecto a la acidificación que producen las especies forestales, los estudios son muy escasos y en general la mayor parte se centran en plantaciones forestales tropicales húmedas (Hernández *et al.*, 2012). Autores en Hernández (2015) muestran los cambios en la composición química como consecuencia de la forestación con *Eucalyptus globulus* de 10 años respecto a una pastura, en un suelo definido para Uruguay como perteneciente al grupo CONEAU 2 (tipo de suelo y condiciones productivas) en un promedio de 7 sitios, encuentran una disminución de pH de sólo 0,2 unidades y un aumento de 0,82 cmol.kg⁻¹ de Al. Cabe destacar que una diferencia de 0,2 unidades de pH puede ser atribuida a la precisión del procedimiento de medición y/o variabilidad de las muestras, no siendo posiblemente una variación significativa. Asimismo, según el rango de pH en que se esté evaluando el cambio debido al manejo será diferente su interpretación (por ejemplo, si varía de 6,0 a 6,2 carece de importancia).

En la Figura 2.6 se presenta la relación entre la aplicación/remoción de nutrientes N, P, K y S por los cultivos extensivos de Argentina durante el período 1993-2012 (García y González Sanjuan, 2013 y González Sanjuan *et al.*, 2013).

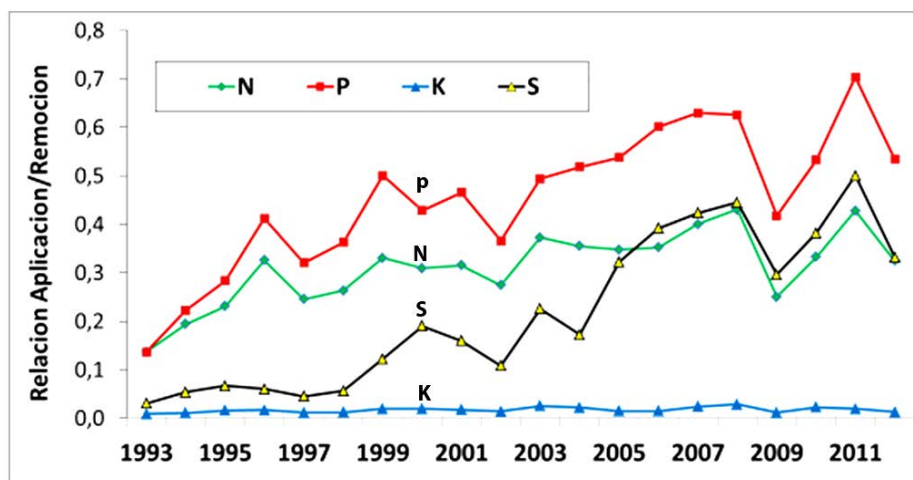


Figura 2.6 Relación entre la aplicación/extracción de N, P, K y S en Argentina en cultivos extensivos, período 1993-2012 (extraída de García y González Sanjuan, 2013)

En 20 años (1993-2012), se aprecia que hay una extracción mayor que la reposición, y que hubo 5 caídas importantes en el consumo de fertilizantes. Consecuentemente, se agudizó en estos años el desbalance entre la salida de miles de kg de nutrientes con las cosechas y su reposición, afectando los rendimientos, eficiencia en el uso del agua y luz según señala Darwich (com pers). Este autor atribuye lo señalado para el periodo considerado (hasta 2013) las siguientes causas: *aumento de la relación de precios insumo/producto, sequías, falta de financiación para la compra de insumos, y principalmente, falta de reglas claras para la comercialización de los granos.*

En relación a los nutrientes Ca^{+2} y Mg^{+2} , en general no son considerados en los esquemas de fertilización, apreciándose un aumento en la aplicación de Ca^{+2} aunque siempre en una cantidad muy inferior a la exportación (Figura 2.7, modificada de Sainz Roza, 2013). Darwich (com pers) indica que el aumento en la aplicación de Ca^{+2} fue debido al aporte de S como CaSO_4 . En el caso del K^+ , tal como se aprecia en la Figura 2.7, su aplicación ha sido despreciable en todo el periodo considerado.

En la Figura 2.8 se presenta la **reposición de nutrientes para los principales cultivos**, durante el período 2008-2012. Si bien en todos se repone menos de lo que extraen, claramente el **trigo** es el que presenta mejor situación, con marcadas disminuciones en 2010-2011, y en el otro extremo, se aprecia el cultivo de **soja** con una prácticamente ausente reposición. Esta es **una** de las causas por las cuales, el abandono de las rotaciones con trigo, ha generado degradación manifiesta de tierras. Aspectos semejantes pueden indicarse respecto a otros cultivos. En FAO (2004) se realiza un estudio muy completo sobre el uso de fertilizantes en la Argentina incluyen características, formas de aplicación, cultivos, por regiones, deficiencias, etc.

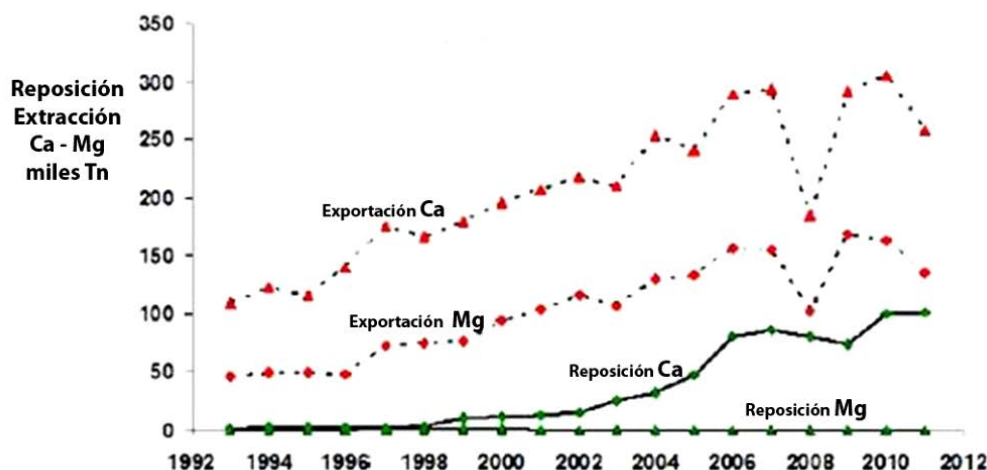


Figura 2.7 Extracción y reposición de Ca^{+2} y Mg^{+2} en los suelos cultivados de Argentina, período 1993-2011 (modificada de Sainz Rozas, 2013)

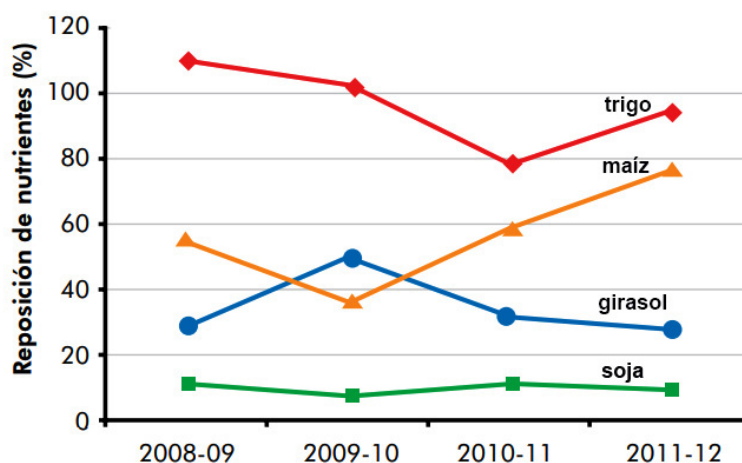


Figura 2.8 Evolución de la reposición de nutrientes en los principales cultivos entre 2008 y 2012 (modificada de Gonzalez Sanjuán *et al.*, 2013)

Si bien para la campaña 2017/18, se indican aumentos en la reposición de la nutrición de un 41% a nivel nacional (respecto a 2014/15), estos se refieren a los nutrientes N, P, y S para los cultivos principales (trigo, maíz, girasol, soja y cebada). Se destaca que en parte, las mayores fertilizaciones se debieron a una mayor superficie de trigo y maíz (cultivos que normalmente reciben mayores fertilizaciones). Sin embargo, los fertilizantes que se utilizaron en las últimas campañas, tal como normalmente se realiza, fueron: *úrea*, *fosfato monoamónico*, *fosfato diamónico* y en menor medida *superfosfato simple*, este último principalmente para aportar S (12%), aunque también aporta P_2O_5 (20%), y Ca (20%). Consecuentemente, en términos generales sigue siendo insuficiente la reposición de nutrientes, las fuentes que se utilizan son en gran parte acidificantes por aporte de H^+ (punto 2.2.6) y

no se reponen los cationes extraídos por los cultivos tal como Ca, Mg, K, que también genera la acidificación del suelo.

Las figuras precedentes explican la degradación de tierras debida a una progresiva *desbasificación* y *acidificación* del suelo, con *pérdida de estructura* por extracción sin reposición de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} . Esta degradación se asocia a otras, tal como, la erosión con disminución de rendimientos, y al incremento de lo que actualmente se denomina “costo oculto”. **Costo oculto**, representa el costo de los nutrientes que se exportan con las cosechas y que deberán ser re-puestos en el futuro en los casos que no hayan generado degradaciones mayores, y consecuentemente sea suficiente reponerlos, o asumir el menor rendimiento futuro. En los últimos años, los sistemas de producción con tierras arrendadas, y monocultivo de soja agudizo el problema comentado.

García y Díaz-Zurita (2015) cita a Sainz Rozas et al. (2011) quienes analizan en la región pampeana 613 muestras de suelos con agricultura y 568 muestras bajo condiciones prístinas. Estos autores encuentran disminuciones entre el 20 y 40% en el contenido de materia orgánica (MO, condición prístina 4% y con agricultura 2,9%), y en un 4,2% en el pH promedio entre la condición prístina (pH 6,87) y con agricultura (pH 6,58). Atribuyen esta disminución de pH a un menor contenido de bases de Ca, Mg, K por extracción por los cultivos, pérdidas por lavado y en menor medida al uso de fertilizantes amoniacales. Respecto a los cambios en el pH caben los mismos comentarios efectuados precedentemente, debe establecerse la significancia y efectuar la correcta interpretación de dicha variación en términos del método, suelo y la planta.

Por el contrario, las prácticas de manejo que tiendan a incrementar o mantener los cationes alcalinos y alcalino-térreos, tales como mantener la estructura, cobertura vegetal, evitar la erosión, efectuar rotación de cultivos, y utilizar fertilizantes en forma controlada, impide la acidificación progresiva debida a la desbasificación.

2.2.9 Drenaje del suelo

Puede conducir a diferentes efectos dependiendo el tipo de suelo y ambiente donde dicha práctica se realiza. Por ejemplo, pueden incidir sobre los **procesos rédox** por oxidación rápida de ciertos minerales de hierro y azufre, tal como con la pirita (FeS_2). Este mineral está presente en suelos con drenaje deficiente, y ante mejoras del drenaje se oxida rápidamente dando H_2SO_4 . Estos suelos no son muy frecuentes y se los denomina suelos de sulfatos ácidos (Figura 2.2 primer tramo).

Mejoras en el drenaje de ambientes con excesos hídricos buscan disminuir la incidencia de los excesos de agua sobre los cultivos, sin embargo, es frecuente incidir en la reacción del suelo al modificar el régimen hídrico y el balance de sales (se desarrolla detenidamente en Capítulo 3).

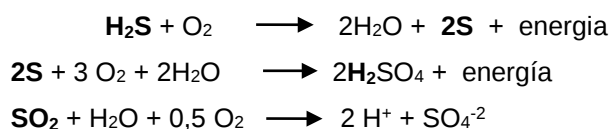
2.2.10 Deposición de contaminantes atmosféricos

La acidificación proveniente por los contaminantes atmosféricos, son las que se producen por la deposición de ácidos diluidos en la lluvia y en deposiciones secas que al hidratarse y oxidarse en el suelo lo acidifican. Actualmente existen muchas controversias sobre el efecto de la quema de residuos fósiles sobre la acidez de la lluvia (lluvia ácida: formación de ácido nítrico, sulfúrico y sulfuroso, por el aporte de dióxido de azufre, SO_2 y óxidos de nitrógeno, NO_x , con la humedad del aire), siendo muy variables los incrementos de acidez que se producen. Por ejemplo: Wild (1992) indica que en Gran Bretaña, se acumulan en el suelo entre 1 y 4 kg de $\text{H}^+ \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ a partir de la deposición seca y húmeda, en USA y otras partes del mundo los valores son mucho menores.

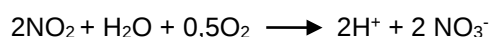
En términos generales, el agua de lluvia tiene un pH de aproximadamente 5.6 (ligeramente ácido), debido a la presencia del CO_2 atmosférico, que forma ácido carbónico, H_2CO_3 . Cuando se indica que la lluvia es ácida, es que el pH ha disminuido a valores próximos a 5 o inferiores, incluso hasta 3. Si bien la acidificación puede tener un origen natural, como la producida por volcanes, la acción antrópica en algunos sitios ha sido su principal origen.

El azufre atmosférico se encuentra como **SO_2 y H_2S** , y proviene en promedio en un 70% de volcanes, pantanos, y materia orgánica en descomposición, y un 30% por acción del hombre (quema, petróleo, alquitrán contaminación). Se estima que puede haber un aporte de S por lluvia de $1 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en zonas rurales y $100 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en zonas altamente industrializadas (Wild, 1992). Este S atmosférico puede ser en parte absorbido por las plantas o pasa al suelo donde es incorporado en la materia orgánica. El H_2S contenido en la materia orgánica por oxidación se transforma en S elemental y luego en ácido sulfúrico. Se produce acidificación del medio, al igual que con el agregado al suelo de S elemental como enmienda. En ausencia de oxígeno se reduce el SO_4^{2-} , las bacterias utilizan el O del SO_4^{2-} como aceptor de electrones de la oxidación de la materia orgánica. Los *productos finales* más importante son: H_2S , junto con *sulfuros orgánicos: etil y butil sulfuro*, que dan olor desagradable y acidez. En inundación, se acumulan formas reducidas de H_2S , FeS , FeS_2 . Todos estos procesos son llevados a cabo por microorganismos (Wild, 1992; Mengel y Kirkby, 2000).

En aerobiosis



El N atmosférico como NO_2 en el suelo en presencia de agua y oxígeno se oxida a nitrato generando H^+ que acidifican el medio (Mengel y Kirkby, 2000).



Se aprecian entonces que con el S y el N atmosférico, hay dos vías de acidificación, directamente en el agua de lluvia, o una vez incorporado en el suelo según ocurran procesos de oxidación o reducción.

2.2.11 Agua de riego

La calidad físicoquímica del agua depende de su origen, cuerpos de agua superficial, ríos, arroyos o subterránea. Asimismo, estas varían dependiendo del sitio donde se han originado. En general, presentan un pH superior a 7, próximo a 8 o mayores con más frecuencia en las aguas subterráneas. En todos los casos, aún con agua de buena calidad el riego (Ayers y Wescot, 1985) genera un paulatino incremento del pH en el suelo. Esto también se asocia al tipo de cationes y aniones que contenga el agua (RAS), y características del suelo a regar (Ayers y Wescot, 1985; Porta *et al.* 1994; Pla Sentis, 1997). Por ejemplo, aguas bicarbonatadas sódicas con pH próximo a 8 son frecuentes en la región del Gran La Plata, producen alcalinización del suelo (Capítulo 3). Prácticas que incluyen mejoras en el drenaje, lavado de suelos con agua de lluvia (pH próximo a 5,5), y uso racional de enmiendas inorgánicas e inorgánicas, modifican el pH del suelo.

2.3 Poder regulador de los suelos

La reacción del suelo frente a acciones que acidifican o basifican el medio depende del *poder regulador*, *buffer* o *tampón* de los suelos. Este está determinado por las características del complejo de cambio y se define como la resistencia que el suelo presenta al cambio de pH debido a la adición de iones H^+ u OH^- . Un suelo con buen poder regulador es aquel que no tiene cambios bruscos de pH ante la adición de productos de carácter ácido o básico, o ante otra perturbación causada por el hombre o la naturaleza.

El agregado de cantidades crecientes de un **ácido** (H_2SO_4), o una **base** ($NaOH$, $Ca(OH)_2$ o (OHK)) a la suspensión de suelo permite confeccionar las **curvas de calibración** (*titulación o neutralización*) que definen y/o caracterizan el poder regulador o buffer de dicho suelo. Si pequeños agregados conducen a ligeros cambios de pH, su capacidad reguladora es **alta**. Por el contrario, si pequeñas adiciones provocan cambios bruscos, su capacidad reguladora es **baja**. Consecuentemente, la pendiente de la curva está inversamente relacionada con la capacidad amortiguadora del sistema.

Poder regulador se mide por **“la cantidad de base o ácido consumida por unidad de peso o volumen de suelo para subir una unidad de pH en la solución en equilibrio con el suelo”**.

Cabe destacar que la **interpretación de las curvas** obtenidas en laboratorio, se hace considerando las diferentes fuentes de acidez o alcalinidad que predominan en un suelo a un determinado rango de pH (Figura 2.2). Esto significa que el agregado de una base o ácido será

diferente para un mismo suelo según el rango de pH en que se encuentra, y fuentes presentes, tal como se explicó precedentemente y se amplía a continuación en relación al efecto de la materia orgánica.

El *humus forma con las arcillas* complejos organo-minerales (coloides del suelo con capacidad de intercambio catiónica) que dan gran poder regulador, y permite que las variaciones de pH sean lentas ante agregados de un ácido o una base: *actúa como un medio tamponado*, y constituye una protección frente a modificaciones bruscas de pH. Este poder regulador es *mayor frente a los álcalis y algo menos efectivo frente a los ácidos*, ya que como se comentó, los coloides son fuente de acidez del suelo. Asimismo, el poder tampón aumenta con el *contenido de arcilla* y con el de *materia orgánica*, así como por el tipo de arcilla (de caolinita a esmectita, menor a mayor CIC respectivamente) (Porta *et al.*, 1994).

Esta propiedad reguladora, contribuye a disminuir los efectos de un abonado sobre la reacción del medio, pH. Por otra parte, la capacidad tampón de un suelo, se relaciona también con la capacidad del suelo de actuar como “*depurador natural*”, esto es, de actuar como *filtro ambiental* o como receptor de residuos orgánicos o aguas residuales, sin ocasionar contaminación de aguas subterráneas. A continuación, se presentan ejemplos:

Poder regulador del horizonte superficial de un *Argiudol típico* (Figura 2.9)

pH que resulta con el agregado de **H₂SO₄** N/20 en relación 1:2,5 (10gr:25ml):

pH actual	1	2	3	4	5 ml
6,5	6,2	6,0	5,8	5,5	5,1

pH con el agregado de **OHK** N/20 en relación 1:2,5

pH actual	1	2	3	4	5 ml
6,5	6,8	7,1	7,5	7,7	8,0

En la Figura 2.9 la variación del pH es suave, por lo tanto es un suelo con buen poder regulador. En la Figura 2.10 la curva también resulta suave, pero se observan plataformas a determinados valores de pH debido a una mayor capacidad tampón en dichos valores. En este caso a pH 7 el tamponamiento se debe a la presencia de CaCO₃ en las muestras, mientras que a pH 4-5 se debe a las bases de intercambio. **CNA**: capacidad de neutralización de un ácido: expresa la cantidad de ácido fuerte (moles de protones por unidad de volumen o de masa) necesarios para cambiar el pH de un sistema acuoso al pH al cual la carga neta de los iones que no reaccionan con H⁺ u OH⁻ es cero. La derivada de CNA con respecto al pH define el poder tampón (Porta *et al.*, 1994).

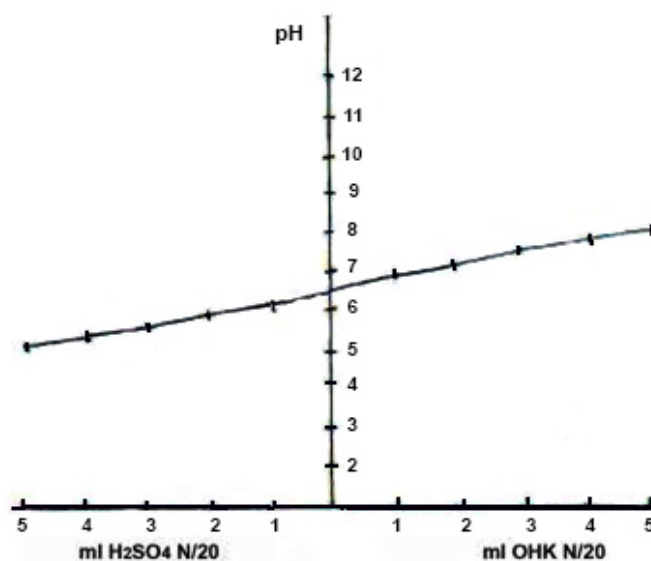


Figura 2.9 Representación gráfica de la curva del poder regulador de suelo *Argiudol* típico

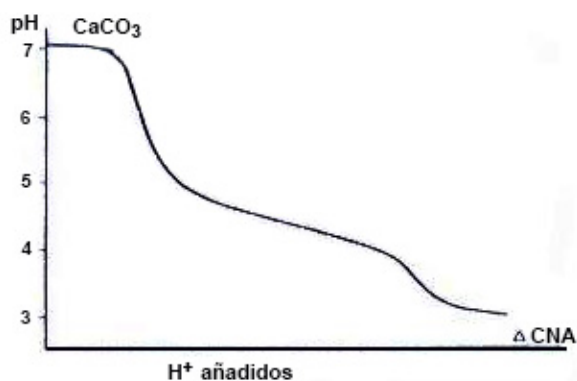


Figura 2.10 Suelo calizo con agregado de un ácido (modificada de Porta *et al.*, 1994)

2.4 Formas de medir la reacción del suelo

Los métodos para medir la reacción del suelo pueden ser: *Colorimétricos*, *Potenciométricos*, *Curvas de Neutralización*, *Potenciales catiónicos*, *Potencial cal*, *% de Aluminio intercambiable*. En esta publicación se presentan los dos primeros métodos mencionados, recomendándose para el resto de procedimientos de estudio consultar Wild (1992), Bohn *et al.* (1993); Adams (1995); Molina (1998); Espinosa y Molina (1999), Porta *et al.* (1994), Jaramillo (2002); entre otros.

2.4.1 Métodos colorimétricos

Se utilizan para estimar la reacción del suelo a los **indicadores** de pH. Estos son compuestos de peso molecular elevado, que tiene la propiedad de cambiar de color cuando varía la concentración de iones hidronio. Existen muchos indicadores que cubren las dos ramas de la

escala de pH con diferente amplitud del rango de pH que incluye. Estos *métodos colorimétricos* se utilizan por lo general en el campo y no son tan precisos como los potenciométricos, ya que miden con una precisión de aproximadamente 0,5 unidad de pH.

A modo de ejemplo se presenta el uso del *reactivo universal* y la *fenolftaleína* (Figura 2.11, com. pers. Jorge E. Giménez). Procedimiento: en primer término se utiliza el *reactivo Universal* que cubre un rango amplio de pH (5 a 8), en función del pH que resulta, se utiliza un segundo indicador que permite precisar el pH en un rango específico. Si el pH resulta alcalino (próximo a 8), puede utilizarse la *fenolftaleína* que permite dar una estimación del pH en el rango de la alcalinidad (8,3 a 10).

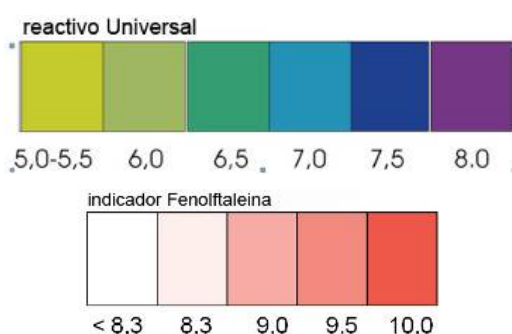


Figura 2.11 Escala de colores utilizando el reactivo Universal y la fenolftaleína (elaboradas por Jorge E. Giménez)

2.4.2 Métodos potenciométricos

Es de uso generalizado en laboratorios, y actualmente también en mediciones a campo, debido a la gran cantidad de modelos que existen a costos muy variables. Son más precisos (miden con aproximación de 0,1 unidad de pH, dependiendo del modelo) y se basan en la medición de la actividad iónica de los iones H^+ ó H_3O^+ en suspensiones de suelo en agua o en electrolitos débiles, contra un electrodo de referencia que generalmente es de vidrio. El electrodo de vidrio que actualmente se utiliza, contiene dos electrodos en un sólo cuerpo; el electrodo de platino y el de referencia de plata (cloruro de plata). Se introduce el pehachímetro en el medio a medir, y se registra la diferencia de voltaje que se genera entre los dos electrodos. En el caso del suelo, debe prepararse una pasta o una suspensión a fin de permitir el contacto eléctrico.

La *calibración* de los pehachímetros reviste gran importancia, para ello se recomienda seguir las instrucciones del fabricante de cada aparato, generalmente se utilizan soluciones buffer de pH conocido. La calibración, debe realizarse cada vez que se inicia una jornada de mediciones de pH. A fin de efectuar la medición, se debe preparar las *muestras de suelo* en forma estandarizada, a fin de eliminar la incidencia de las condiciones de campo (estructura del suelo, contenido de humedad, porosidad, etc.). En mediciones a realizar en laboratorio, se utilizan muestras de suelo secas al aire y a la sombra, se muelen por medio de rodillos o trituradores y se tamiza por 2 mm.

Pueden adoptarse diferentes procedimientos estándares que utilizan agua o bases, en diluciones variadas dependiendo del objetivo y del rango de pH en que se encuentra el suelo. En términos prácticos se *acepta que el pH del suelo está definido por el método usado para su medida*, consecuentemente la interpretación debe ser realizada considerando dicha metodología.

A continuación, se indica los **tipos de acidez (pH)** que pueden medirse, que como se indicó, variará en función del **medio de dilución** (agua o base), así como por las **proporciones suelo: diluyente**. Los métodos potenciométricos más generalizados miden *tres tipos de acidez*: Acidez activa (pH actual o hidrolítico), Acidez potencial (Intercambiable) y Acidez Total.

Acidez activa (pH actual - pH hidrolítico)_. Actividad de H^+ y OH^- libres que resultan de la disociación en equilibrio con la solución del suelo. La acidez evaluada es la **no intercambiable**, y puede provenir de *polímeros hidratados de aluminio*, de protones de *grupos funcionales orgánicos débilmente ácidos* ($R-COOH$), del desplazamiento de *aniones adsorbido* ($H_2PO_4^-$ adsorbidos a hidróxidos de aluminio, llamada por Mehlich como la acidez debida a aniones) (Bohn *et al.*, 1993).

Según la proporción **suelo:agua** utilizada se obtienen diferentes medidas empíricas del pH. El **pH actual**, se obtiene en proporción **suelo:agua 1:1 o 1:2,5** (g de suelo: cm^3 de agua). El pH se mide introduciendo los electrodos en la suspensión agitada luego de unos minutos de mezclar (Jackson, 1963, SAMLA, 2018).

Cuando la dilución con agua es mayor, relaciones **1:5** y hasta **1:10**, se lo denomina **pH hidrolítico**. El aporte de agua cambia la concentración de hidrógenos en la solución del suelo, y el pH sube. Esto se conoce por “*efecto de dilución o de la suspensión*”. Así por ejemplo, para un suelo con un pH 7,45 con 10 $ml.100^{-1}$ g de suelo, 7,7 con 100 $ml.100^{-1}$ g de suelo y 8,15 con 1000 $ml.100^{-1}$ g de suelo.

Se aprecia entonces, que la proporción entre el suelo y agua modifica el valor de pH, cuando menor es la proporción de agua en relación al suelo, menor es el valor de pH obtenido. El *pH aumenta* en el siguiente orden de relación **suelo: agua** (Adams, 1995):

$$pH \text{ en pasta saturada} < pH \text{ 1:1} < 1:2 \dots < 1:5$$

Adams (1995) señala que el valor de pH se estabiliza a partir de la proporción volumétrica suelo: agua 1:5. Esto se explica por la **hidrólisis de sales de Na^+ y Ca^{+2}** , luego de su *disolución* en agua.

A continuación, se explica muy sintéticamente. Al inicio de este Capítulo (punto 2.2.1) se efectuaron algunas explicaciones que completan este tema. Asimismo, puede consultarse Cedrón *et al.* (2011) o en los materiales escritos de Química inorgánica de la FCsAg y Fs, UNLP.

Según el **ácido** y la **base** de las cuales provenga una **sal**, se producirán al disolverse reacciones de *hidrólisis* que generan H^+ u OH^- , según tengan reacción ácida o básica al hidrolizarse, mientras que otras, no se hidrolizan debido a que son **sales neutras**, tal como el **NaCl**. En la Tabla 2.12 se presenta un esquema sobre el carácter de la sal en función del tipo de ácido y base de la cual proceden dichas sales, y el pH que generan en el medio.

ACIDO	BASE	Carácter de la SAL	pH aproximado
Fuerte	Fuerte	Neutra	7
Fuerte	Débil	Ligeramente ácida	5
Débil	Fuerte	Ligeramente básica	9
Débil	Débil	Neutro	7

Tabla 2.12 Carácter de la sal en función del tipo de ácido y base que la forma, y el pH que generan en el medio por disociación e hidrólisis (extraída de <http://www.panreac.es/spanish/practicas/p37.pdf>)

En la Figura 2.12 se presenta un esquema de reacciones a partir de las sales de reacción ácida y básica. Se explica a continuación:

La sal se ioniza completamente en disolución:

- Si el *ácido era débil* el **anión se hidroliza**, regenerando el ácido y suministrado OH^- que explica el carácter básico (ácido débil y base fuerte).
- Si la *base era débil* el **cation se hidroliza**, regenerando la base y suministrando H^+ que dan el carácter ácido. Ambas reacciones tienen una *constante llamada de hidrólisis*.

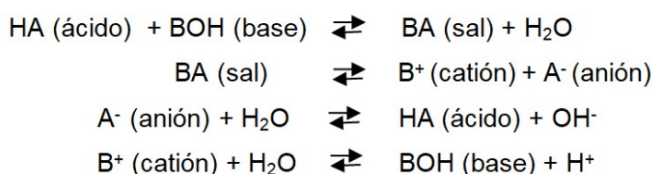
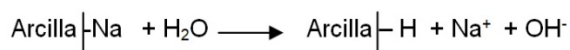


Figura 2.12 Esquema de reacciones a partir de sales de reacción ácida y básica
<http://www.panreac.es/spanish/practicas/p37.pdf>

En estas reacciones de disolución, hidrólisis, e intercambios catiónicos posteriores, se producen aumentos de pH, sodicidad y alcalinización. Esto depende de la concentración de sales de tipo **carbonato y bicarbonato de sodio** capaces de tener hidrólisis alcalina. Junto a estas sales de base fuerte **NaOH** y ácido débil (**H₂CO₃**), existen importantes cantidades de **sales sódicas neutras** carentes de propiedades alcalinizantes (principalmente **cloruros y sulfatos**) y sales de calcio y magnesio (Universidad de Granada, 2008).

Una situación especial en las variaciones del pH medido según la proporción de *suelo: agua* utilizada se produce en suelos calcáreos. En los **suelos calcáreos** el pH está controlado por las reacciones del carbonato cálcico, el agua y el dióxido de carbono. El aporte de agua provoca que el **CaCO₃** se disuelva, al principio el pH sube al progresar la disolución, y luego cae conforme aumenta el contenido de CO₂ por la actividad microbiana, consecuentemente, el *pH medido en estos suelos cambia con el tiempo*, y a menudo es menos reproducible que en los suelos ácidos.

Asimismo, donde está presente **Na₂CO₃**, y **Na⁺** intercambiable, la adición de agua causa la **disociación del Na⁺** desde la superficie de los coloides, con la consiguiente suba del pH:



Las superficies cargadas con Ca^{+2} también se disocian por la adición de agua pero en mucho menor grado que el Na^{+} , debido a la competencia del Ca^{+2} y H^{+} que se produce en la superficie de intercambio en suelos con alta proporción de cargas negativas que puede conducir a una adsorción preferencial del Ca^{+2} y liberación de H^{+} (Wild, 1992, Porta *et al.*, 1994).

Cabe señalar que otro efecto puede producirse en **suelos calcáreos** debido a la adición de CaCl_2 . Esto implica añadir el *ión común* Ca^{+2} , lo cual *incide en la disolución* del CaCO_3 , incrementándose el Ca^{+2} en solución y consecuentemente, disminuye la concentración de carbonatos, lo que conduce a una nueva disminución del pH. Sin embargo, la disminución que se produce no es predecible ya que el equilibrio no se consigue en los cortos períodos de un análisis de rutina.

Asimismo, en **suelos sódicos** pueden producirse caídas de pH que tampoco son predecibles cuando se utiliza soluciones salinas como diluyente. En estos suelos, a fin de medir la reacción del mismo, en el análisis de rutina se recomienda la medición de pH en una **pasta saturada con agua destilada**. Igualmente, este procedimiento resulta conveniente en **suelos salinos** ya que en estos, la estabilidad del pH frente al agregado de agua resulta muy difícil de alcanzar, y explica con frecuencia la alta variabilidad en el pH entre repeticiones de igual muestra. Lo comentado en punto 2.2.8 respecto a que variaciones de 0,2 unidades de pH pueden no tener importancia, hace también referencia a lo indicado en este párrafo. Algunos de estos aspectos sobre efecto de la dilución-hidrólisis en suelos afectados con sales se amplían en el Capítulo 3.

Acidez potencial o de cambio (pH Potencial)_. Es la *acidez intercambiable* dada por los monómeros de aluminio o hierro, y por el hidrógeno intercambiable, que no se encuentran presentes en la solución del suelo (Porta *et al.*, 1994). Sin embargo, como se mencionó, normalmente el H^{+} intercambiable sólo está presente en valores de **pH < a 4**. Por lo tanto, el H^{+} intercambiable, es de interés en materiales sumamente ácidos, desechos mineros o suelos sulfato ácidos. De igual manera, el Al^{+3} intercambiable sólo está presente con **pH < a 5,5** (punto 2.1.3 y 2.2.3)

Entre **pH 5,5 y 7**, si bien puede considerarse que la *acidez intercambiable es nula*, puede presentarse un intercambio protónico directo efectuado por grupos carboxílicos muy débilmente ácidos, por la mayoría de los grupos fenólicos de la materia orgánica, y de algunos protones débilmente ácidos ubicados en los bordes de los minerales (Bohn *et al.*, 1993).

Bohn *et al.* (1993), definen a la *acidez intercambiable*, como “*aquella que se intercambia con una solución salina neutra no regulada, como el KCl o CaCl_2* “. En términos prácticos el *pH potencial* se define como el que resulta en la suspensión luego de desplazar parte del Al^{+3} - H^{+} intercambiable con solución de **KCl 1 M** no tamponada con una proporción *suelo:solución salina* de 1:2,5, y resulta generalmente en un menor valor de pH que el que se obtendría con igual relación en agua.

La sal de **CaCl₂ 0,01-0,02 M** en proporción *suelo:solución* 1:2 es también utilizada para medir el pH potencial o acidez intercambiable. Esta sal se ha difundido en la evaluación de pH de suelos ácidos o neutros de zonas templadas ya que altera menos que otras sales las condiciones de la capa difusa del suelo, y consecuentemente el pH real de la solución edáfica en los poros (Wild, 1992). Respecto a esta sal, Adams (1995) indica que permite obtener un pH más estable, poco sensible a la relación suspensión, tal como no sucede con el agua. Consecuentemente, disminuye el *efecto de la dilución*.

Mediante el uso de estas sales neutras, el **Al³⁺** e **H⁺** que se concentran cerca de la superficie de los coloides, son intercambiados por los cationes solubles agregados (**K⁺** o **Ca²⁺**), los cationes desplazados a la solución compensan el efecto de dilución, y produce una disminución del pH. Por otra parte, al pasar el **Al³⁺** a la solución sus iones pueden hidrolizarse y disminuyen aún más el pH. En un mismo suelo, el pH medido con **KCl** resulta menor que con **Cl₂Ca**.

Se produce entonces con estas **sales** una *disminución del pH medido respecto a las mismas proporciones medidas con agua*, en aproximadamente 0,5-1,5 unidades de pH, dependiendo no sólo de la sal sino también de otras condiciones del suelo (Wild, 1992), que se comentan en párrafos siguientes.

En el **pH** medido con **KCl 1N**, la disminución del pH suele ser del orden de **0,5 a 1,0** unidades respecto al **pH en agua**, siendo la diferencia menor cuanto mayor es el pH. El pH medido con **KCl 1N** es hasta **0,5** unidades menor que el medido **en solución de KCl 0,1N**. Una excepción la constituyen *suelos ricos en sesquióxidos* libres (óxidos e hidróxidos de Fe y Al, suelos con cargas positivas), donde el pH medido con **KCl 1N** es a veces *más alto que en agua*, ya que es el **ión Cl⁻** el que desplaza al **OH⁻** intercambiable.

Respecto al **CaCl₂** aunque la diferencia es en general menor, entre **0,1 y 0,2** unidades de pH más bajo que con agua, puede también producirse una disminución de hasta 0,5 unidades de pH.

En relación al uso de estas sales, se destaca que los iones **K⁺**, **Ca²⁺** y **Cl⁻**, actúan como si fuesen los de la **solución edáfica**, imitando así el **efecto salino** que se produce en forma natural en algunos suelos, debido a la presencia de *sales libres neutras* tales como el **CaCl₂** y **CaSO₄**, y que conducen a una disminución del pH. Esto es importante considerar al determinar el pH en los **suelos abonados**, ya que es frecuente la presencia de estas sales en forma libre, consecuentemente **resulta útil** en estos casos medir el **pH en suspensión electrolítica**.

En la Tabla 2.13 se presenta un ejemplo de valores de pH en función de las proporciones suelo:agua, y suelo:soluciones neutras de dos tipos (extraída de Adams, 1995). Se aprecia que si bien con el agregado de agua se produce un aumento de pH, este es menor debido a que el suelo es ácido. La hidrólisis de bases de **Na⁺** y **Ca²⁺** son las que aumentan marcadamente el pH en dilución creciente de agua. Las variaciones con la mayor dilución con sales es también pequeña pero resulta algo mayor con **KCl** en el Inceptisol.

relación	Andisol			Inceptisol		
	Agua	KCl 1N	CaCl ₂ 0,01N	Agua	KCl 1N	CaCl ₂ 0,01N
Pasta	4,7	4,1	4,1	5,9	4,2	5,0
1:1	4,8	4,2	4,1	6,0	4,3	5,1
1:2	5,0	4,2	4,2	6,1	4,4	5,2
1:3	5,0	4,3	4,2	6,3	4,4	5,2
1:4	5,0	4,3	4,2	6,4	4,5	5,2

Tabla 13 Ejemplo en dos suelos del orden Andisol e Inceptisol, del pH en función de las proporciones suelo: agua, y suelo: KCl y CaCl₂ (extraída de Adams, 2004)

Se destacan que tanto la **acidez actual** como la **potencial** aquí descriptas, miden el **factor intensidad** comentado en el punto 2.1.1 (Adams, 1995), lo que varía es la liberación de H⁺ que se genera por la proporción y tipo de disolución utilizada.

Se concluye, que el uso de **electrolitos en la medición de pH** es muy difundido en muchas partes del mundo por presentar ventajas respecto a las técnicas con agua, contrarresta el *efecto salino*, y *efecto de dilución*. Permite analizar la potencialidad de acidificación del suelo, cuando este se encuentra en rangos de pH ácido.

En la Argentina como técnica de rutina en laboratorios es más difundida la medición de pH en diluciones con agua (1:2,5), la cual no resulta adecuada cuando el suelo es muy salino debido a que resulta difícil que se establezca en un valor. Consecuentemente, en suelos **salinos y alcalinos**, resulta apropiado utilizar proporciones *suelo:agua* 1:1 o pH en pasta a fin de disminuir la variabilidad que resulta por el efecto de dilución. Esto debe ser tenido en cuenta cuando se solicita en un laboratorio una medición de pH.

El **pH hidrolítico** (diluciones en agua 1:5 - 1:10) permite evidenciar la presencia de sales de Ca²⁺-Na⁺, cuando el suelo posee un pH superior a 7. La elevación del pH frente a sales de Na⁺ es mayor que si fuesen de Ca²⁺.

Acidez total o titulable_. Se define como “la cantidad de base fuerte (OHNa o (OH)₂Ca) que se requiere para elevar el pH del suelo hasta un nivel determinado”. Esta acidez está integrada por la acidez activa más la acidez de cambio.

En su *determinación* es importante especificar el tiempo, método de agitación y período de adición de bases ya que la neutralización de la acidez del suelo depende en gran parte de las condiciones de la reacción. Se debe especificar el pH inicial y el final de la determinación, ya que variará la cantidad de base consumida según la amplitud del intervalo de pH considerado. Así, la **acidez titulable** es una medida de la **acidez total** presente entre un *pH inicial* y un *pH final*. Normalmente la titulación se lleva hasta pH 8,2 ya que es el valor que aproximadamente tiene el suelo con CaCO₃ libre en equilibrio con el CO₂ de la atmósfera. Este valor de pH también guarda relación con la neutralización completa de los compuestos hidratados de aluminio (la formación de hidróxidos de aluminio de carga cero se completa a pH mayor a 8) (Bohn *et al.*, 1993). La Figura 2.2 (punto 2.2.1), muestra los diferentes componentes del suelo que pueden estar participando en el pH medido. Esta forma de medir la reacción del suelo aunque no da información en detalle, distinción entre intercambiable y no intercambiable, **resulta útil para determinar la cantidad de cal** necesaria para elevar la reacción del suelo hasta un valor dado (encalado) (punto 2.2.6).

Se *concluye*, el pH no es una medida precisa, dependiendo del método de medida (relaciones suelo-agua, suelo-electrolitos) su valor puede variar entre 0,5 y 1,5 unidades de pH para un mismo suelo. Asimismo, para igual método pueden producirse variaciones dependiendo del tipo de sales presentes, tal como se comentó en párrafos anteriores en suelos calcáreos, salinos, alcalinos, ácidos. Consecuentemente, debe seleccionarse adecuadamente el procedimiento de medición de pH para las condiciones imperantes en el suelo. La interpretación debe ser realizada conforme al método de medida y entendiendo las desviaciones que pueden ocurrir debido a que el pH es sólo una medida indicadora de las reacciones que ocurren en el suelo.

2.4.3 Interpretación del pH

En las Tablas 2.14 se presentan interpretaciones de pH con relación 1:1 con agua y con KCl.

pH medido en H ₂ O 1:1		pH medido en KCl 1:1	
Valor	Calificación	Valor	Calificación
<3,5	Ultra ácido	< 4,0	Extremadamente ácido
3,5 - 4,4	Extremadamente ácido	4,0 - 4,9	Fuertemente ácido
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido	5,0 - 5,9	Moderadamente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	6,0 - 6,9	Ligeramente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido	7,0	Neutro
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	7,1- 8,0	Ligeramente alcalino
6,6 - 7,3	Neutro	8,1- 9,0	Moderadamente alcalino
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino	9,1 -10,0	Fuertemente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino	>10,1	Extremadamente alcalino
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalino		
>9,0	Muy fuertemente alcalino		

Tabla 2.14 Criterios de interpretación del pH en agua 1:1 (Soil Survey Division Staff, 1993 en Jaramillo, 2002) y pH en KCl 1:1 (Scheffer y Schachischabel en Fassbender, 1975)

2.5 Influencia del pH en el suelo y en la planta

2.5.1 Efectos directos sobre la nutrición de los cultivos

El pH de la solución edáfica en contacto con las raíces afecta el crecimiento vegetal de dos formas principales: **sobre la disponibilidad de nutrientes** (Figura 2.16, según sean suelos minerales u orgánicos) por defecto o exceso (precipitación-solubilidad), y **sobre los procesos fisiológicos que participan en la absorción de nutrientes** por las raíces. El pH en agua de suelos naturales se halla en el intervalo de 4,5 a 10, sus efectos principales se

presentan en la Tabla 2.15 (Porta *et al.*, 1994). Las plantas tienen un rango óptimo de pH para absorber nutrientes y donde su vigor y productividad asociada al pH es máxima. Para la mayoría de las especies vegetales cultivables el óptimo es medianamente ácido. Sin embargo, presentan cierta capacidad de adaptación dependiendo de la especie vegetal y otras condiciones del medio.

pH medido en H ₂ O 1:1:2,5		
Valor	Calificación	Efecto esperable
< 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad del Al ⁺³ y Mn ⁺²
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido	Exceso Co, Cu, Fe, Mn, Zn Deficiencia Ca, K, N, Mg, Mo, P, S Suelo sin CaCO ₃ Actividad bacteriana escasa Afecta hormigón.
5,6 - 6,0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos
6,1 - 6,5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes
6,6 - 7,3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos < 7 no hay CaCO ₃
7,4 - 7,8	Medianamente básico	Suelos generalmente con CaCO ₃ Disminuye disponibilidad de P y B
7,9 - 8,4	básico	Deficiencia creciente Co, Cu, Fe, Mn, Zn Clorosis férrica
8,5 - 9,0	Ligeramente alcalino	Pueden deberse a MgCO ₃ , si no hay Na ⁺ intercambiable Mayor clorosis férrica
9,1-10	alcalino	Presencia de Na ₂ CO ₃
<10	Fuertemente alcalino	Elevado Na ⁺ intercambiable > 15% Toxicidad Na y B Movilidad de P como Na ₂ PO ₄ Actividad microbiana escasa Micronutrientes poco disponibles excepto Mo

Tabla 2.15 Principales posibles efectos en el suelo y vegetación a los distintos intervalos establecidos por USDA (1971, en Porta *et al.* 1994)

En párrafos siguientes se analizan algunos de los efectos comentados en Tabla 2.15 según estos y otros autores.

Los **efectos perjudiciales** de la acidez sobre el crecimiento de las plantas son complejos, y no responde a una única causa. En algunos casos, la presencia en solución de *cantidades elevada de Al⁺³ y H⁺* es lo que genera efectos perjudiciales directos sobre los cultivos, en otros, esto se relaciona con la *disponibilidad de los nutrientes*. Sin embargo, como se analizó en punto 2.1.3, no es el H⁺ el que afecta directamente los cultivos, ni ocupa directamente los sitios de intercambio de las arcillas en elevada proporción.

Bohn *et al.* (1993), Jarillo (2002), indican que en el rango de la acidez se dan diferencias entre los cationes que controlan la acidez y los problemas de manejo que plantean. En general, los efectos perjudiciales de la acidez no se manifiestan hasta valores inferiores **a 5,5**. En este caso puede atribuirse a la **toxicidad del Al⁺³**, y cuando el **pH es de 4,5**, puede también deberse, al

efecto perjudicial del Mn^{+2} en las sedes de intercambio y en la solución (Figura 2.16). Así, en $pH < 4,5$ prevalece en el suelos el Al^{3+} intercambiable; con apreciable contenido y solubilidad de H_3O^+ y de Mn^{+2} ; en $pH 4,5-5,5$ prevalecen las formas intercambiables de $Al(OH)_2^+$ y Al^{3+} ; y en $pH 5,5 - 6,5$ ya no hay acidez intercambiable por lo que desaparece la posibilidad de las toxicidades mencionadas. En los **suelos orgánicos** o con muy elevado contenido en materia orgánica si bien la reacción es ácida, y normalmente más ácida que la de los suelos minerales, esta acidez es debida a la presencia *ácidos orgánicos saturados con H^+* . En algunos casos, los valores de pH de estos suelos pueden llegar a ser $<3,0$ que es cuando se produce además una oxidación intensa de *compuestos de S* en estado de reducción (Jarillo, 2002).

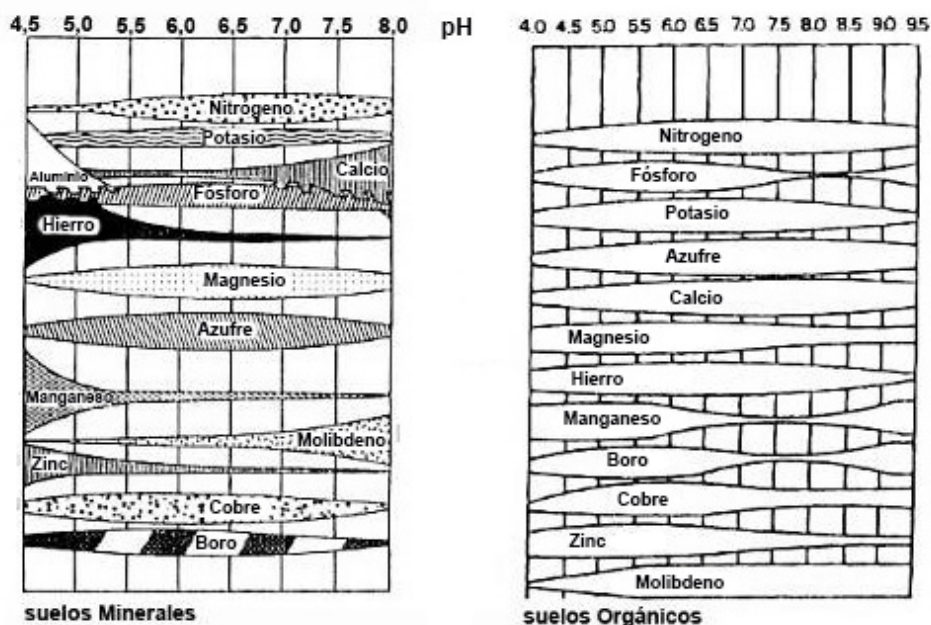


Figura 2.16 Movilidad de los elementos del suelo en función del pH en suelos minerales y orgánicos (extraída de Porta, *et al.* (1994))

Wild (1992) señala que la similitud de los efectos de **excesos de Al^{+3}** con la **deficiencia de P o Ca^{+2}** dificulta el poder establecer la verdadera causa de un crecimiento vegetal reducido en suelos ácidos. Jarillo (2002) destacan iguales efectos que los mencionados precedentemente con $pH < 4,5$ e incluyen las deficiencias de **Mo** y **N** en plantas que no tienen la capacidad de absorber NH_4^+ . En suelos tropicales el Al^{+3} y Fe^{+3} presente en los minerales arcillosos es estable hasta $pH 5,3$. Por debajo de este pH estos cationes son liberados a la solución (se rompen las estructuras de los minerales arcillosos), y reaccionan rápidamente con el P formando compuestos insolubles que precipitan (fosfato insoluble de Al y Fe) (Espinosa y Molina, 1999). Asimismo, estos autores señalan que la capacidad de fijación en la mayoría de estos suelos se relaciona con la alta reactividad y afinidad por el P de las superficies de las arcillas presentes en dichos suelos. Este proceso fija elevado contenido de P entre $pH 5$ a 7 . En la Figura 2.17 se presenta el efecto del pH sobre la fijación del P en suelos dominados con arcillas 2:1.

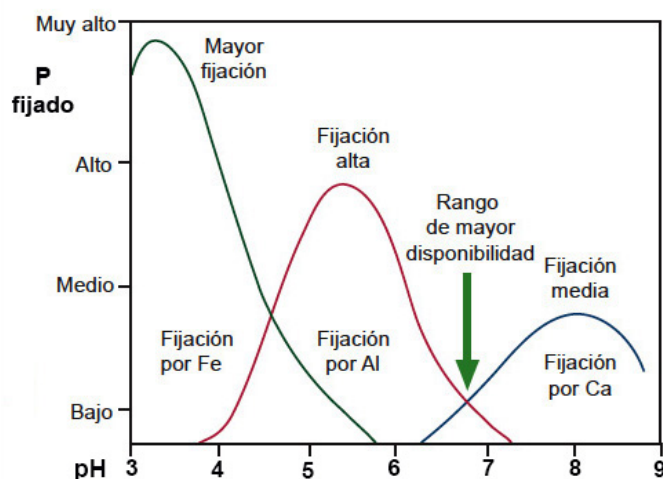


Figura 2.17 Efecto del pH sobre la fijación del P en suelos dominados con arcillas 2:1 (extraída de Espinosa y Molina, 1999)

A modo de ejemplo, puede comentarse el efecto de la acidez en el cultivo de **alfalfa** y leguminosas en general. Porta *et al.* (1994) indican que la alfalfa es una de las especies más sensibles a la acidez lo cual puede relacionarse con su exigencia en Ca^{+2} . En general, las leguminosas son exigentes en Ca^{+2} y sensibles a la menor disponibilidad de **Mo** no sólo para el cultivo, sino también, porque afecta la nodulación al verse seriamente afectada la supervivencia de *Rhizobium* sp. Por este motivo, responden al encalado con pH inferior a 6. Estos autores, presentan ensayos con soluciones muy ácidas (no < pH 4), en ausencia de Al^{+3} y Mn^{+2} , donde el agregado de Ca^{+2} como CaCl_2 permitió corregir la carencia de Ca^{+2} y recuperar los cultivos, no siendo entonces la elevada concentración de H^+ la causa del deficiente crecimiento de las plantas. Igualmente, Wild (1992) destaca que si bien no es claro hasta donde las diferencias en el crecimiento de los cultivos se deben a la presencia de H^+ u OH^- u otros efectos, puede establecerse que los efectos dañinos relacionados con el pH pueden ser compensados por adición de Ca^{+2} a partir de un pH de 4.

En el **extremo de la alcalinidad**, se indican diferentes causas que limitan e impiden el crecimiento de los cultivos. En general, se acepta que algunos iones que prevalecen con elevado pH, tales como los HCO_3^- y el Na^+ , ejercen un efecto perjudicial sobre algunos cultivos dependiendo de su sensibilidad. Wild (1992) señala como responsable del daño de los cultivos al efecto directo de OH^- o HCO_3^- sobre la absorción de **fosfato y molibdato**. En Capítulo 3 de esta publicación se analizan con mayor detalle los efectos de la alcalinidad. Asimismo, sobre la nutrición de los cultivos y el pH, puede consultarse los Capítulos 4 y 5 en Alconada *et al.* (2018).

Los efectos mencionados hacen referencia a la **acción directa del pH** en la rizosfera que afectan la **nutrición**. Sin embargo, el pH tiene incidencia en otras propiedades del suelo que también definen la nutrición de las plantas, tal como en las **propiedades físicoquímicas, propiedades físicas y propiedades biológicas** del suelo, aspectos que son comentados sintéticamente en puntos siguientes.

2.5.2 Efectos indirectos del pH sobre la nutrición

Efecto del pH en la Capacidad de intercambio_.

La *capacidad de intercambio catiónico* (CIC) está dada por cargas eléctricas negativas permanentes y variables de los coloides edáficos. Las cargas eléctricas variables dependen del pH, son negativas cuando el pH es ligeramente ácidos o mayor (pH 5,2- 9). Las cargas negativas, son las que retienen los cationes del suelo e impiden su lavado. Los suelos fértiles presentan al menos un 75% de la CIC ocupada por cationes de carácter básico. En $\text{pH} < 5$ se generan cargas eléctricas variables positivas que se originan por los polímeros hidratados de Al^{+3} y Fe^{+3} (punto 2.2.3), dando la capacidad de adsorber aniones (Capacidad de intercambio aniónica, CIA) (Porta *et al.*, 1994). Las deficiencias de P en suelos ácidos se asocian en parte a la adsorción por la CIA (punto 2.5.1).

Uehara y Keng (1974, en Jarillo 2002) establecieron que el tipo de carga que presenta el suelo se puede conocer a partir de la diferencia entre los valores de pH determinados en KCl y en agua, según la siguiente relación: $DpH = pH \text{ en KCl} - pH \text{ en agua}$. En el suelo predominan cargas negativas cuando DpH tiene signo negativo (intercambiador catiónico), y cuando el signo de DpH es positivo, el tipo de carga que predomina en el suelo es el positivo (intercambiador neto de aniones).

Efectos del pH en propiedades físicas_.

La acción del pH sobre las **propiedades físicas** del suelo se vincula a la incidencia que tiene en el complejo de intercambio, y sobre el tipo de cationes que prevalecen. En pH ligeramente ácidos o mayores con CIC con elevada proporción de Ca^{+2} ($> 60\%$ dependiendo del tipo de arcilla) prevalece la floculación de arcillas, hay mayor actividad microbiana, el suelo se agrega y forma estructuras estables. Por el contrario, si el pH es alto, en los suelos sódicos prevalecen iones Na^{+} y en algunos casos también Mg^{+2} , se favorece la dispersión y la estabilidad estructural (Pla Sentis, 2014). En la Figura 1.1 de esta publicación se ejemplifica el efecto floculante y dispersante.

Efectos sobre la nutrición por su incidencia en la microbiología edáfica_.

Todos los procesos del suelo que dependan de la actividad de los microorganismos edáficos también dependen de su reacción. La **mineralización de la materia orgánica** y todos los procesos vinculados a las formas orgánicas de los ciclos del N, S, P, micronutrientes, se realiza conforme al pH. Cada etapa de transformación es realizada por microorganismo que tienen condiciones definidas de desarrollo. A pH inferiores a 5,5 la actividad de las **bacterias y actinomicetes** es baja, siendo óptima en condiciones de neutralidad. Los **hongos** tienen una mayor adaptación, se desarrollan en un rango de pH más amplio (Wild, 1992).

Cabe destacar lo comentado precedentemente respecto al efecto de la acidez en la **fijación simbiótica de N_2** por *Rhizobium*. Así por ejemplo, los rendimientos de alfalfa en suelos con pH 5,5 y 6 pueden aumentar si se eleva el pH por medio del encalado (CaCO_3) (punto 2.2.6). Al aumentar el pH aumenta la disponibilidad de Mo que resulta necesario para los microorganismos

responsables de la nodulación. Se ha demostrado también, que el pH tiene influencia en la **fijación no simbiótica de N_2 atmosférico por el *Azotobacter***, cuyo valor crítico es pH 6 (Wild, 1992).

2.6 Suelos ácidos

Cerca del 25-30 % de los suelos en el mundo se clasifican como ácidos, y se ubican en ellos algunas de las áreas del mundo más importantes en la producción de alimentos (Havlin *et al*, 1999). Específicamente en la Argentina se han identificado los siguientes Órdenes de suelos que se caracterizan por su acidez desde superficie: **Oxisoles, Ultisoles y Spodosoles**. Pueden también tener reacción ácida algunos **Andisoles e Histosoles** (SAGyP-INTA, 1990, Soil Survey Staff, 2014).

Los **OXISOLES** se encuentran concentrados en la provincia de Misiones son suelos profundos, de muy baja fertilidad por el lavado de bases, baja disponibilidad de nutrientes y presentan con frecuencia elevados contenidos de Al^{+3} y Mn^{+2} que resultan fitotóxicos. Tienen un *horizonte B óxico* con elevados tenores de Fe^{+3} y Al^{+3} , y arcillas predominantemente caolíníticas (1:1). Los valores de **pH** son próximos a **4-5**, consecuentemente, presentan severas limitaciones para el normal desarrollo de los cultivos (SAGyP-INTA, 1990). Requieren fertilización, encalado e implantación de cubiertas verdes. Ha habido un mejoramiento genético muy importante a fin de adaptar algunos cultivos a estas condiciones, principalmente en Brasil.

En la Figura 2.18 se presenta una *secuencia de suelos Oxisoles*, representativa del Cerrado Brasileño, con diferente hidromorfismo, y asociado a esto, diferente pH, condiciones redox, y presencia de óxidos e hidróxidos de Fe y Al (goetita, hematita, etc). Se indica en un esquema general de paisaje la ubicación que dentro de este ocupan los tres suelos (adaptado de Töth, 2000).

En la secuencia de la Figura 2.18 se presentan los suelos clasificados como:

i) **Latossolo amarelo distrófico plíntico** (clasificación Brasil) o *Xantustox acuic* (clasificación Soil Taxonomy), ii) **Latossolo Vermelho oscuro distrófico** (clasificación Brasil) o *Ferralsol gérico* (clasificación FAO) o *Haplustox* (clasificación, Soil Taxonomy) y iii) **Latossolo Vermelho Amarelo** (clasificación Brasil) o *Ferralsol xántico* (clasificación FAO) u *Oxisol* (clasificación Soil Taxonomy). Estos suelos son de los más importantes productivamente en el Cerrado Brasileiro con diferentes cultivos y vegetación arbórea. En Figura 2.19 se presenta un material basáltico altamente meteorizado con formación de suelos rojos con muy elevado contenido de materia orgánica (noreste de Brasil).

Latossolo amarelo (i). Se ubica en zonas bajas donde predominan los suelos con **goetita** (oxihidróxido de Fe), **gibbsita** (óxido de Al), y menos **hematita** (óxido de Fe). Esta última ha sido reducida por la cercanía con la superficie freática, por ello prevalece el color amarillo (Xant significa amarillo). La vegetación es de mata en galería, por lo cual hay elevada materia orgánica. Es un suelo muy arcilloso en todo el perfil (caolinitas), con alta tendencia a compactarse (hasta masiva), alto contenido de Fe en todo el perfil formando microagregados y a 1,4 m inicio de formación de **plintita**. Se presenta mayor cantidad de plintita por la acción del agua y de la

superficie freática (aproximadamente entre 0,20 y 1,5 m de profundidad). En el horizonte A el pH en agua es de 4,8 y en KCl 3,9. En profundidad se mantiene muy ácido, pH en agua entre 4,9 y 5,1 y en KCl entre 4,1 y 4,8.

Latossolo vermelho (ii)_. Se ubica en pendientes de 1 % en los denominados “*campus murundus*”, plintosuelos, microrelieve paleo, pequeños morros de 20 cm hasta 2 m de altura debidos a la gran actividad biológica (termitas, hormigas, hongos) y a los *movimientos freáticos*. Son muy arcillosos, con tendencia a compactarse llegando a formar estructuras masivas, alto contenido de Fe (microagregación), a 1,4 m inicio formación de **plintita**. Vegetación de cerrado denso (sabana), suelos mas rojos por presencia de **hematita** por menor hidromorfismo que en i). El pH en agua en el horizonte A es de 4,7 y en KCl de 4,0. En profundidad aumentan, pero siempre ácidos (pH en agua entre 4,9 y 5,5; y pH en KCl entre 4,0 y 5,9).

Latossolo Vermelho Amarelo (iii)_. Se ubican en un relieve suavemente ondulado con pendientes de 3,5%. Son también suelos de uso agrícola, destacándose algodón, cítricos y caña de azúcar. La vegetación natural es arbustiva de baja altura. En superficie textura franco arenosa, pH en agua 4,8 aumenta a 5,2 en profundidad, y en KCl 4,1 en superficie y aumenta hasta 4,4 en profundidad, el contenido de materia orgánica es de 1,8% en superficie. Muy buen drenaje, y caracterizado por presentar erosión.

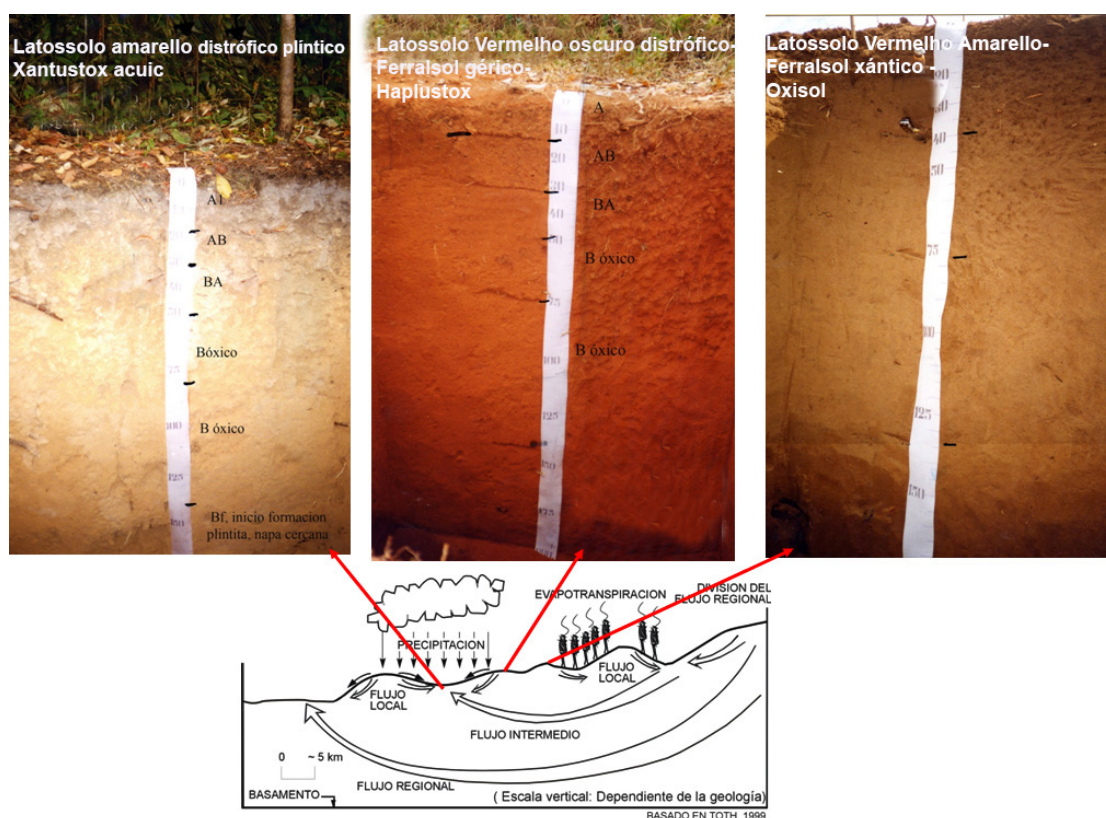


Figura 2.18 Secuencia de suelos Oxisoles, Cerrado Brasileño, con diferente hidromorfismo, pH, condiciones rédox, y tipos de óxidos e hidróxidos de Fe y Al

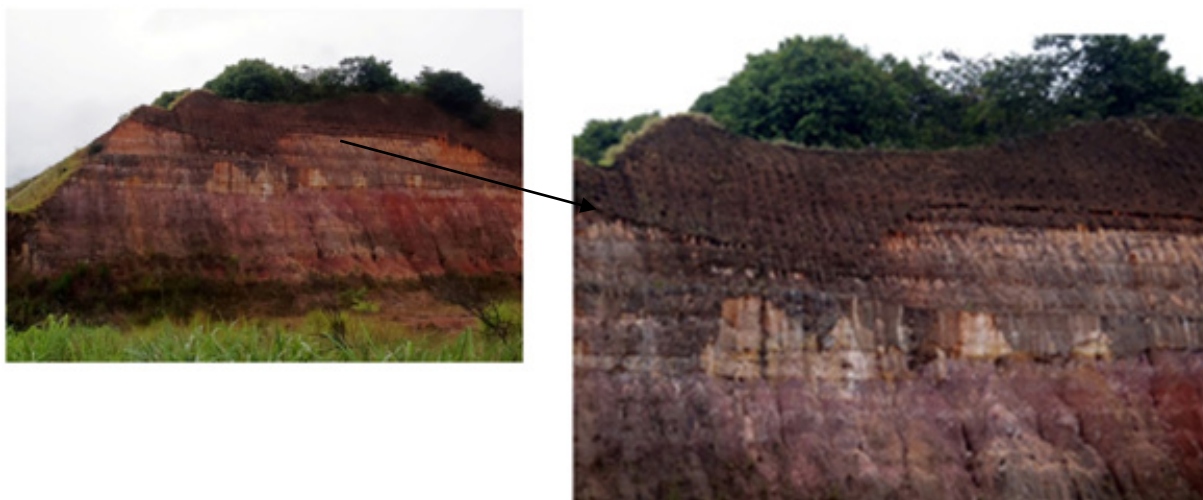


Figura 2.19 Material basáltico altamente meteorizado, suelos rojos con muy elevado contenido de materia orgánica (noreste de Brasil).

Los **ULTISOLES**, integran junto con los Oxisoles, el grupo de suelos denominados de “tierra colorada o rojas”. Tienen un *horizonte A ócrico o úmbrico*, el *horizonte B es cámbico o argílico*, con una **CIC menor de 16 cmol (+). kg⁻¹** en las arcillas y muy baja saturación de bases. Son suelos en general bien drenados, aunque en posiciones bajas, al igual que en los Oxisoles, pueden presentar problemas de hidromorfismo. Son muy profundos y muy fuertemente ácidos desde superficie. Su limitación más destacada es la moderada a severa susceptibilidad a la erosión hídrica, y una baja fertilidad natural que limita la elección de los cultivos. Son suelos aptos para cultivos como yerba mate, té y tung, y muy aptos para forestación. Estos suelos son frecuentes en las provincias de Misiones y Corrientes (SAGyP-INTA, 1990).

En la Figura 2.20 se presenta un suelo Ultisol con plantación de yerba mate (*Ilex paraguariensis*), en el Establecimiento Las Marías, Gobernador Virasoro, Corrientes, y en la Figura 2.21, igual suelo con plantación de té (*Tea sinensis*).



Figura 2.20 Suelo Ultisol con plantación de yerba mate (*Ilex paraguariensis*), en el Establecimiento Las Marías, Gobernador Virasoro, Corrientes



Figura 2.21 Suelo Ultisol con plantación de té (*Tea sinensis*), en el Establecimiento Las Marías, Gobernador Virasoro, Corrientes

Los **SPODOSOLES**, suelos ácidos muy lixiviados con iluviación de Fe, Al y humus (horizonte B **espódico**, Bh-Bs-Bhs), son suelos profundos, presentan un **horizonte superficial orgánico** (humus ácido <4,5) y un **horizonte E** muy bien expresado que se forma por elevadas precipitaciones, clima frío, buen drenaje y condiciones de acidez bajo una vegetación de bosque de lengas, guindo y ñire (*Nothofagus* sp). El proceso de formación es el de la podzolización. Se los encuentra en la Cordillera Andino patagónica de la provincia de Tierra del Fuego, en pendientes de hasta el 3 %. Presentan abundantes fragmentos gruesos en el perfil (SAGyP-INTA, 1990). En la Figura 2.22 se presenta un Spodosol de Tierra del Fuego desarrollado sobre pizarras y esquistos (foto Fernanda Valenzuela, Universidad Nacional de Patagonia San Juan Bosco).

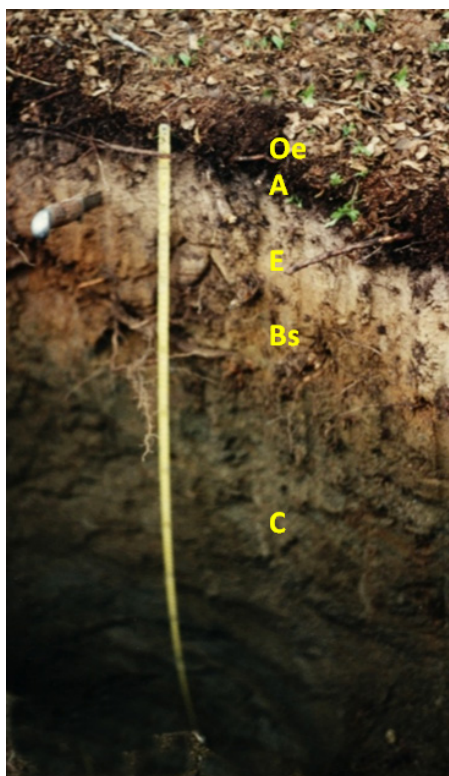


Figura 2.22 Spodosol de Tierra del Fuego desarrollado sobre pizarras y esquistos (foto Fernanda Valenzuela, UNPSJB).

Los **HISTOSOLES**, son también suelos profundos evolucionados a partir de un manto turboso del género *Sphagnum*, con diferente grado de evolución. Son suelos mal drenados, se ubican en áreas deprimidas, turberas (sectores relativamente más elevados), y sectores aledaños a vías de drenaje. Tienen *pH* de 4 a 5 desde superficie. Se los encuentra principalmente en Tierra del Fuego e Islas Malvinas (SAGyP-INTA, 1990).

Los **ANDISOLES** son suelos derivados de cenizas volcánicas, bien drenados, profundos, evolucionados a partir de materiales volcánicos recientes, el principal producto de alteración de estos materiales “**alofanos**”, otorga a estos suelos propiedades ándicas (cargas variables, alta retención de fosfatos, y alta retención hídrica). El *pH* varía entre 5 y 5,5. Poseen baja densidad

aparente, **saturación con bases inferior al 50 %**, con frecuencia alrededor del 30 %, no obstante, se destaca que estos valores podrían ser mayores si la CIC fuese determinada por una metodología diferente a la típica del acetato de amonio, pH 7. Estos suelos se presentan en las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut, y en Santa Cruz (SAGyP-INTA, 1990). En la Figura 2.23 se muestran suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas con escasa y abundante precipitación, en el primer caso las **arcillas** son de tipo **haloisita** y en el segundo **alófanos** (fotos Fernanda Valenzuela).

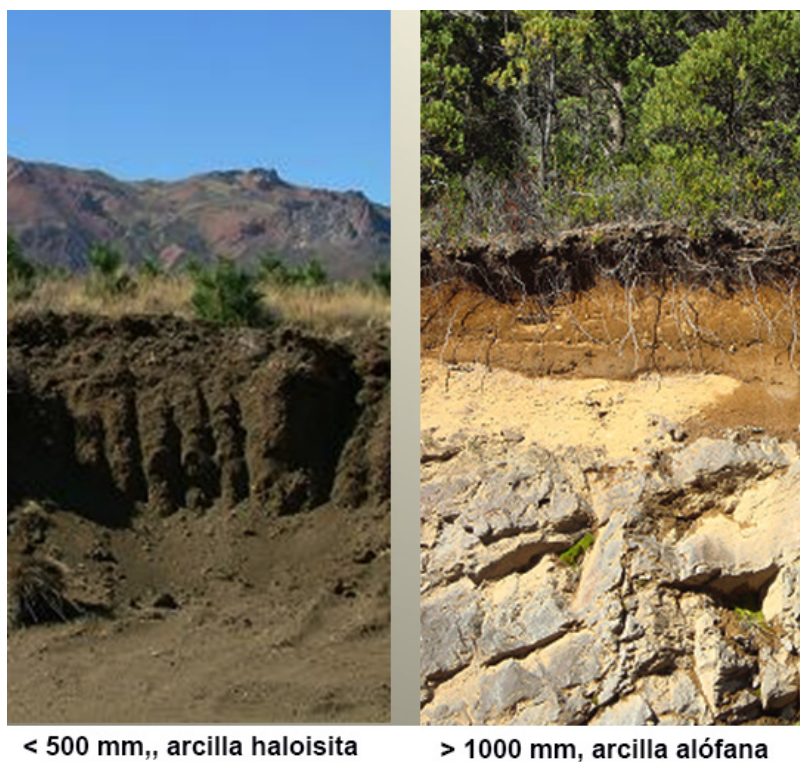


Figura 2.23 Suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas con escasa y abundante precipitación (fotos Fernanda Valenzuela, UNPSJB)

En otros órdenes, tales como **INCEPTISOLES y MOLISOLES**, si bien no son los órdenes caracterizados por presentar reacción ácida desde superficie, son incluidos dentro de estos órdenes suelos muy ácidos que no llegan a cumplir las exigencias de los órdenes mencionados precedentemente. Por ejemplo, en los Valles patagónicos de los ríos Percy y Corintos, en Trevelin (Chubut) (Figura 2.24) o en el río Blanco de Chollilla (Chubut) (Figura 2.25) o en el río Pinturas (Santa Cruz) (Figura 2.26) es frecuente encontrar horizontes O que no llegan a cumplir con las exigencias de un horizonte hístico clasificándolos como *Endoacuoil cumúlico*, *Endoacuoil hístico*, *Endoacuoil típico*. Estos suelos, son ácidos desde superficie y en profundidad debido a la incidencia del agua freática puede aumentar el pH sin llegar a ser alcalinos (Alconada en IICA-PROSAP, 2009).



Figura 2.24 *Endoacumulic* con hidromorfismo desde 65 cm de profundidad en mallín, Trevelin, Chubut



Figura 2.25 *Endoacumulic* con menor hidromorfismo en mallín de Chubut



Figura 26 *Endoaquol histico* en mallin, Santa Cruz

Asimismo, debido a la gran cantidad de discontinuidades litológicas que caracterizan dichos valles (materiales originales glaciares, glacifluviales y volcánicos) (Laya, 1969) las propiedades ándicas es posible que se manifiesten en alguna parte del perfil a partir de materiales volcánicos (polvo, cenizas, lapilli, arenas volcánicas, bloques), sin embargo, no siempre llegan a cumplir con las exigencias de los **Andisoles**. En la Figura 2.27 se presenta un suelo clasificado como *Endoaquol acuándico* desarrollado en cordón de arenas volcánicas del Valle de Trevelin, sobre el río Percy. Este suelo presenta propiedades ándicas y pH muy ácidos desde superficie por elevado contenido de materia orgánica y presencia de *arcillas alófanas* (Alconada en IICA-PROSAP, 2009).



Figura 2.27 *Endoaquol acuándico* en cordón de arenas volcánicas, Trevelin, Chubut

Esto también se observa en otros ambientes cordilleranos con discontinuidades litológicas debidas a diferentes erupciones volcánicas, depósitos glaciares, aluviales y/o coluviales. En la Figura 2.28 se presenta un suelo perteneciente al orden **Inceptisol**, *Vitrandepi umbrico* desarrollado a partir de materiales volcánicos, con bosque natural de *Nothofagus dombeyi* “coihue”, y plantaciones de *Pinus insignis* “radiata”, Pucón, Chile (Volcán Villarica), el pH en agua es próximo a 6 y en KCl próximo a 5.

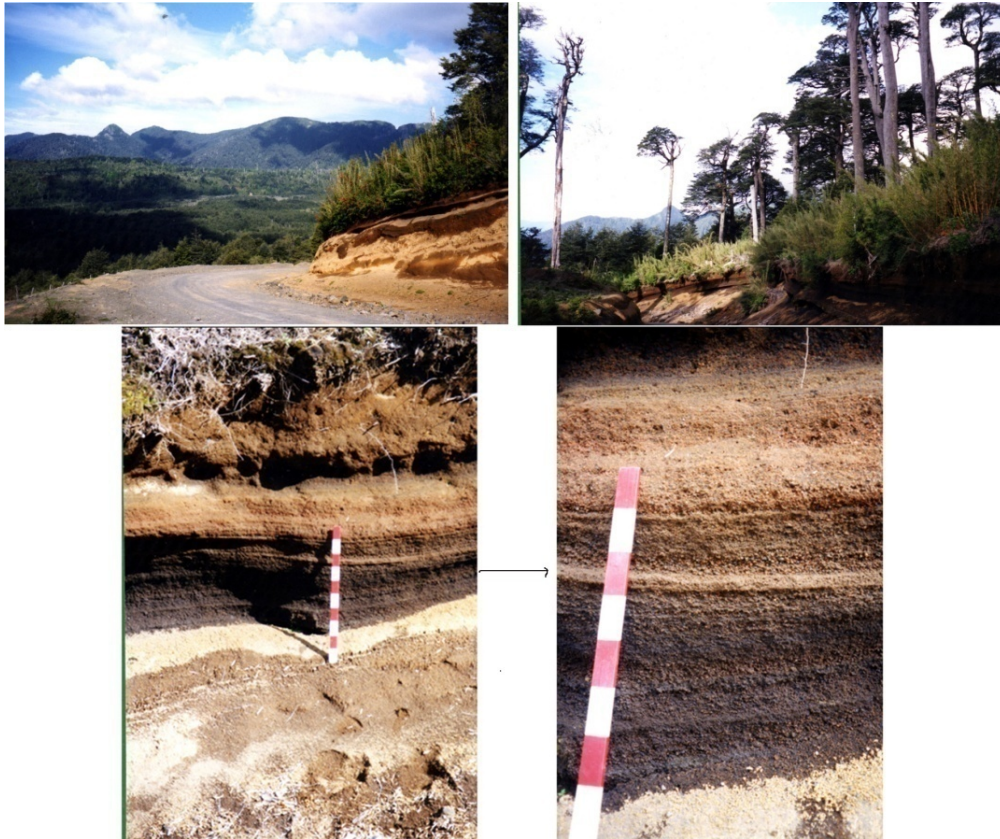


Figura 2.28 *Vitrandepi umbrico* desarrollado a partir de materiales volcánicos, con bosque natural de *Nothofagus dombeyi* “coihue”, y plantaciones de *Pinus radiata*, Pucón, Chile (Volcán Villarica)

Bibliografía

- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. Universidad Central de Venezuela. Ed. Arauco. 390p. Recuperado de:
https://books.google.com.ar/books?id=rjeVU6XFajEC&pg=PA121&hl=es&source=gbbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false
- Alconada, M., Giuffrè L., Huergo L. y Pascale C. (2000). Hiperfertilización con fósforo de suelos Vertisoles y Molisoles en cultivo de tomate protegido. *Avances en Ingeniería Agrícola* (pp.343–347). Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Alconada Magliano, M.M., Lanfranco J.W. y Pellegrini A.E. (2018). *El suelo en el paisaje. Parte 1 Condiciones de dotación*. La Plata: Edulp. Recuperado de:
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1>
- Ayers, R.S. and Westcot D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO. Irrigation and Drainage. U.S.A. recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/t0234e00.HTM>.
- Bohn, H.L., Mc Neal B.L y O'Connor G.A. (1993). *Química de Suelos*. México: Ed. Limusa. 370p.
- Cedrón, J.C., Landa V. y Robles J. (2011). *Química General*. Material de enseñanza. Perú, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de:
<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/tema>
- Ciampitti, I.A. y García F.O. (Febrero, 2008). Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. *Revista Horizonte A*, IV (18), 22-28. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: www.lacs.ipni.net.
- Darwich, N. (1998). Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. BASF - The Chemical Company. 182p.
- Domínguez Vivancos, A. (1989). Tratado de Fertilización. Madrid. España: Ed. Mundi Prensa. 601p.
- Edafología Universidad Granada. (octubre de 2018). *Contaminación por sales solubles*. Departamento de Edafología y química agrícola. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema12/efectos.htm>.
- Espinosa, J. y Molina E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. IPNI, 46 p. Recuperado de:
<http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>
- Fassbender, H.W. (1975). *Química de suelos, con énfasis en suelos de América latina*. San José de Costa Rica: IICA-OEA. 398p.

- Fagundo, J.R. 1990. Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. *Hidrogeología* (Granada), 5, 33-46
- FAO. (2004). *Uso de fertilizantes por cultivo en Argentina*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 61 p. Recuperado de:
http://www.fao.org/tempref/agl/agll/docs/fertuseargent_s.pdf
- Freeze, A. y Cherry J. (1979). *Agua Subterránea*. Recuperado de:
<http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-espanol/capitulo-7/> y [..capitulo-6/](http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-espanol/capitulo-6/)
- García, F.O. y González Sanjuan M.F. (2010). Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (48), 6 p. IPNI, International Plant Nutrition Institute. Recuperado de: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D649F7AF5F0B482385257984005754E9/\\$FILE/1.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/D649F7AF5F0B482385257984005754E9/$FILE/1.pdf)
- García, F.O. y González Sanjuan M.F. (2013). La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? *IPNI, International Plant Nutrition Institute* (AH 9). Recuperado de: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6E55A4956F44419585257B3400548C6E/\\$FILE/2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/6E55A4956F44419585257B3400548C6E/$FILE/2.pdf)
- García, F.O. y Díaz Zurita, M. (2015). La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina. En Casas, R. y Albarracin G. (Editores). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I (pp 183-198). Buenos Aires: Ed. FECIC. 604p.
- González Sanjuán, M.F., Grasso A.A. y Bassi J. (mayo 2013). Fertilizantes en Argentina Análisis del Consumo. *Revista Fertilizar* (25), 25-29. Recuperado de:
<https://www.fertilizar.org.ar/subida/revistas/25.pdf>
- Havlin, J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L. and Nelson W.L. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers*. United States: Ed. Prentice Hall. 499p.
- Hernández, A.A. (2012). *Nutrición de bosques y fertilización de plantaciones forestales en América Latina*. XIII SECS Cuenca, Ecuador. Recuperado de: <http://nla.ipni.net/article/NLA-3032>
- Hernández, J. (2015). *La forestación en el Uruguay: Impacto en propiedades químicas del suelo y limitantes nutricionales*. Seminario SPF: La forestación, el suelo y el agua. Montevideo, Uruguay.
[http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/0/E5A95A1E833BA55005257ABC0071E737/\\$FILE/Nutrici%C3%B3n%20forestales.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/0/E5A95A1E833BA55005257ABC0071E737/$FILE/Nutrici%C3%B3n%20forestales.pdf)
- IPNI. (1991). Acidez y encalado de los suelos. *International Plant Nutrition Institute. Información Agronómica* N° 29. Recuperado de:
[http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/35E6134F83790877852580120071C1C7/\\$FILE/Art%203.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/35E6134F83790877852580120071C1C7/$FILE/Art%203.pdf)
- IICA-PROSAP (2009). Alconada Magliano, M.M. Estudio de suelos y aptitud de tierras para riego en los valles del río Percy y río Corintos de Trevelin; y en el valle del río Blanco en Cholila. En *Proyecto Desarrollo y ampliación del área irrigable de la Cuenca del río Futaleufú-Provincia de Chubut*. Convenio Instituto Interamericano para de Cooperación para la Agricultura- Programa de Servicios Agrícolas Provinciales. Informe 100 p y mapas.

- IICA-PROSAP (2013). Alconada Magliano, M.M. Determinación de la capacidad agrícola de suelos. En Proyecto *Manejo de Cuencas: Guaycurú-Iné y Río de Oro*. Informe 133 p y mapas.
- Jackson, M.L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Buenos Aires. Argentina: Ed.Omega. 662 p.
- Jaramillo, D.F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 619 p.
- Labrador Moreno, J. (1996). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Madrid. España: Ed. Mundi Prensa.174p.
- Lanfranco, J.W., Pellegrini A.E. y Cattani V.M. (2014). Contenidos de Edafología. Génesis, evolución y propiedades físico-químicas del suelo. Facultad Cs Ag y Fs, UNLP. Recuperado de: Aula Virtual Edafología. 254p.
- Laya, A. (1969). *Cartografía de los principales grupos de suelos y sus relaciones genéticas en la región de Trevelin* (Chubut). V Reunión de la Ciencia del Suelo. V-A: 359-370.
- Mengel, K. y Kirkby E.E. (2000). *Principios de la nutrición vegetal*. Traducción R Melgar. 4 Ed Instituto Internacional de la Potasa, Suiza. 597p.
- Molina, E. (1998). *Acidez de suelo y encalado*. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.18p. Recuperado de:
http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Agricultura/Neutralizacion_de_Suelos_Acidos/JM-encalado_y_acidez.pdf
- Peinemann, N. (1998). *Conceptos de edafología y nutrición vegetal*. Traducción y adaptación de Bodenkunde in Stichworten de D. Shroeder, y de Pflanzenernahrung in Schtichworten de A. Fink. Bs As. Argentina: Editorial Universidad Nacional del Sur. 228p.
- Pla Sentis, I. (1997). A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. En Pla Sentis, I (Ed). *Soil Erosion Processes on Steep Lands*. Special Issue of *Soil Technology*,11(1),17-30. Editorial Elsevier. Amsterdam (Holanda).
- Pla Sentis, I. (2014). Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated conditions. *International Soil and Water Conservation Research*. 2(4):50-63. WASWAC. China
- Pereyra, F. y Torres Duggan M. (2016). *Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios*. Bs As, Argentina: Editorial AACS y AGA. 402p.
- Price, M. (2003). *Agua subterránea*. México: Editorial Limusa.330 p
- Porta, J., López-Acevedo M. y Roquero C. (1994). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Madrid. España: Editorial Mundi Prensa.804p.
- Rojas Restrepo, J.J. (2015). *Fertilidad de suelos en plantaciones forestales del trópico colombiano*. Tesis Magister en Ciencias, Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia Fac. Cs. Medellín, Colombia. 81p.
<http://bdigital.unal.edu.co/51111/1/98452226.2016.pdf>
- SAGyP–INTA. (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Proyecto PNUD Arg-85/019, Buenos Aires, Argentina. Tomo I y II, 1600 p. 39 mapas.

- Sainz Rozas, H. (2013) *¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?* Simposio Fertilidad. Recuperado de:
<https://www.fertilizar.org.ar/subida/evento/Simposio%20de%20Fertilidad%202013/SainzRozas>.
- SAMLA (octubre 2018). Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorios de Análisis de suelo. Recuperado de:
<http://www.suelos.org.ar/sitio/sistema-de-apoyo-metodologico-a-laboratorios-de-analisis-de-suelo-samla/>
- Tisdale, S.L. y Nelson W.L. (1991). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*. México: Ed. Limusa. 760p.
- Töth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero, Inst. Tecnológico GeoMinero de España*, 8:49-26.
- Universidad de Granada (2018). *Alteración química*. Recuperado de:
<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/Tema09.htm>. Consultada octubre 2018.
- Wild, A. (1992). Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell. Versión Española, P Urbano Terrón y C Rojo Hernández. Madrid, España: Ed. Mundi Prensa. 1045 p.
- Zapata Hernández, R. (2004). Química de la acidez del suelo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 197p. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1735/1/9583367125.1.pdf>

CAPÍTULO 3

Suelos salinos y sódicos

Margarita Alconada Magliano

Se definen los suelos afectados por sales, y sus orígenes en condiciones naturales y antrópicas. Se analiza el comportamiento de las sales y su incidencia en la producción de los cultivos por sus efectos sobre la nutrición y en el suelo. Se presentan ejemplos de suelos salinizados y/o alcalinizados en diferentes ambientes de Argentina.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO.

SUELO EN EL PAISAJE

3.1 Importancia de la salinización como proceso natural y antrópico en la sustentabilidad de ecosistemas

Los **suelos afectados por sales** contienen concentraciones **excesivas de sales solubles, y/o sodio intercambiable**, que restringen o anulan el crecimiento de los vegetales, y el rendimiento económico de los cultivos o praderas (Porta *et al.*, 1994). Los problemas de salinidad de suelos son una consecuencia de la acumulación de sales en sectores donde el régimen de humedad del suelo se caracteriza por fuertes pérdidas de agua por evapotranspiración y por reducida lixiviación de sales remanentes. Los problemas de sodicidad aparecen como una consecuencia de cambios en la composición y concentración de dichas sales, con cambios en el equilibrio de cationes intercambiables, que conduce a una relativamente alta acumulación de sodio intercambiable. La salinización y alcalinización están influenciadas por el balance de agua y sales, siendo sus orígenes naturales o antrópicos.

Imbellone *et al.*, (2010) cita a Szabolcs (1989) quien indica la existencia de 9,3 millones de km² con suelos halomórficos, dentro de estos 3,5 millones de km² son **salinos** principalmente en climas áridos y semiáridos. Los países con mayor superficie con suelos afectados por sales son ex URSS, China, Argentina, Irán, India, Pakistán y Australia. Los suelos **sódicos** ocupan 5,8 millones de km², principalmente en Australia, ex URSS, Argentina, Canadá, Chad y Nigeria. La Argentina, es el tercer país con mayor superficie de suelos afectados con sales en el mundo en forma natural (**salinización primaria**), después de Rusia y Australia (FAO-UNESCO en Lavado, 2007).

Pla Sentis (1988,1993) indica a nivel mundial que aproximadamente un tercio de la superficie terrestre son zonas áridas y semi-áridas, de las cuales un alto porcentaje presentan suelos afectados por sales. Señala también, que la salinización de los suelos es uno de los principales problemas que han reducido y reducen la productividad de regiones áridas del mundo desde hace miles de años. La salinización y alcalinización son los dos principales procesos de degradación de suelos en producciones con riego (Pla Sentis, 2014). Este proceso degradativo, se ha extendido y afecta en las últimas décadas amplias extensiones de regiones tropicales, semiáridas o subhúmedas donde se ha incorporado el riego.

Alrededor de la *mitad de las tierras* que se cultivaban bajo riego en el mundo, se encuentran afectadas por problemas de salinidad y sodicidad. Aproximadamente un 30-50 % del área de tierras que se incorporan anualmente a la agricultura bajo riego se pierden por salinización/sodificación (Pla Sentis, 1993). Más recientemente, Pla Sentis (2006a) señala pérdidas anuales de **1,5 a 2,5 millones ha** bajo riego, y destaca que si bien el área afectada por la erosión inducida por el hombre es mucho mayor que la salinización, también reviste gran importancia desde el punto de vista social, económico y ambiental, debido al alto costo de los emprendimientos de riego, uso de agua cada vez más escasa, y por la decisiva importancia en la producción de alimentos de las tierras bajo riego. FAO (2014) en Prieto *et al.* (2015) indican que el 30% del área irrigada mundial está afectada por salinidad.

Pla Sentis (2017) considera al mal uso del suelo y agua, derivado de una población en crecimiento y desarrollo, con limitada investigación y aplicaciones empíricas de prácticas de conservación de suelo y agua, como la principal causa de catástrofes, incluso por sobre las atribuidas al cambio climático por acción del hombre. Los suelos son la base de la producción agrícola y de la preservación de ecosistemas. Debido a esto, las consecuencias de la **degradación de suelos** son de similar trascendencia que las del **calentamiento global, pérdida de biodiversidad**, estando los tres procesos íntimamente relacionados (Pla Sentis, 2006a). En la Tabla 3.1, se presentan las áreas afectadas en el mundo por algún proceso de degradación, y superficie que corresponde a cada proceso (Pla Sentis, 2006a).

En nuestro país, la región semiárida y árida abarca el 75% de la superficie continental (218 millones de ha), se encuentran suelos salinos y sódicos en Mendoza, San Juan, La Rioja, Catamarca, Santiago del Estero, Chaco; también se describen por causas diversas, en las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires, así como, en las cuencas cultivadas de los ríos Colorado, Negro y Chubut. Lavado (1988) indica para la Argentina algo más de 85 millones de ha afectadas por algún proceso relacionado con sales, desde suelos salinos hasta alcalinos, siendo la contribución más importante en esa superficie total la de los suelos en *fases intermedias de salinización y alcalinización* (principalmente esta última).

	Área ha. 10 ⁶			
	total	anual	Proceso degradación	Área ha. 10 ⁶
Tierra con riego	45	0,15	Erosión hídrica	480
Cultivos secano	220	2,5	Erosión eólica	510
Pastos	760	3,2	Degradación química	110
			Degradación física	35

(Degradación química: salinización, contaminación y acidificación)

(Degradación física: compactación, sellado, encostrado)

Tabla 3.1 Áreas afectadas en el mundo por algún proceso de degradación, y áreas que ocupan los procesos degradativos (extraída de Pla Sentis, 2006a)

La **salinización secundaria** asociada al riego es analizada muy detalladamente por Prieto *et al.* (2015). Estos autores indican que si bien no hay estadísticas oficiales sobre el riego en la Argentina, algunas estimaciones indican que el aporte de la producción con riego es del 22% sobre el volumen bruto de producción, representando esto una productividad física mayor respecto a la agricultura en secano, tal como sucede a nivel mundial donde la superficie con riego es del 20 % del área con cultivos mundiales y aporta el 40% de la producción. Estos autores, citan diversas fuentes que estiman que en la Argentina se encuentran bajo riego aproximadamente 2 millones de ha. La provincia de Buenos Aires lidera en superficie (374.246 ha), siguen en importancia Mendoza, Salta y Córdoba con 265.356 ha, 212.463 ha y 197.652 ha respectivamente, y las provincias de Jujuy, San Juan, Entre Ríos, Corrientes, Santiago del Estero y Río Negro con superficies próximas a 100.000 ha (entre valores próximos a 94.000 y 120.000 ha), teniendo las restantes provincias superficies menores.

No obstante, los efectos positivos del riego en términos de producción y siendo imprescindible en muchas regiones, es importante considerar la degradación de suelos por salinización que se produce. La **salinización secundaria** debido a la elevación de una *superficie freática* es muy común en *ambientes áridos y semiáridos* con riego y se debe a la ineficiencia del riego, que supera la capacidad de drenaje de los suelos elevando la superficie de agua (Prieto *et al.*, 2015). Estos autores citan a Oriolani *et al.* (1986), quienes determinan a nivel nacional una afectación por salinidad de 584.000 ha y con problemas de drenaje por superficie freática próxima de 554.000 ha. Con posterioridad, sólo parcialmente ha sido relevada el área afectada estimándose a nivel país un área afectada de 630.000 ha (Sánchez *et al.*, 2014 en Prieto *et al.*, 2015).

En *regiones húmedas*, con **producciones intensivas**, la salinización/alcalinización se produce aunque en grado variable en forma generalizada al incorporar el riego, principalmente en la producción de hortalizas y flores bajo coberturas plásticas. Los problemas derivados de las sales son una de las principales causas de disminución de rendimiento con desarrollo de plagas, enfermedades, y desequilibrios nutritivos asociados. Esto genera un aumento de costos a fin de revertir la disminución de rendimientos que se produce (Alconada *et al.* 2011b). Esto ha sido reconocido por diversos autores en todos los Cinturones flori-hortícolas del país.

El efecto ambiental que se hace tan evidente en sistemas intensivos de producción, es también destacado por Porta *et al.* (1994), Pla Sentis (2006a), en los sistemas productivos en general, indicando que si bien la degradación del suelo en un sentido restringido resulta en una reducción de cualidades en relación a la producción de alimentos, es importante considerar también que afecta al suelo en su función de regulador del **ciclo hidrológico** y como **filtro ambiental**.

Se destaca para este punto, lo señalado por Pla Sentis (2006b) respecto a que el riego causa cambios en el régimen y balance de agua y solutos del perfil, con acumulación de sales, cuando el *manejo del riego y drenaje no considera* adecuadamente las particularidades del *clima, suelo, cultivo, calidad de agua, sistema de riego, fertilización, y profundidad del nivel freático*. Este autor señala la necesidad de estudiar el suelo con un **enfoque hidrológico**, donde el suelo y agua son indisociables en el ambiente y deben ser analizados en forma conjunta. Sin embargo, esto no suele suceder, se los estudia en forma separada. Los procesos de degradación de suelos, condicionan la calidad, cantidad, y forma en que el agua participa en el ciclo hidrológico.

La sustentabilidad o sostenibilidad de la producción sólo es posible considerando al suelo y al agua, y como estos se vinculan con otros elementos del **paisaje local y regional**. Consecuentemente se requiere conocer el origen, natural o antrópico, de las limitantes observadas a fin de plantear manejos sustentables.

3.2 Suelos afectados por sales

La definición de “**Suelos afectados por sales**” conduce con frecuencia a confusiones dada la variedad de términos utilizados con diferentes sentidos. Pla Sentis (1979), recomienda utilizar el término *suelos afectados por sales* en sentido general, refiriéndose a aquellos suelos en que la acumulación de cualquier sal o ión por separado o en conjunto afecte directa o indirectamente las propiedades de los suelos (físicas, químicas, o biológicas), la producción económica de cultivos o que incida sobre los consumidores (animales u hombre), o sobre el manejo eficiente del riego.

En la Tabla 3.2 se presenta un esquema extraído de Szabolcs (1988) que resume los *diversos tipos de suelos afectados por sales* que se presentan en el mundo. De los suelos indicados, los que adquieren importancia a nivel mundial y en la Argentina en particular, son los *suelos salinos y sódicos*, y son los que en esta publicación se analizan (punto 3.5). Respecto a los **suelos magnésicos** se destacan los estudios de Müller-Sämann *et al.* (1999) quienes presentan una nueva propuesta de clasificación de estos suelos en una región del Valle del río Cauca donde su presencia es significativa. Asimismo, se destacan los estudios presentados por Jarillo (2002) en suelos ricos en magnesio y los efectos dispersivos que en estos reconoce. El efecto dispersivo del Mg^{+2} se comenta en puntos 3.3.2, 3.5.2, y 3.11. Sobre los **suelos yesíferos** puede consultarse en Ibáñez y Manríquez Cosío (2013) y en FAO-UNESCO (2018).

Electrolitos dominantes	Suelo resultante	Ambiente	Efecto sobre la producción	Mejoramiento
NaCl - Na ₂ SO ₄	suelo salino	árido-semiárido	alta presión osmótica efectos tóxicos	lixiviación de sales
iones Na ⁺ capaces de hidrólisis alcalina	suelos alcalinos	semiárido semihúmedo húmedo	pH alcalino deterioro de propiedades físicas	enmiendas químicas
iones Mg ⁺²	suelos magnésicos	semiárido semihúmedo	alta presión osmótica efectos tóxicos condiciones físicas pobres	lixiviación enmiendas química
iones Ca ⁺² (princ. Ca ₂ SO ₄)	suelos yesíferos	semiárido árido	baja nutrición efectos tóxicos	enmiendas alcalinas
iones de Fe y Al (princ. sulfatos)	suelos sulfato ácido	costas marinas y de lagos de sedim. pesados y sulfatos	fuertemente ácidos efectos tóxicos	encalado

Tabla 3.2 Diversos tipos de suelos afectados por sales que se presentan en el mundo (modificada de Szabolcs, 1988)

3.3 Enfoque de estudio de suelos con sales

Dos enfoques principales se utilizan para definir estos suelos: *Agrofisiológico* (características químicas, criterio no utilizado actualmente en producción) y *Pedogenético* (características físicas y químicas del suelo, consideraciones económicas, cultivos, climáticas, entre otras, recomendado para definir sistemas productivos) (Porta et al., 1994).

3.3.1 Enfoque Agrofisiológico

Es el enfoque desarrollado por el difundido Manual 60 de Riverside (Richards, 1973), en el cual se establecen las bases teóricas y prácticas para el diagnóstico y asesoramiento sobre el manejo de estos suelos en base a características **“químicas”** que se relacionan con la respuesta de los cultivos. Este criterio de clasificación, si bien en algunos aspectos puede resultar válido en algunos ambientes, en sentido estricto, resulta apropiado para suelos de **zonas áridas y de escaso desarrollo genético**, consecuentemente, para las condiciones para las cuales estas relaciones fueron establecidas, a partir de las cuales en otros suelos y ambientes, se dan desviaciones muy marcadas en otros sitios (Tabla 3.3).

Lo consignado en Tabla 3.3, **es un criterio** que se considera parcialmente en la **Taxonomía de suelos**, por ejemplo, se considera un *horizonte nátrico* cuando un *horizonte argílico* tiene > 15 PSI. Sin embargo, **no es un criterio que resulte adecuado desde un punto de vista productivo** para todos los sitios, tal como se analiza en punto siguiente (3.3.2, enfoque pedogenético).

	C.E (dS.m ⁻¹)	PSI	pH
Salino	> 4	<15	<8,5
Salino-sódico	> 4	> 15	< 8,5
Sódico	< 4	> 15	> 8,5

Tabla 3.3 Límites utilizados en Manual 60 del USDA, y parcialmente en taxonomía de suelo, siendo inadecuado para la evaluación de la aptitud de las tierras (CE conductividad eléctrica, PSI porcentaje de sodio intercambiable)

3.3.2 Enfoque pedogenético. Relaciones Na-CE

Este enfoque considera las características **“físicas y químicas”** que presentan los suelos y que se relacionan con la presencia de sales. Se considera necesario analizar y establecer la evolución de estos suelos con el tiempo. Se definen las **características intrínsecas del perfil que condicionan y determinan el balance de sales**, principalmente si hay horizontes genéticos bien desarrollados. Este criterio tiene en cuenta:

- Que el criterio de **producción económica de cultivos** puede variar ampliamente según las condiciones sociales y económicas de cada país o región.
- Consideraciones de **orden climático**.
- Las diferentes **especies y variedades cultivadas** tienen tolerancia a las sales muy variables.
- Los niveles de **sodio intercambiable** que afectan marcadamente las **propiedades físicas** del suelo pueden variar en forma relativa de **2 a 50 %** de acuerdo a las características del suelo (Pla, 1979, 1988, 1993; Lavado, 1988). Pla Sentis (2014) analiza también el efecto dispersante del Mg, proponiendo el uso del índice CROSS (Cations Ratio of Soil Structural Stability) (punto 3.11).
- Aristizabal Arboleda (2009) analiza el **efecto dispersivo del Mg⁺²**. Encuentra efectos negativos del Mg⁺² sobre la estabilidad estructural y conductividad eléctrica que no presenta el Ca⁺². Esto es debido a la mayor energía y radio de hidratación del Mg⁺², produciendo más expansión (hinchamiento) de las arcillas. Este autor indica que el Mg⁺² a diferencia del Ca⁺² tiene efectos nocivos sobre la estructura de los suelos arcillosos de tipo 2:1 con saturación de Mg⁺² superior al 35%, en estos casos incluso favorece que el Na⁺ entre en el espacio interlamilar de las arcillas al aumentar la separación de dicho espacio.

Porta *et al.* (1994), consideran que el límite de **4 dS.m⁻¹** propuesto por Schofield (1942) y presentado en el Manual 60 en términos generales **puede considerarse válido, considerando los efectos en el suelo**, mientras que el límite de **15 de PSI resulta arbitrario y deben considerarse el resto de las características edáficas**. Bohn *et al.* (1993), propone las recomendaciones de la Soil Science Society of America (1973) de **modificar el límite de 4 a 2 dS.m⁻¹** a fin de separar suelos salinos de no salinos, y consideran adecuado el

límite de 15 % de sodio intercambiable. Por su parte, Pizarro (1978), considera para definir estos suelos, **2 dS.m⁻¹ y 7 de PSI**.

Diversos autores en publicaciones científicas, están de acuerdo en considerar límites muy por debajo del 15 % de **PSI, en general 5-7 % e inferiores a 4 dS.m⁻¹**. Por ejemplo, en condiciones de invernáculo, con **5-7 % de sodio intercambiable** se presentan problemas derivados del drenaje, y con valores de **2 dS/m** de sales disminuyen significativamente los **rendimientos y/o la calidad de la mayoría de los cultivos hortícolas y florícolas** (punto 3.8 se amplía este tema).

Por lo expuesto, se destaca lo señalado por Pla Sentis (1979) respecto a la necesidad de **evaluar en cada caso en particular** el nivel de salinidad y alcalinidad que afecta a los suelos y a los cultivos, basándonos en experiencias y observaciones, a fin de elegir los cultivos más apropiados y/o las prácticas que coadyuven o resulten sustentables para las limitantes del sitio vinculadas a la salinidad/alcalinidad. Pla Sentis (2014, 2017) indica la necesidad de estudiar los suelos afectados por sales teniendo una mejor comprensión de los problemas de sodicidad. Este autor atribuye esto a la gran variabilidad que existe en los valores límite de PSI o de RAS que definen la sodicidad de un suelo, dado que varían con las texturas, mineralogía de los suelos y la concentración y composición de los otros electrolitos en solución.

A continuación, **se sintetizan** algunos de los temas comentados precedentemente:

- Los contenidos de **sales** y **Na⁺** intercambiable que se consignan en Tabla 3.3 tienen utilidad en las **clasificaciones taxonómicas** y ambientes semejantes a los que dichos valores fueron establecidos, *debiendo ajustarse a cada sitio si se tiene una finalidad productiva sustentable*.

- Los niveles de **Na⁺, expresados como PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable, en la solución interna del suelo) o RAS (Relación de Adsorción de Sodio, en la solución externa del suelo) y sales en general CE** que afectan a un cultivo (punto 3.8) y suelo en particular (punto 3.9), dependen de las características de ambos, y como se relacionan. Consecuentemente en función del cultivo, sistema productivo, clima, tipo de suelo, y calidad del agua subterránea.

- Los límites serán los que mejor relacionen las **propiedades medidas de CE, PSI o RAS**, con las **observaciones a campo**, principalmente en aquellas otras propiedades edáficas que se ven afectadas por las sales (principalmente permeabilidad), y con la **respuesta del cultivo**.

- Valores de **4 dS.m⁻¹ y 15 PSI o 13 RAS**, resultan **muy elevados para una producción sustentable** de la mayor parte de los cultivos comunes, y cultivos intensivos. Las **propiedades físicas** del suelo pueden ser afectados con **PSI entre 2 a 50 %**, otras propiedades edáficas deben ser consideradas. El límite de **2 dS.m⁻¹** de sales resulta más adecuado para los cultivos comunes, aunque excesivo en cultivos sensibles.

- El **origen de la salinidad-alcalinidad** debe establecerse al definir la gravedad de dichos procesos, posibilidad de ser controlado o mejorado, y rangos a considerar, Por ejemplo, *material original, características de la superficie freática, funcionamiento hidrogeológico del*

lugar (punto 3.6), secuencia de horizontes, contenido y tipo de arcillas, presencia de coloides en general, condiciones climáticas. Estos temas se amplían en puntos siguientes.

3.4 Sodificación – Alcalinización

En relación a **los valores de pH** presentados en la Tabla 3.3, es importante **distinguir** entre **dos conceptos** que con frecuencia se dan como sinónimos, **sodificación y alcalinización**:

Sodificación: proceso en el cual **aumenta el contenido de Na^+** intercambiable pero **no necesariamente se produce un incremento de pH** (Pizarro, 1978; Porta et al., 1994).

Alcalinización: proceso en el cual se incrementa el **Na^+ intercambiable** y se acumula **Na_2CO_3** . El anión acompañante de las sales determina la elevación del pH. La hidrólisis del **Na^+** intercambiable o del **Na_2CO_3** produce un incremento del **pH** a valores de alrededor de **10**, que son los que caracterizan a los suelos alcalinos. Se produce **dispersión de arcillas**, y de la **materia orgánica** (Porta et al., 1994, Pla Sentis, 2014) (punto 3.5.2).

3.5 Principales tipos de suelos afectados por sales

Los suelos afectados por sales incluyen suelos con variadas propiedades cuyo rasgo común es que han sido o son afectados por sales o presentan potencial de ser afectados por ellas en el futuro, presentando también como rasgo común diversos grados de limitaciones para el desarrollo de la vegetación (Lavado y Taboada, 2017).

Si bien se describen diferentes tipos de suelos afectados por sales (Tabla 3.2), los que revisten importancia por su distribución a nivel mundial y nacional, son los **suelos salinos y los alcalinos**. Pla Sentis (2014) indica que ambos procesos, salinización y alcalinización, resultan del balance de agua y soluto, en condiciones naturales o en producciones con riego, afectando las propiedades físicas y químicas del suelo, con consecuencias generalmente negativas sobre el ambiente, producción de cultivos, salud humana y animal. Este autor destaca que la salinidad y alcalinidad están relacionadas con **procesos hidrológicos**, pero en el caso de **suelos sódicos** ocurren reacciones químicas y físicoquímicas, que hacen más difícil su predicción, siendo esto particularmente importante cuando están asociados a una superficie freática.

Establecer límites para definir el nivel de salinidad-alcalinidad que afecta a los cultivos y a los suelos, es complejo debido a que dependen principalmente del tipo de suelo, mineralogía, cultivo, manejo, y clima (Pla Sentis, 2014). Sin embargo, puede indicarse que los **suelos salinos o sódicos**, pueden ser diferenciados principalmente por las sales que prevalecen. Los **cloruros**

y **sulfatos** principalmente de **sodio** prevalecen en los **suelos salinos**; y **carbonatos y bicarbonatos de sodio**, en los **suelos sódicos o alcalinos** (Tabla 3.2).

El estudio de la *génesis de suelos afectados por sales*, iniciado por la escuela rusa a principios del siglo XX, así como los criterios de clasificación de los suelos halomórficos basados en su origen, contenido de sales y tipos, han tenido diferentes e incluso controvertidos criterios, tal como se desprende de la detallada revisión efectuada por Imbelloni *et al.* (2010). Los resultados y análisis no son concluyentes en todos los aspectos vinculados a la comprensión de los suelos afectados por sales, principalmente al definir el origen de las sales, tipos y concentraciones de dichas sales, así como las variables edáficas y límites de estas a fin de distinguir nivel de afectación del suelo.

Como se indicó en punto 3.3.2, Pla Sentis (1979, 2014, 2017) destaca que se requiere **evaluar en cada caso en particular** el nivel de salinidad y alcalinidad que afecta a los suelos y a los cultivos, basándonos en experiencias y observaciones, a fin de elegir los cultivos más apropiados y/o las prácticas que coadyuven o resulten sustentables para las limitantes del sitio vinculadas a la salinidad/alcalinidad. Asimismo, se requiere especial análisis para comprender el origen y formación de los suelos sódicos, considerando las reacciones físico-químicas que se producen.

En la bibliografía clásica, tal como se presentó en Tabla 3.3, criterio agrofisiológico de clasificación, que es la que en general considera la taxonomía de suelos, incluye una categoría intermedia denominada de **suelos salino-sódico**. Lavado y Taboada (2017) señalan que esta categoría no es utilizada actualmente si bien sigue siendo muy difundida. Estos autores explican que el criterio para definir sodicidad es que exista Na^+ intercambiable y como las sales solubles son principalmente sódicas, todos los suelos con sales tienen altos niveles de Na^+ intercambiable. Naidu y Rengasamy (1993 en Lavado y Taboada, 2017) señalan que **en términos prácticos los suelos salino-sódicos no se diferencian de los suelos salinos** dejándose de utilizar dicho concepto. Cabe indicar que los suelos salinos aún con elevado contenido de Na^+ pueden contener importantes cantidades de Ca^{+2} (Porta *et al.*, 1994). Los límites son por lo expuesto controvertidos, requiriéndose definirlos en cada caso particular por sus efectos en el ambiente en general (Pla Sentis, 2014).

En puntos siguientes se analizan con mayor detalle los suelos que se definen como salinos y sódicos.

3.5.1 Suelos salinos

Se define como suelos salinos a aquellos en los que se produce una **acumulación de sales más solubles que el yeso** suficiente como para interferir en el crecimiento de la mayoría de los cultivos y otras plantas no especializadas (Porta *et al.*, 1994) (solubilidad del yeso dihidratado es de 2,04 g/l). Todos los suelos tienen una cantidad de sales solubles, cuando dicha concentración se eleva y supera la tolerancia normal de los cultivos

extensivos comunes, es que se considera que se produjo el proceso de salinización. La salinidad del suelo se expresa por la concentración de solutos (meq.litro^{-1} o mmoles.litro^{-1}) o por la conductividad eléctrica (CE, dS.m^{-1}) de la solución del suelo, proveniente de diferentes relaciones suelo:agua (punto 3.11).

Las sales que predominan son SO_4^{-2} y Cl^- de Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} (Porta *et al.*, 1994; Pla Sentis, 2014). Por su parte, Lavado y Taboada (2017) indican que son las sales solubles de **cloruros y sulfatos de sodio** las que prevalecen. Estas sales, dada su **alta solubilidad**, siguen los movimientos ascendentes, descendentes y laterales del agua, por lo cual se asocian a los procesos hidrológicos. Pla Sentis (1979), Porta *et al.* (1994), Imbellone *et al.* (2010), indican que estos suelos se presentan generalmente en **zonas áridas** con cierta cantidad de CaCO_3 , MgCO_3 , y CaSO_4 **precipitados** en el perfil, y se caracterizan por presentar **costras salinas** en superficie de **color blanco** cuando el balance de agua resulta negativo. En general, las sales se acumulan en zonas y profundidades donde el régimen de humedad del suelo tiene fuertes pérdidas de agua por EVT y un reducido lavado de las sales (Pla Sentis, 2014).

Consecuentemente, si bien el Na^+ es el catión que siempre está presente en cantidad significativa y es el que permanece en solución en los procesos de dilución-precipitación de las sales que por ejemplo se aportan por el riego o agua freática (Figura 3.10), los **suelos salinos** tienen proporciones de Na^+ inferiores a las que transformarían a dicho suelo en sódico, manteniendo proporciones importantes e incluso mayores de Ca^{+2} y también, presencia de Mg^{+2} y K^+ en el complejo de intercambio. Pizarro (1984) y Pla Sentis (2014, 2017) explican los procesos de precipitación-dilución que se producen al regar un suelo con aguas de variada composición (Figura 3.12, punto 3.9.2).

Los suelos salinos inciden **sobre los cultivos** por la alta presión osmótica de la solución edáfica que dificulta o reduce drásticamente la posibilidad de absorción de agua por las plantas u otros organismos vivos del suelo, pero *no inciden* directamente en forma desfavorable sobre las propiedades físicas de los **suelos**. La permeabilidad es igual o mayor a la de suelos similares no salinos (Porta *et al.*, 1994). Varallyay (1981) indica que si bien pueden presentarse en algunas circunstancias capas que limitan el **almacenamiento de agua**, se encuentran **siempre floculados** debido al exceso de sales. Cabe destacar **que la floculación** aunque es una condición necesaria de la **estructuración**, no indica ni asegura la formación de una **buena estructura**. Asimismo, **son pobres en materia orgánica** a causa del escaso desarrollo vegetal que se produce en estos suelos, afectando en última instancia la física de dicho suelo. Entre las especies herbáceas que prevalecen se indican, *Salicornia sp.*, *Atriplex sp.*, *Suaeda sp.*, *Puccinellia sp.*, *Distichlis sp.*, *Cynodon dactylon*, *Hordeum sp.*, *Limonium sp.*, *Tamarix sp.* etc. Sin embargo, son variadas las composiciones florísticas herbáceas, arbustivas y arbóreas que pueden presentarse en diferentes regiones climáticas e incluso dependiendo del origen de la salinidad y su composición.

Inicialmente estos suelos fueron denominados por las escuelas rusas como **Solonchak**, denominación que persiste en el sistema clasificatorio de suelos de la FAO (2016). Los suelos

salinos se ubican en Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) en los órdenes Aridisoles, Vertisoles e Inceptisoles (Imbelloni et al., 2010). Los Solonchak equivaldrían principalmente con los **Salortid** (Lavado y Taboada, 2017). La evolución de su estudio, clasificaciones, y denominaciones que estos suelos tienen y han tenido según diferentes escuelas son detalladamente analizados en Imbelloni et al. (2010).

3.5.2 Suelos sódicos

Los suelos sódicos se caracterizan por tener suficiente concentración **de Na^+ en solución y en forma intercambiable en los coloides edáficos** como para afectar adversamente la producción de los **cultivos y la estructura de la mayoría de los suelos** (los coloides se dispersan) (Porta et al., 1994). Pla Sentis (2014) señala que el **alto nivel de Na^+** puede estar acompañado en algunos casos por **Mg^{+2}** , por lo cual propone además de las clásicas mediciones de RAS y PSI, el uso del índice CROSS (Cations Ratio of Soil Structural Stability) a fin de considerar el efecto dispersante del **Mg^{+2}** (punto 3.11). Imbellone et al. (2010) cita a Ali et al. (1985) quienes indican que la dispersión por Na^+ de las arcillas puede modificarse por el catión bivalente complementario, así por ejemplo un suelo saturado por Na^+ y **Mg^{+2}** se dispersa a un valor de PSI más bajo que uno saturado por Na^+ y **Ca^{+2}** .

Estos suelos **no contienen** gran cantidad de **sales solubles neutras** (sal formada por un ácido y una base fuerte, Tabla 2.12). Pla Sentis (2014) señala que los problemas de sodicidad se producen por cambios en la composición y concentración de las sales en solución, con cambios en los cationes intercambiables en equilibrio, conduciendo a una acumulación relativa de Na^+ en solución e intercambiable. La acción dispersante del **Na^+** en las arcillas y la solubilización de la materia orgánica afecta directamente a las **propiedades físicas** del suelo, los agregados son poco estables y el medio presenta un **“régimen de humedad extremo”** (Varallay, 1981, punto 3.9.1) según el grado de sodificación alcanzado y la textura (punto 3.9.2). El deterioro físico del suelo determina que el manejo del riego (infiltración y almacenamiento de agua) y prácticas de labranza se dificulten a tal punto que en situaciones extremas de alcalinidad exista una imposibilidad de producir económicamente (Pla Sentis, 1979; Porta et al. 1994).

En relación al **pH de estos suelos**, el **Na^+** que domina el complejo de cambio, provoca por hidrólisis una elevación del pH (Capítulo 2, punto 2.2). Asimismo, el pH de estos suelos está influenciado por los **aniones del suelo** (carbonatos y/o bicarbonatos), tal como se explica en punto 3.7.3. Sin embargo, diversos autores explican las circunstancias en las cuales es posible que aún con muy alto contenido de Na^+ , el pH es neutro e incluso hasta ácido. Así, Szabolcs (1988), señala que si bien un suelo sódico presenta **elevado PSI (entre 5 y 25) y pH elevados**, estos pueden variar marcadamente, pudiendo ser **hasta ácidos en superficie** y

encontrándose situaciones en las cuales **pH fuertemente alcalinos** no se dan en ningún lugar del perfil (Tabla 3.4). Esto también se explica en Imbellone *et al.* (2010).

Pizarro (1978) describe la presencia de **napas freáticas muy salinizadas**, que conducen a la **floculación de arcillas sódicas** con pH inferior a 7. Esto es debido a que la solución del suelo contiene abundante Na^+ aportado por el agua freática, que controla la hidrólisis de sales de Na^+ intercambiable con liberación de OH^- . Sobre este punto, debe indicarse que en los **flujos de agua subterránea** de largo recorrido en sus zonas de **descarga** prevalecen las aguas ricas en de NaCl (Tóth, 2000). En estos casos los suelos son altamente sódicos con pH que pueden variar desde ligeramente ácidos a ligeramente alcalino, aumentando en los casos en que la actividad biológica y el agua, genera HCO_3^{2-} y CO_3^{2-} o inciden flujos con otra calidad de agua (punto 3.6.3).

A continuación, se comenta un caso de estudio en la localidad de Lincoln donde se reconocieron **suelos de zonas de descarga** (*Hapludol ácuico*, HA, con hidromorfismo y sodicidad a partir de 26 cm de profundidad; *Hapludol tapto nátrico*, HTN y *Natracuol típico*, NT) (Alconada y Damiano, 2017). Todos estos suelos en alguna parte del perfil tienen elevada salinidad y/o alcalinidad, los dos primeros (HA y HTN) se ubican en lomas planas extendidas y el NT en media loma baja. Ambos procesos, se reconocen aún en suelos *Natracuoles típicos*. Esto es común en ámbitos donde las superficies freáticas se encuentran próximas a la superficie e inciden en la formación del suelo según el funcionamiento hidrológico del ambiente (Imbellone *et al.*, 2010). En el noroeste bonaerense, se reconoce la existencia de flujos de agua de tipo local e intermedios que coexisten en un mismo sitio dependiendo de lluvias locales y de otras regiones donde los flujos intermedios se originan (Alconada *et al.*, 2011a) (punto 3.6.3).

En la Tabla 3.4 se presenta a modo de ejemplo la caracterización físicoquímica de suelos clasificados como *Hapludol ácuico* (HA), *Hapludol tapto nátrico* (HTN) y *Natracuol típico* (NT), con las características del agua del agua freática subyacente (promedio nueve fechas de muestreo). Se indica en los suelos la secuencia de horizontes, profundidades, composición de cationes intercambiables y solubles, pH y salinidad. En el agua se indica profundidad a la cual se encuentra en el perfil y su composición química. Se destaca que en general la calidad del agua freática no varió significativamente entre fechas de muestreo en ninguna de sus propiedades físicoquímicas, incluso en épocas de fuertes lluvias locales, lo cual confirma su origen en zonas de recarga muy alejadas al sitio de estudio (Alconada *et al.*, 2011a, y Alconada y Damiano, 2017).

Suelo		Prof	pH	CE dS/m	Cationes intercambiables (me.100 ⁻¹)					Cationes Solubles (me.l ⁻¹)				
					Ca	Mg	K	Na	PSI	Ca	Mg	K	Na	RAS
HA	A	0-26	6,5	0,3	7,3	2,2	1,8	0,4	2,8	0,6	0,4	1,0	1,5	2,2
	AB	26-44	8,4	0,4	3,7	1,9	1,0	1,1	13	0,5	0,5	0,4	3,8	5,6
	Bwn1	44-74	10	2,5	5,2	4,2	2,7	6,8	48	0,5	2,3	1,2	24,3	21
	Bwn2	74-93	10	1,9	3,6	4,4	3,1	7,1	47	0,4	1,9	1,1	19,1	18
Agua freática 93+			7,9	3,3						0,7	2,4	0,8	29,5	23
HTN	A	0-30	6,3	0,3	7,6	2,9	1,6	0,3	2,3	0,9	0,3	0,7	1,1	1,1
	AC	30-45	8,5	0,6	2,8	2,6	1,3	1,2	18	0,5	0,5	0,5	6,6	7,7
	2Bt	45-61	9,6	1,9	---	---	4,2	7,6	36	0,7	0,5	0,9	20,2	21
Agua freática 151+			8,0	4,5						0,5	3,6	0,9	42,7	30
NT	A	0-29	8,8	47,4	---	---	1,7	29	100	19,5	57,5	7,7	414	60
	2Bt1	29-49	8,6	10,8	---	---	3,2	17	66	3,3	5,9	2,2	102	41
	2Bt2	49-59	8,8	11,1	---	---	2,9	16	74	3,8	6,6	2,2	112	42
Agua freática 59+			7,7	11,8						0,6	15,8	1,9	109	38

Tabla 3.4 Características físico-química del suelo y agua freática en tres posiciones de un establecimiento de Lincoln: Loma plana extendida HA, Hapludol ácuico y HTN, Hapludol tapto natrico; y en media loma baja, NT, Natracuol típico (Adaptada de Alconada *et al*, 2014)

Por último, respecto a las correspondencias entre las formas de clasificar e identificar a los suelos sódicos, se indica que estos fueron denominados por las escuelas rusas como **Solonetz**, denominación que persiste en el sistema clasificatorio de suelos de la FAO (2016) (Imbellone *et al.* 2010), mientras que en Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) pertenecen a diversos Gran Grupo de los Órdenes Molisoles, Alfisoles, Vertisoles y Aridisoles, apareciendo a nivel de Subgrupo en diversos Órdenes. Específicamente los **Solonetz** se corresponde con los Grandes Grupos **Natracuol** y **Natracualf** (Imbellone *et al.*, 2010, Lavado y Taboada, 2017). La evolución de su estudio y denominaciones que estos suelos han tenido son detalladamente analizados en Imbelloni *et al.* (2010). En la escuela rusa se indica un tercer tipo de suelo asociado a los suelos Solonetz, que se denominan **Solods** (Figura 3.14). Estos suelos están fuertemente degradados y se forman por una prolongada percolación e intercambio de Na⁺ adsorbido por H⁺, generándose un horizonte eluvial blanquecino (horizonte E, albico) con un pH bajo. Estos suelos se corresponderían con el **Natralbol** del Soil Taxonomy (Imbellone *et al.*, 2010). En esta última publicación, Kovda (1967) y Szabolcs (1988), se describe detalladamente la formación de estos suelos, y se explica en punto 3.9.3 de esta publicación.

Kovda (1967), Szabolcs (1988), Imbelloni *et al.* (2010) describen dos tipos principales de suelos sódicos, **sin** formación de horizonte B, y **con** formación de horizonte B.

3.5.2.1 Sódicos sin formación de horizonte B

Estos suelos son formados bajo la influencia de concentraciones altas de Na^+ , en climas áridos o semiáridos, pueden tener altas concentraciones de sales solubles, y se encuentran generalmente asociados a los suelos salinos, a los cuales se asemejan (Lavado y Taboada, 2017). Lavado (1988) señala la existencia de estos suelos asociados a suelos salinos en el oeste de la provincia de Buenos Aires. Se presentan principalmente en los Órdenes Aridisoles, Inceptisoles y Entisoles. Por ejemplo en el Orden de suelos Aridisol, Subgrupo **Aquicambid sódico**, teniendo como requisito 15 de PSI o 13 de RAS en 25 cm de espesor; en el Orden **Inceptisol**, Subgrupo **Vermaquept sódico**, con más de 7 de PSI o 6 de RAS en uno o más subhorizontes, y entre los Entisoles se indican los Subgrupos, **Endoacuent sódico**, **Hidracuent sódico** y **Psamacuent sódico** (Imbellone *et al.*, 2010). En la Figura 3.1 se presentan un ejemplo de suelo sódico sin desarrollo de horizonte B, en el río Chubut, se destaca la presencia de vegetación de *Distichlis sp.* (pelo de chanco) (Alconada en IICA-PROSAP, 2013).



Figura 3.1 Talud río Chubut y detalle del suelo, Entisol con vegetación halófila, sin desarrollo de horizonte B, en el río Chubut

3.5.2.2 Suelos sódicos con formación de horizonte B

Los suelos sódicos con desarrollo de horizonte B, son frecuentes en ambientes húmedos formados bajo la influencia de una comparativamente **baja** concentración de Na^+ (alcalinidad moderada) y baja salinidad. Lavado y Taboada (2017) indican que los suelos con B nátrico (Btn, Soil Taxonomy) son los antiguamente conocidos como Solonez y Solod. Lavado (1988)

indica que si bien pueden presentarse en *zonas áridas* tal como los **Natrargides** (*paleoclimas*), son comunes en *ambientes húmedos* donde la translocación de elementos es posible (ejemplos **Natracuert**, **Natracuol**, **Natracualf**).

El horizonte **B_{tn}** de estos suelos, presenta acumulación de arcilla, sesquióxidos y materia orgánica soluble en agua, y en relación al resto del perfil edáfico un valor de PSI máximo y un mínimo de SiO₂ (punto 3.9). Este horizonte se forma por la eluviación de material desde el horizonte A y por formación de arcilla in situ, que en sucesivos **procesos de humedecimiento y secado** da origen a la formación de una **estructura columnar**, que es la estructura típica de estos suelos. Sin embargo, estas columnas fueron inicialmente **estructuras prismáticas** que se redondearon en su parte superior por la acción dispersiva del Na⁺, y debido a que el proceso de humedecimiento-secado se hace máximo en el sector entre el horizonte A y el techo del B por diferencias texturales y capilares. Algunos autores también indican, que la formación de columnas se vincula al efecto dispersivo del agua de lluvia, con baja salinidad, que se acumula en el techo del Bt sódico. Imbellone *et al.* (2010) indican que en algunos lugares de la región pampeana (Cuenca del Samborombón, Buenos Aires) con muy elevado contenido de Na⁺ intercambiable, los horizontes B_{tn} (nátricos) presentan **estructuras en bloques angulares y subangulares** muy finos producidos por la acción dispersante del Na⁺. Este es el caso del suelo **Natracuol típico** presentado en Figura 3.2 (derecha). Si bien, como se comentó la estructura columnar es la manifestación típica de los suelos sódicos, *en la Argentina, es más frecuente encontrar estructuras prismáticas y hasta bloques subangulares* (Lavado, 1988).

En la Figura 3.2 se presenta el perfil del suelo **Natracualf típico** de la planicie continental de la Pampa Deprimida en la localidad de Punta Indio (Buenos Aires), lindando con la planicie aluvial. Este suelo se intercala con suelos **Natracuol típico** en los sectores denominados canales de marea que se distribuyen por la planicie continental (ámbito de intrusiones marinas).



Figura 3.2 **Natracualf típico** con desarrollo de horizonte B_{tn} nátrico, y detalle de estructura columnar (izquierda) y **Natracuol típico** (derecha), Punta Indio, Buenos Aires

3.5.3 Suelos salino – sódicos

Precedentemente se comentó lo señalado por Imbellone *et al.* (2010), Pla Sentis (2014), Lavado y Taboada (2010), respecto a que actualmente *esta categoría de suelos se considera que no se diferencia sustancialmente de los denominados salinos*. No obstante, en base a la difusión que aún tiene esta categoría de suelos en la bibliografía se indica a continuación que características podría indicarse “*intermedias*” entre los típicos salino y sódicos en relación a sus propiedades y composición que prevalece.

Pla Sentis (1979), Porta *et al.* (1994) indican que los suelos salino-sódicos son aquellos que contienen una elevada proporción de *sales más solubles que el yeso y sodio intercambiable*. Son el resultado de los procesos combinados de salinización y sodificación. Generalmente contienen **CaCO_3 y MgCO_3** precipitado pero nunca cantidades apreciables de CaSO_4 , y en *solución* suficiente cantidad de *sales, especialmente Na_2SO_4* , como para afectar la absorción de las plantas y la producción económica de los cultivos. Su apariencia y propiedades son similares a los suelos salinos, el pH raramente supera el 8,5 y las partículas finas permanecen floculadas. Si el exceso de sales es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente llegando a ser idénticos a los suelos sódicos. Las sales en solución externa controlan la expansión y superposición de las dobles capas difusas de los coloides cuando en estos prevalece el Na^+ intercambiable. En la Figura 1.1 se presentó un esquema de un coloide floculado vs dispersado con superposición de dobles capas donde puede visualizarse el proceso que aquí se comenta. Desde el punto de vista del manejo este suelo “salino-sódico” es potencialmente sódico.

En la Figura 3.3 se presenta un ambiente salino y alcalino en Gualjaina, Cuenca Alta del río Chubut. En la Figura 3.4 se aprecia un detalle de la laguna de la Figura 3.3, con eflorescencias salinas en forma generalizada, y un detalle de un sector próximo con mayor salinidad (costra salina) (Figura 3.5). (Alconada en IICA-PROSAP, 2013). Estos ambientes se visualizan en las imágenes satelitales Google formando amplios sectores blancos, tal como se presenta en Figura 3.19 (punto 3.10) y en la Figura 1.16 de la primera parte de este libro (Alconada *et al.*, 2018a). Estos suelos también poseen un alto contenido de Na^+ , que se relaciona con las características del **agua freática** que se presenta en **superficie, pH 9,21 y CE > > 5000 uS/m** (límite del conductímetro utilizado) (Erico Bianchi, com pers.). La calidad de esta agua responde a *flujos de agua subterránea intermedios o regionales*, en **zona de descarga** (punto 3.6.3).



Figura 3.3 Ambiente salino-alkalino. Gualjaina, Cuenca Alta del río Chubut



Figura 3.4 Ambiente salino-alkalino. Gualjaina, detalle de laguna de Figura 3.3



Figura 3.5 Sector de Figura 3.3 con costra salina. Gualjaina, Cuenca Alta del río Chubut

3.6 Origen de las sales

3.6.1 Factores que inciden en la formación de los suelos salinos y sódicos

En forma general, pueden indicarse los siguientes **factores**:

- **Material original**: lentamente permeables, ejemplo: loess, aluvios, e intrusiones marinas (Imbellone *et al.*, 2010)
- **Clima** (ETP > precipitación): Suelos salino en clima árido y semiáridos. Suelos sódicos con Bt principalmente clima húmedo
- **Topográfica**: relieve deprimido, cóncavo, agua de escurrimiento, y principalmente en zonas de descarga de flujos de agua subterránea de diferente recorrido con superficies freáticas próximas (flujos ascendentes, punto 3.6.3).
- **Tipo de suelo e hidrogeología**: capas impermeables a escasa profundidad: arcilla compactada, tosca, yeso. Idem anterior, superficie freática poco profunda, tipo de flujo subterráneo y zona dentro de este.
- **Antrópica**: mal manejo del suelo y del agua de riego, y calidad de agua y suelo a regar. En general, salinidad con todas las aguas, y alcalinidad principalmente con las bicarbonatadas sódicas. Suelos con baja permeabilidad son los más afectados por el riego.

Estos factores se asocian a los que otros autores denominan, **Ciclos de salinización**.

3.6.2 Ciclos de Salinización

Kovda, 1965; Porta *et al.* (1994), señalan que el origen de los suelos afectados por sales se debe a la ocurrencia de “**ciclos de salinización**”, que quedan caracterizados por el **origen** de las sales y de los **procesos** que se van sucediendo, de modo de que dichas sales lleguen a una concentración tal que generen un suelo afectado por sales.

Porta *et al.* (1994) describe los siguientes ciclos de salinización: i) Ciclos continentales (acumulación primaria de sales y acumulación secundaria de sales). ii) Ciclos marinos. iii) Ciclos deltaicos. iv) Ciclos artesianos- Agua subterránea. v) Ciclos antropogénicos. Cabe destacar que Porta *et al.* (1994) si bien incluye en el ciclo artesiano al agua subterránea, no la considera directamente con la incidencia probada en la formación de los suelos afectados por sales (Töth, 2000; Imbellone *et al.* 2010, Alconada *et al.*, 2011a, Lavado y Taboada, 2017).

Ciclos continentales_. Se corresponden con este ciclo de salinización los suelos salinos formados en el interior del continente, tienen su origen en la **movilización, redistribución y acumulación de Cloruros, Sulfatos, Bicarbonatos y Carbonatos de sodio**, que se encuentran condicionados por: **clima** (aridez o semiaridez, principalmente en suelos salino); **régimen de humedad** no percolante (régimen de humedad del suelo arídico o ústico en suelos salinos); y **posición geomorfológica** baja y/o clases de drenaje deficiente.

Dentro de este ciclo continental Porta *et al.* (1994), indican que pueden darse *dos situaciones principales*:

i) **Acumulación primaria de sales:** se produce por meteorización de rocas y posterior salinización del suelo en el mismo lugar donde se han originado dichas sales. Estos autores indican que es **poco frecuente** dada la escasa meteorización de las rocas en condiciones de aridez, y en el caso de que exista suficiente agua los elementos liberados en la meteorización pueden ser objeto de transporte y redistribución en el paisaje sin salinizar in situ. Sin embargo, es de destacar que en algunos ambientes de Argentina, tal como en la Patagonia, por ejemplo en ámbitos de mallines, la descarga de agua freática en sectores bajos podría generar un efecto combinado, acumulación de sales proveniente de los materiales litológicos que el agua intertemperiza y permanece en donde descargó debido son zona de descarga de algún flujo de agua subterránea. En zonas de descarga el movimiento del agua es ascendente y no tendría un escurrimiento significativo (punto 3.6.3).

ii) **Acumulación secundaria de sales:** la movilización, redistribución y acumulación de sales a cierta distancia de su lugar de origen, caracteriza a los ciclos de acumulación secundaria. Se originan a partir de rocas sedimentarias de los **océanos* o lagunas salobres**, los cuales contienen sales solubles precipitadas. Al quedar cerca de la superficie o aflorar, actúan como *Centros de Redistribución de Sales*. Las aguas de escorrentía superficiales o el agua de percolación, movilizan las sales desde estos centros y las acumula en depresiones con drenaje deficiente. (*http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/hm/sec_11.html)

Ciclos marinos. Los suelos de llanuras a lo largo de costas pueden presentar acumulación de sales marinas, principalmente **Cloruro de sodio**. Pueden provenir de **superficies freáticas** salinas poco profundas (asociadas al mar), agua de **inundación por mareas**, sales transportadas por el **viento** (gotas altamente salinas), este último sólo de importancia local.

Ciclos deltaicos. Los ciclos de salinización son complejos, se produce la **interacción del agua de mar, de ríos y de la superficie freática**. En general, esta última según se asocie al mar o al río varía su salinidad (salina y dulce respectivamente). Estos autores indican que el equilibrio del sistema es frágil y debe tenerse presente al plantear cualquier intervención. Cabe destacar adicionalmente, que el concepto de “agua dulce” resulta insuficiente para establecer su peligrosidad en los procesos de salinización-alcalinización. En la Argentina, muchos ríos como los que integran la Cuenca del Plata tienen variada salinidad, alcalinidad, y consecuentemente, diferente efecto en los suelos debido a que esto depende de la relación CE-RAS del agua y tipo de suelo (punto 3.3.2). Por ejemplo, el río Bermejo si bien su composición varía a lo largo del año y sitio, puede tener baja salinidad pero con un valor de RAS que aunque en valor absoluto es también bajo, la relación CE-RAS según se considera en Ayers y Wescot (1985) tendería a favorecer la alcalinización de los suelos que reciben esta agua.

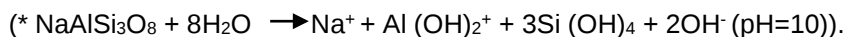
Ciclos artesianos- Agua subterránea. Porta *et al.* (1994) indican que en algunas áreas la presencia de suelos salinos no puede ser explicada por el clima ni demás factores presentes, la salinización es debida a **aguas profundas al ascender** por microfallas o frac-

turas atravesando materiales ricos en sales y posterior **evaporación**. Al respecto, cabe incorporar lo indicado por otros autores respecto a la salinidad de los suelos debida al **ascenso de agua subterránea en ámbitos de descarga como flujo ascendente**, tal como explica la teoría de flujos de agua de Tóth (2000). En las **zonas de descarga de los flujos** de agua (local, intermedio o regional), el agua tiene dirección ascendente por presión, **potencial hidráulico**, que queda definida por la altura de la columna de agua en la zona de recarga (profundidad hasta donde desciende) y por la distancia que recorre hasta descargar como flujo ascendente (gradiente hidráulico) (Freeze y Cherry, 1979; Tóth, 2000; Price, 2003; Sánchez San Román, 2012), y por **capilaridad** (zona capilar entre la zona saturada y no saturada) (ver punto 3.6.3).

El origen de los suelos afectados por sales a partir del agua subterránea ha sido documentado en muchos ámbitos de la **llanura Chaco pampeana y Valles patagónicos**.

Imbellone *et al.* (2010) indican que es el agua subterránea el principal origen de los suelos afectados por sales de la **región pampeana**. Alconada *et al.* (2011a), Alconada *et al.* (2014, 2016), Alconada y Damiano, (2017) en ambientes del **noroeste bonaerense** (Pehuajo, Carlos Casares, Trenque Lauquen, 9 de Julio, Lincoln) identifican flujos de agua subterránea locales (lluvias del sitio que no salinizan) que coexisten con flujos intermedios (responden a lluvias de regiones lejanas, salinizan y alcalinizan). Estos últimos flujos en algunos sitios se reconocen en forma permanente, y en otros se manifiestan en épocas de grandes crecidas regionales conduciendo a que aguas freáticas de flujos locales se mezclen con las provenientes de los flujos intermedios y eleven marcadamente su salinidad y alcalinidad (Alconada, 2008 y Alconada *et al.*, 2011a). En estos estudios se ha reconocido **una vinculación regional a diferentes escalas entre flujos de agua y tipos de suelos**. Por ejemplo, dentro de un establecimiento se aprecian efectos locales y regionales, y se relacionan entre sí, los sectores más elevados (lomas y lomas planas extendidas) con los más bajos (medias lomas bajas, bajos tendidos o depresiones) (Figura 3.18, en punto 3.10). A una escala de menor detalle, se aprecian también vinculaciones (suelo-agua-posición local-regional) entre localidades próximas del partido de Trenque Lauquen, tal como entre Mari Lauquen y Beirutti (Figura 3.15 y 3.16, en punto 3.10) o entre localidades vecinas como Pehuajó, Trenque Lauquen, y Lincoln, esta última, al menos en algunos sectores, funcionaría como zonas de descarga de partidos vecinos (Alconada, 2008; Alconada y Damiano, 2017).

Cabe destacar que no sólo debe considerarse la composición litológica de los materiales por donde el agua circula desde su recarga hasta su descarga, sino también, el tiempo de permanencia del agua en la zona que descarga, con drenaje impedido, y que posibilita alteraciones in situ de los materiales mineralógicos presentes en los sedimentos (punto 2.2.2). En punto 2.2.2 de esta presentación se analizó el efecto de la meteorización sobre el pH y productos de reacciones frecuentes según pH-Eh-composición, tal como la de la albita*. En el loess la presencia de albita (feldespato sódico) es importante. En Alconada *et al.* (2017) se analiza la presencia de As, F, salinidad y alcalinidad, asociados a los materiales originales de los suelos y al agua incidente.



En la **provincia de Chaco** se reconoce un patrón irregular de ambientes debido al funcionamiento hidrológico (subterráneo y superficial), y diferentes depósitos sedimentarios (discontinuidades litológicas) que varían marcadamente en espesor y generan zonas altas de *albardones* (potencialmente sódicas) que alternan en forma irregular, con *esteros* y *suelos bajos* con elevado hidromorfismo y/o halomorfismo debido al agua subterránea (Alconada en IICA-PROSAP, 2013) (ver punto 1.4.2 en primer parte de este libro, Alconada *et al.*, 2018a).

Otro ámbito muy estudiado en la llanura pampeana es en los **Bajos Submeridionales de Santa Fe** (Sosa, 2012, Sosa *et al.*, 2011, 2012, 2016). Estos autores estudian el origen del agua, procesos de salinización, alcalinización y prácticas de manejo agropecuarios, desde una perspectiva integral, considerando los sistemas de flujo de agua subterránea Töthiana (Töth, 2000)

En **ambientes patagónicos**, tal como en valles y ambientes de *mallines*, se reconocen en muchos de ellos, salinidad asociada al agua subterránea tal como se comentó en punto 2.6 y se amplía en punto 3.10 de esta publicación.

Ciclos antropogénicos_. i) riego y ii) industria y extracción de minas

i) El **Riego** conduce a la salinización y/o alcalinización de los suelos a los relativamente pocos años de iniciada esta práctica, dependiendo la dirección e intensidad del proceso, de la **calidad del agua de riego, intensidad del riego y características edáficas**, principalmente de la capacidad de este de eliminar por percolación profunda las sales aportadas en el agua de riego (**drenaje interno del perfil**).

En punto 3.1 se presentó la importancia y origen de la salinidad en el mundo y Argentina (Pla Sentis, 1988, 1993, 2017, Prieto *et al.*, 2015). En punto 3.3.2 se analizó el enfoque de estudio pedogenético que es el que considera el suelo y el agua. Como se comentó, aguas calificadas como no salinas y no alcalinas o de bajo riesgo tanto en salinidad como alcalinidad, *según el criterio de calificación de aguas propuesto por el Manual 60* (Richards, 1973) puede conducir a la salinización y/o sodificación de los suelos. Así por ejemplo se indica en este criterio que un agua calificada como C1S4 resultaría mejor que una C4S4 (ver punto 3.3.2 y Figura 1.1 en punto 1.1.2). Este criterio es aún **erróneamente** utilizado en diversos laboratorios para la interpretación de aguas de riego. Pla (1979, 1983 y 1988), Porta *et al.* (1994) consideran que este sistema de clasificación **“no tiene vigencia actualmente”**. García (2014) también analiza las dificultades de este criterio de clasificación. Resulta más adecuado utilizar el criterio de clasificación de agua de FAO (Ayres y Westcott, 1985) y con mucha mayor precisión el de Pla Sentis (1997, 2017). Este último autor desarrolla para definir la **calidad del agua en función del suelo a regar** el Modelo SAL-SODIMAR, en presencia o ausencia de una superficie freática.

Pla Sentis (1997, 2017) en este modelo, considera no sólo la **salinidad y alcalinidad** del agua, sino también, la composición relativa de los **iones** que la integran, y las características del suelo (permeabilidad, composición), a fin de establecer **el balance de sales**

(precipitaciones, concentraciones y diluciones) que podrían producirse en la solución edáfica. Esto es detenidamente explicado en Pizarro (1978) y en diversas publicaciones de Pla Sentis (entre 1983 y 2017). Asimismo, en relación al riego, se requiere definir la posibilidad de lixiviación de sales en exceso a fin de evitar la acumulación en el perfil (drenaje interno) (Nijensohn, 1972), y el destino de las aguas de drenaje las cuales pueden no sólo contener sales sino también pesticidas, contaminantes de las enmiendas orgánicas, etc (Pla Sentis, 2006b). En el caso de agua con riesgo de contaminación, debe maximizarse la eficiencia en las prácticas y sistemas de riego y drenaje, reduciendo las pérdidas y contaminación de otras aguas, y al mismo tiempo manteniendo a las sales a profundidades fuera del alcance de los cultivos (Pla Sentis, 2006b).

En **síntesis**, previo al riego debe estimarse el **balance de sales** en el suelo que surge de la relación suelo-agua, a fin de garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas. Esto es posible considerando la calidad de las sales aportadas por el riego, las características del perfil edáfico (composición química y posibilidad de drenar), y el posible aporte de agua de una superficie de agua poco profunda (superficie freática) que se eleve con el riego.

ii) Industria y explotación de minas. La **industria** aporta sales como nitratos y productos con azufre, produciéndose lluvias de carácter ácido que aumentan la tasa de meteorización. Otro aporte de sales es por la **explotación de minas** que pueden dejar residuos salinos o sódicos. El origen de la salinización por actividades industriales ocurre sólo localmente.

3.6.3 Sistemas de flujos de agua subterránea como integrador de elementos del paisaje. Aporte de sales a los suelos

En este punto se sintetiza y complementa lo desarrollado en primer parte de esta publicación en punto 1.2 (Alconada *et al.*, 2018a). Se destaca que a fin de permitir una continuidad en la lectura se incluyeron dos Figuras presentadas en dicha publicación.

Los ecosistemas y sistemas productivos de una región se distribuyen en un mosaico dinámico de funcionamiento. Los ecosistemas regulan y son consecuencia del agua subterránea. Los sistemas de flujo de agua subterránea son el **elemento integrador del paisaje**, se relacionan con el tipo de suelo, vegetación, posición topográfica, litología, y clima (Töth, 1962, 2000; Carrillo-Rivera, 2000).

La **teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea** y de la **continuidad hidráulica regional**, explican la vinculación entre ecosistemas y paisajes locales con los regionales. Engelen y Jones (1986) y Töth (1995) plantean el concepto de la **continuidad hidráulica regional** al reconocer que existe **interdependencia hídrica subterránea** entre zonas de una cuenca o entre cuencas vecinas, entre el agua subterránea y agua superficial, y estas, con la vegetación, suelo, relieve y unidades geológicas involucradas. Esto es confirmado por Töth (2000, 2008) respecto a que diferentes sistemas de flujo pueden ocupar una misma unidad acuífera; o por el

contrario, que un mismo sistema de flujo puede circular por dos o más unidades acuíferas (Carrillo Rivera, 2000).

La *teoría de los sistemas de flujo de agua* de Töth (2000) señala la existencia de tres tipos de flujos de agua subterránea, **local, intermedio y regional**. Cada uno de estos flujos posee tres zonas, **recarga, tránsito y descarga** (Figura 3.6). En la Figura 3.7 se presenta como **evoluciona la calidad de las agua** desde las **zonas de recarga** hasta las de **descarga**, dependiendo de las distancias y profundidades recorridas por las aguas, factores locales y regionales, vinculados a la geología, clima, entre otros (Töth, 2000). Este autor indica que en la **recarga** prevalecen aguas con mayor contenido relativo de HCO_3^- y menor de Cl^- , menor pH, menor salinidad, mayor contenido de oxígeno (Eh^+), y menor temperatura. En la **descarga**, prevalecen los Cl^- , aumenta el pH y la salinidad, disminuye el contenido de oxígeno, y aumenta la temperatura. El aumento de T° se debe al calor telúrico, el aumento de **pH** es variable dependiendo del tipo de sales (Tabla 2.12). La **anoxia** depende de diversos factores, materiales geológicos, reacciones ocurridas durante el recorrido del agua, permeabilidad de capas del subsuelo, y horizontes edáficos entre otros. Chávez Benites *et al.* (2018) señalan que los factores que influyen en la disolución de sales solubles son superficie de contacto, longitud del trayecto recorrido, concentración de sales en la roca, tiempo de contacto, temperatura y presión.

En forma general puede indicarse que en un agua de **reciente infiltración** prevalece:



En un agua de **largo tiempo de residencia**, se invierten los cationes y aniones que prevalecen:



Estas secuencias cationes-aniones, disolución-precipitación, se comenta también en la Figura 3.10, que se analiza en párrafos siguientes.

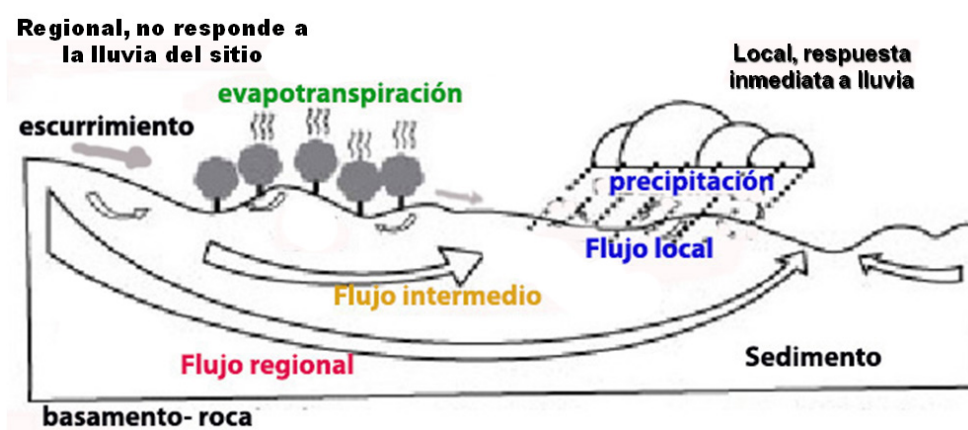


Figura 3.6 Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional (adaptada de Töth, 2000 en Alconada y Damiano, 2017) (presentada en Parte 1)

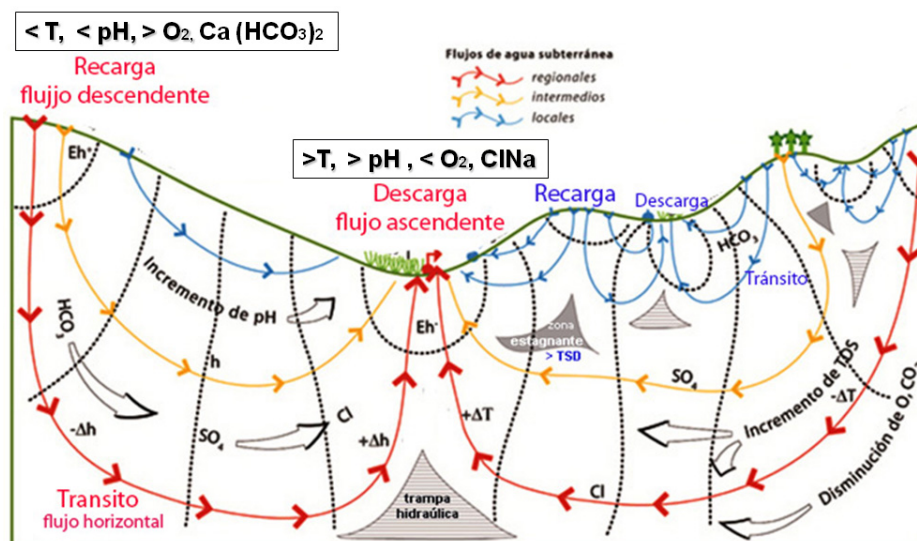


Figura 3.7 Sistemas de flujo subterráneo: zonas de recarga, descarga, e indicadores ambientales asociados (adaptada de Töth, 2000 en Alconada *et al.*, 2016) (presentada en Parte 1)

A continuación se explica sintéticamente cada flujo y posibles suelos asociados:

Flujo local. Responde a la precipitación acaecida en el sitio. El agua de lluvia infiltra en el suelo en la **zona de recarga**, que se corresponde con zonas más elevadas donde el flujo es descendente, y **descarga** en las zonas más bajas, donde el flujo es ascendente. Como el recorrido en estos flujos es corto la salinidad es baja (Figura 3.7). Si bien pueden dar origen o asociarse a diferentes tipos de suelos, puede indicarse como ejemplo para la Pampa Arenosa (noroeste bonaerense) en la recarga de un flujo local **Hapludol típico** y en la descarga **Hapludol ácuico** (Alconada *et al.*, 2011a; 2017). En la Pampa ondulada y Pampa Deprimida, por ejemplo, en la zona de recarga local puede asociarse con un suelo **Argiudol típico o Argiudol vértico** y en la descarga con un suelo **Argialbol típico**. En el Aula virtual de la Facultad de Cs Ag y Fs, UNLP, pueden consultarse estos perfiles analizados en la Estación Experimental de A Hirschhorn (Guía Interpretación de perfiles, Alconada, 2017).

Flujo regional. La distancia entre la zona de recarga y descarga es muy grande, por ejemplo se recarga en la Cordillera de los Andes y descarga en la provincia de Buenos Aires. El agua penetra profundamente y recorre muy largo recorrido, disolviendo y precipitando sales conforme se muestra en la Figura 3.7. En la **descarga** los suelos son muy salinos y/o alcalinos, y si bien presentan altas concentraciones de todas las sales, **prevalecen los Cl^-** como anión y el **Na^+ como catión** ($NaCl$), el pH es elevado (dependiendo de la sal dominante, Tabla 2.12), mayor es la temperatura, y menor el contenido de oxígeno (Figura 3.7).

Flujo Intermedio. Es una situación intermedia en recorrido y profundidad respecto a los otros flujos. Por ejemplo, la distancia entre la recarga y la descarga puede ser entre provincias vecinas, y en general, poseen elevado contenido de sales, dependiendo también de los materiales litológicos por donde circula. Muchos suelos de la pradera pampeana se corresponden con flujos de agua subterránea intermedios en sus zonas de descarga. Por ejemplo, en la

Pampa Deprimida los suelos **Natracualf y Natracuol típico** (Figura 3.2) y en *Pampa Arenosa*, también **Natracualf típico** y como característico de la región, el suelo **Hapludol tauto nátrico**.

Cabe destacar, que las **magnitudes en todas las variables físicoquímicas** son relativas dentro de un mismo flujo, y entre flujos, porque depende de todos los elementos del paisaje. Consecuentemente, no son valores absolutos en contenidos de sales, pH, etc, sino tendencias y valores que se vinculan entre la recarga-descarga de un ambiente en particular para uno u otro flujo. La Figura 3.7 muestra entonces el esquema general de funcionamiento de los flujos y calidades que prevalecen, pudiendo presentarse condiciones variables según como se combinan los elementos del paisaje. Asimismo, es de destacar que **en un mismo sitio** pueden **coexistir diferentes tipos de flujos** que conducen a variaciones en la calidad de agua que se mide en la superficie freática (agua más próxima a la superficie) cuando los flujos se mezclan. Por ejemplo, esto se produce en épocas de grandes inundaciones, flujos locales son afectados por flujos más profundos intermedios (Alconada *et al.*, 2011a). En la Figura 3.6 se aprecia la forma en que pueden coexistir flujos de diferente origen y calidades, que podrán o no hacerse presentes en un momento dado para una condición climática particular local y regional.

En síntesis, los flujos de agua descriptos pueden ser explicados por la existencia de la continuidad hidráulica regional (Engelen y Jones, 1986, Töth, 1995), la **presencia de sales en los suelos** se vincula a la forma en que inciden los **flujos de agua subterránea, (recarga-tránsito-descarga)**, y la distancia de recorrido y profundidad hasta la cual penetran en su recarga (**local-intermedio-regional**). Esta teoría de sistemas de flujo de agua subterránea (Töth, 2000), **combina o considera, varios de los ciclos de salinización** que se mencionaron precedentemente por Kovda (1965); Porta *et al.* (1994).

Los autores mencionados en último término plantean principalmente **fuentes de sales**, mientras que la teoría de los **Sistemas de Flujo de agua subterránea** de Töth (1963, 2000), integra elementos del paisaje de modo de entender todas las posibles fuentes de sales, y procesos que suceden. Este es un **concepto dinámico** donde la hidrogeología, clima, vegetación, manejo, explica en gran parte las sales que tiene un suelo.

Ejemplos de aplicación de la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea.

En **Cuba**, como ejemplo de agrupamiento de aguas por sus características, y definición de flujos, puede indicarse el realizado en Fagundo *et al.* (2005).

En **México**, son muchos los autores que trabajan aplicando este criterio de funcionamiento del paisaje con diferentes finalidades entre estas se destacan las publicación de J.J. Carrillo-Rivera, A. Ortega, R. Huizar, A. Cardona Benavidez, E. Wehncke, G. Hatch, entre otros. Son también numerosos los estudios en otras partes del mundo tal como en **Canadá, Australia, Hungría**, entre otros. Se destaca la inclusión de estudios de suelos en el análisis de los sistemas de flujo de agua subterránea en el trabajo de Peñuela *et al.* (2015), y recientemente por A. Kachadourian Marras (inédito) (ambos en México).

En **Argentina**, se aplicó este criterio (Töth, 2000) en el estudio de los Bajos Submeridionales y el norte de Santa Fe, se destacan algunos de los trabajos realizados por Sosa (2012) y Sosa *et al.* (2011, 2012, 2016). Asimismo, incluyendo estudios de suelos, se definió el origen

del agua de inundación del noroeste bonaerense y de prácticas de manejo que coadyuven en las alterantes sequías e inundaciones características de esta región (Alconada *et al.* 2009, Alconada *et al.*, 2011a, Alconada y Damiano, 2017). En estos estudios, se analizó agua proveniente de freáticos, pozos y lagunas, principalmente de las localidades de Trenque Lauquen y Pehuajó, y con menor intensidad en Carlos Casares, 9 de Julio, y otras localidades donde sólo se muestrearon lagunas. Se reconocieron flujos de agua **locales e intermedios**. En Lincoln, en estudios posteriores, se aprecia también la incidencia generalizada de flujos lejanos de tipo intermedio, con mucha mayor salinidad-alcalinidad que las localidades precedentes, principalmente en el agua de los freáticos no obstante presentarse en alturas topográficas semejantes (Alconada *et al.*, 2014, 2016). A modo de ejemplo, puede observarse en Tabla 3.5 los valores promedios de las aguas provenientes de freáticos (FR) (superficie freática entre 0,5 a 3 m de profundidad) y pozos (P) (6 a 10 m de profundidad), de los estudios en el noroeste bonaerense. Se aprecia que la salinidad y alcalinidad de los sitios muestreados en Lincoln, aún estando en posiciones topográficas (86-90 msnm) semejantes a las de las restantes localidades (80 a 100 msnm), son más elevadas, podría indicarse que funcionaría como zona de descarga de localidades vecinas.

Tabla 3.5 Valores promedio de propiedades físicoquímicas del agua

		pH	CE	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	CaCO ₃	STD	RAS
Fr	TL	7,8	3324	10,9	16,0	4,7	1,7	2,9	27,6	1,6	230,9	2.225	15,5
	Pe	7,3	3807	5,7	27,0	4,5	4,2	5,9	25,0	1,0	505,5	2.297	11,0
	Li	7,9	8979	18,1	46,3	31,2	3,1	10,3	84,0	1,4	668,9	6.419	34,2
P	TL	7,8	7315	6,2	63,5	17,7	5,1	16,7	68,7	1,1	1.095	5.407	16,9
	Pe	7,8	4022	15,2	22,5	6,6	1,7	4,9	37,2	0,8	325,9	3.026	20,2
	CC	7,0	8006	10,4	37,2	9,6	5,9	5,7	60,9	1,9	579,6	4.077	20,6
	Li	7,8	6127	15,7	27,5	15,9	3,4	6,1	52,3	1,2	476,0	4.090	23,5
aguas dulces *		6,5 - 8,5	100 - 2000	0,8 - 6 (13)	0,3 - 7	0,02 - 5,2	0,5 - 19	0,08 - 8,2	0,04 - 6,5	0,002 - 0,25			

pH, conductividad eléctrica (CE: $\mu\text{S m}^{-1}$) cationes y aniones (me.l^{-1}), CaCO_3 en mg.l^{-1} , concentración de iones disueltos (STD: mg.l^{-1}) y relación de absorción de sodio (RAS), en freáticos (Fr) y pozos (P) de los partidos de Trenque Lauquen (TL), Pehuajó (Pe), Carlos Casares (CC) y Lincoln (Li) (extraída de Alconada *et al.* 2014)

*rangos frecuentes de agua Dulce, extraído de Custodio y Llamas, 1976

En la Argentina resulta importante destacar que existen estudios sobre el efecto de los cultivos, pasturas o especies arbóreas en el ambiente, tal como sobre la salinización que en algunas publicaciones se describen (Nosetto *et al.*, 2007. Jobbagy y Nosetto, 2015; Bertram y Chiacchiera, 2017). Asimismo, se plantea en un gran número de publicaciones el aprovechamiento de la superficie freática por parte de los cultivos a fin de que esta supla el agua faltante de las precipitaciones (diversos autores en Alconada *et al.*, 2009). Sin embargo, estos estudios en general **no consideran la visión de funcionamiento hidrológico local con lo regional**, donde los sistemas de flujos que coexisten en un área, debido a la continuidad hidráulica re-

gional, son los que permitirían prever mas ajustadamente los efectos de **prácticas de manejo** tales como el *riego*, elección de *cultivos*, *rotaciones*, *desmontes*, *forestaciones con finalidad productiva pura o en silvopastoreo o como práctica de biodrenaje* (Heuperman, 2003; Heuperman et al., 2002), *así como, el origen y consecuencias de las sequías e inundaciones* (Hernández et al., 2003, Alconada et al., 2011a) o la presencia o ausencia de *elementos naturales contaminantes como el As y F* (Alconada et al., 2017). Por ejemplo, podría preverse con mayor certidumbre el efecto de las *plantaciones forestales o los desmontes*, en relación a si podrían coadyuvar o agudizar una situación de exceso o déficit hídrico, favoreciendo o empeorando una salinización edáfica debido a que la zona funciona como recarga o descarga de flujos locales o intermedios, o ambos coexisten y el manejo contribuiría a que tal vez un flujo más salino y alcalino alcance la superficie. Son diversas las posibles combinaciones de análisis, porque son diversos los elementos del paisaje local vinculados al paisaje regional, principalmente en ámbitos como los de la pradera pampeana donde los acuíferos circulan por espesos mantos sedimentarios (González, 2005). Como se indicó precedentemente esto ha sido confirmado en muchos lugares del mundo (Tóth 1962, 1995, 2000; 2008, Engelen y Jones, 1986; Carrillo Rivera, 2000, y diversos autores en Argentina, Australia, Canadá, Hungría, México etc).

3.7 Principales tipos de sales

3.7.1 Solubilidad de las sales y migración

Las sales provienen de los minerales de la corteza terrestre que luego de los *procesos de meteorización* liberan elementos que se *movilizan en función de su solubilidad*. Los elementos *más móviles* son los que determinan la salinización de los suelos.

Si bien la meteorización de rocas ocurre en forma continua, el *más frecuente origen de las sales es a partir de minerales secundarios* (Chávez Benites et al., 2018). Este último punto se analizó en punto 2.2.2. de esta publicación.

Polynov y Kovda clasificaron a los elementos en **5 grupos en función de su movilidad**, los que pertenecen a los grupos de **“bastante lavables”** (Ca, Na, K, Mg, Cu, Co, Zn) y **“muy lavables”** (Cl, Br, I, S, C y B) son los que **salinizan** los suelos (Pizarro, 1978; Lavado, 1988).

El orden de **migración** y capacidad de acumulación de los iones es el siguiente: **Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻² y CO₃⁻²** de iones alcalinos y alcalino-térreos. La **precipitación** ocurre a la inversa, así el **NaCl** es el que permanece más tiempo en solución (Pizarro, 1978).

En consecuencia, la **solubilidad de las sales**, es la característica más importante que interviene en el proceso de salinización/sodificación, las sales **más perjudiciales son las más solubles ya que dan soluciones salinas muy concentradas**, por el contrario las poco solubles precipitarán antes de alcanzar niveles perjudiciales. De allí la definición indi-

cada en punto 3.5.1 sobre suelos salinos (contienen elevada concentración de sales más solubles que el yeso).

3.7.2 Factores que condicionan la solubilidad de las sales

- Temperatura
- Presencia de otros iones (efecto de ión común)
- Contenido de agua

Temperatura. Como se observa en la Figura 3.8 al disminuir la **temperatura** disminuye la solubilidad, este hecho debe ser tenido en cuenta al lavar un suelo, por ejemplo, en épocas frías el lavado tiene menor eficiencia.

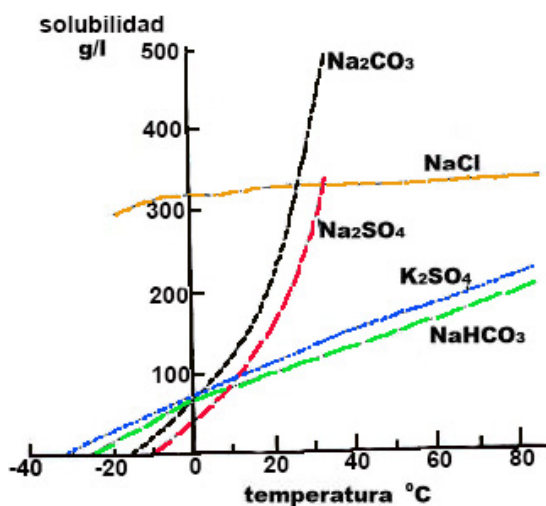


Figura 3.8 Solubilidad de las sales con la temperatura (modificada de Porta et al. 1994)

Presencia de otros iones (efecto de ión común). En la Figura 3.9 se observa cómo se modifica la solubilidad de otras sales ante incrementos en la concentración de **NaCl** y de **Na₂SO₄**. La **solubilidad** de las **sales disminuye** por presencia de **sales con igual ión**. Por el contrario, **puede incrementarse** la solubilidad de la sal menos soluble al aumentar la concentración de sales **con iones diferentes** tal como ocurre con el **yesso**, su solubilidad en ausencia de **Cl/Na** es de 2,04 g/l y se eleva a 7,09 g/l con 350 g/l de **Cl/Na** (Pizarro, 1978).

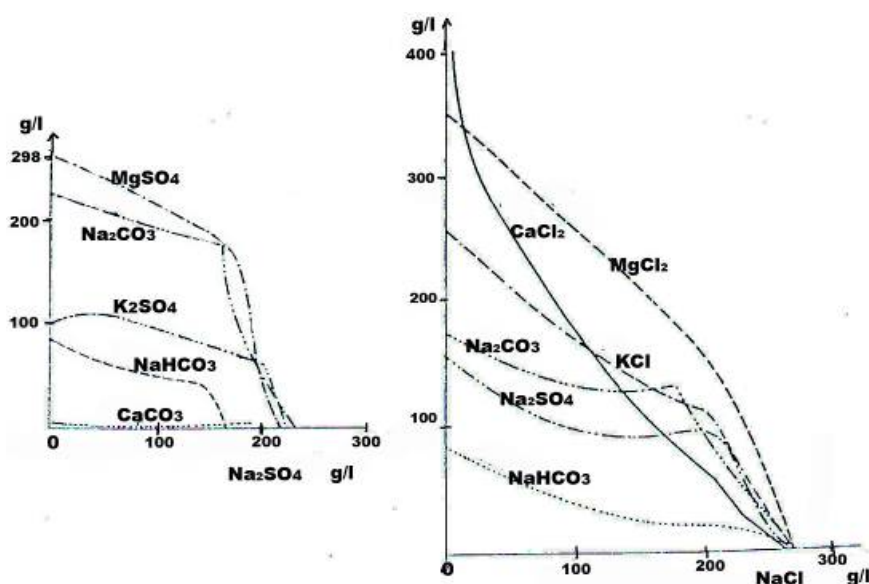


Figura 3.9 Efecto de la presencia de NaCl y Na_2SO_4 sobre la solubilidad de otras sales (extraída de Kovda, 1965)

Contenido de agua. En relación al contenido hídrico, a medida que el suelo *pierde agua* se producen concentraciones de sales y consecuentemente algunas *precipitan* (Figura 3.10). En esta figura se observa que **en todas las alternativas hay Na^+** , pudiendo o no haber Ca^{+2} o Mg^{+2} , consecuentemente el **Na^+ es el catión que caracteriza la salinidad**. Esto es lo que también explica la evolución de las aguas en los flujos de agua subterránea (Figura 3.7) las sales van precipitando a lo largo de su recorrido cuando llega al pK de cada sal, quedando las más solubles, en las zonas de descargas de flujos lejanos, prevalece el **NaCl**. Cabe recordar lo comentado respecto a que actualmente no se considera adecuado distinguir entre suelos salinos y suelos salino-sódicos, debido principalmente a que en ambos prevalece el Na^+ (punto 3.5).

Los **iones y sales más importantes en los suelos afectados por sales**, y que definen su condición salina son:

Iones: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- de metales del grupo IA y IIA de la tabla periódica de elementos, principalmente de **Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} y K^+** .

Sales: las tres sales más importantes son el **NaCl, MgSO_4 y Na_2SO_4** y le siguen en importancia el **Na_2CO_3 y MgCl_2** (Pizarro, 1978). Aunque con menor frecuencia, y en ocasiones sólo en circunstancias particulares, pueden existir otras sales asociadas a estos suelos.

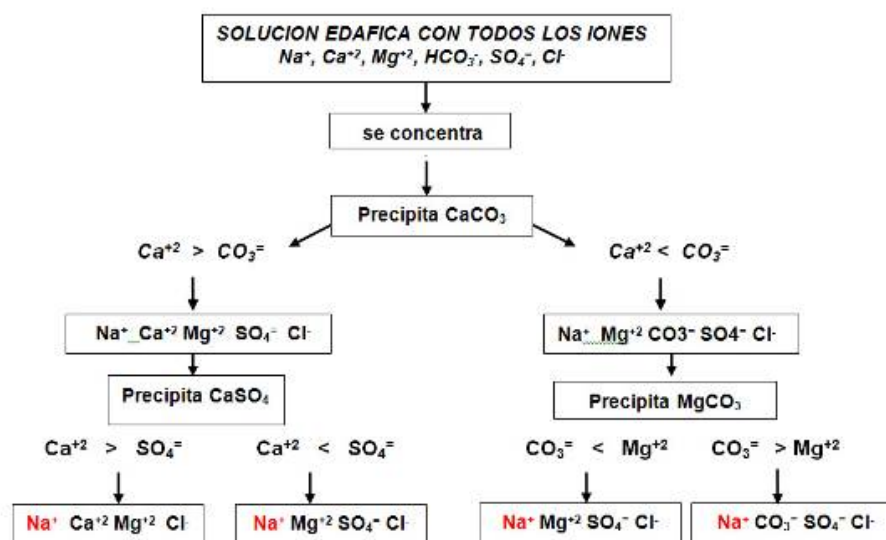


Figura 3.10 Evolución de las sales en el suelo en función del contenido de agua (modificada de Lavado, 1988, material inédito curso posgrado UBA)

3.7.3 Características principales de las sales más frecuentes en suelos

A continuación, se describen las características principales de las sales más frecuentes en los suelos afectados por sales (Pizarro, 1978, Porta *et al.*, 1994):

Cloruros_.

Es el **anión más importante** en suelos salinos. Todos los cloruros de la solución edáfica son solubles y consecuentemente muy móviles. No son retenidos por los coloides a excepción de cierta fijación entre capas de la montmorillonita. Los cationes que acompañan a los cloruros sí pueden ser retenidos y precipitar con otros aniones, modificando así el comportamiento de las sales de cloruro en el suelo.

NaCl, Cloruro de sodio: es la sal **más frecuente** de suelos salinos. Con buen drenaje se elimina fácilmente por lavado, Afecta la solubilidad de otras sales por efecto de ión común.

MgCl₂, Cloruro de magnesio: se presenta en suelos con **extrema salinidad**, es extremadamente **tóxica** y perjudicial para las plantas. Puede estar en solución por reemplazo del **Mg⁺²** intercambiable de arcillas por el **Na⁺** del NaCl. Ejemplo: a partir de **aguas ricas en NaCl**, el Na⁺ reemplaza el Mg⁺² intercambiable y se obtiene MgCl₂ en solución (Na⁺ pasa a integrar el complejo de intercambio). Es una sal muy higroscópica, por esta razón el suelo puede mantenerse húmedo en superficie mucho tiempo luego de las lluvias o al tomar agua atmosférica principalmente por las mañanas. Los suelos hidromórficos tienen con frecuencia mayor contenido de Mg⁺², y como se comentó, actualmente se incluye al Mg⁺² como dispersante (Pla Sentis, 2014).

CaCl₂, Cloruro de calcio: muy poco frecuente, es **ocasional**, principalmente por la mayor estabilidad que presentan otras sales el **Ca⁺²** tiende a formar **SO₄⁻²** y **CO₃⁻²**. Su formación es análoga a la del MgCl₂

Ejemplo: $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{NaCl} + \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (precipita)

(Idem con Na_3CO_3 , precipita CaCO_3) .

KCl, Cloruro de potasio: propiedades análogas al NaCl pero es *muy poco frecuente* en suelos salino debido a que el potasio puede integrar las arcillas (K fijado) y/o puede ser retenido en la biomasa edáfica. Se ha descripto salinización por KCl en invernáculos por abonado excesivo.

Sulfatos_.

Sus **efectos** varían según el catión acompañante, principalmente por su solubilidad.

Na_2SO_4 , Sulfato de sodio: es una sal **frecuente** en suelos salinos. Como característica notable se indica su capacidad de dar especies mineralógicas diferentes según la humedad: **ternadita** (Na_2SO_4 , sin agua) típico de desiertos y períodos de sequía, y la **mirabilita** (Na_2SO_4 , decahidratado) en estación húmeda. Su solubilidad es muy afectada por la temperatura (Figura 3.8), en época cálida asciende y se deposita en superficie, En época de lluvias sólo si coincide con frío (clima mediterráneo) permanecerá en superficie y el resto de las sales serán lavadas.

MgSO_4 , Sulfato de magnesio: es una sal **frecuente, muy soluble**, se destaca por su **alta toxicidad** y ser difícil de lavar. Por hidrólisis puede formar ácido sulfúrico disminuyendo marcadamente el pH (capítulo 2). Aristizabal Arboleda (2009), analiza el efecto del Mg^{+2} en los suelos respecto al Ca^{+2} , destacando efectos dispersivos junto al Na^{+} . En elevadas concentraciones el Mg^{+2} en el complejo de intercambio resulta más difícil de lavar que el Ca^{+2} .

CaSO_4 , Sulfato de calcio: sal común en casi todos los suelos con problemas derivados de las sales. El **yeso** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) puede encontrarse no sólo en zonas áridas sino también en zonas húmedas con problemas salinos. Se pueden encontrar desde cristales hasta capas duras compactadas.

K_2SO_4 , Sulfato de potasio: no es responsable de salinizaciones en condiciones naturales, sólo ocasiona problemas **en invernáculos** por mal manejo de los abonos. En relación a su toxicidad, es el **menos tóxico**. El orden de **< a > toxicidad es:** K_2SO_4 , Na_2SO_4 y MgSO_4 .

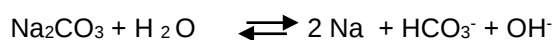
Carbonatos y bicarbonatos_.

Se hidrolizan y dan **pH muy altos**, principalmente los carbonatos.

CaCO_3 , Carbonato de calcio: **común** en casi todos los suelos con problemas con sales (**calcita**). Se presenta desde cristales hasta muñequillas, concreciones, hasta masas compactas (**tosca, horizonte petrocálcico**).

MgCO_3 , Carbonato de magnesio: soluble, puede precipitar como **dolomita** (CaCO_3 y MgCO_3). Sólo se da en **zonas muy áridas** en el material originario, también en la Pampa Deprimida se presenta por reemplazo isomórfico del CaCO_3 (calcita).

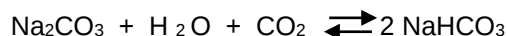
Na_2CO_3 , Carbonato de sodio: sal principal en la **alcalinidad extrema**, posee una mayor distribución areal que el **NaCl y Na_2SO_4** . La hidrólisis de esta sal da origen a **9 a 12 de pH**.



Los efectos desfavorables de esta sal se manifiestan a partir de concentraciones del orden de 0,05 a 0,1 %.

Szabolcs (1988) señala que la hidrólisis alcalina de los coloides saturados con **Na⁺** intercambiable difiere, así como, el grado de alcalinidad resultante. Esto se encuentra influenciado por la concentración de CO₂, CIC, PSI del suelo, composición y concentración de la solución edáfica, etc (se amplía este tema en punto 3.9 de esta publicación).

NaHCO₃, Bicarbonato de sodio: da lugar a condiciones menos alcalinas y por consiguiente menos tóxicas:



En medios naturales **con yeso el Na₂CO₃** tenderá a **desaparecer**:



Nitratos_.

NaNO₃, nitratos sódicos: son **raros** en suelos salinos, se presentan en desiertos de Chile, Perú, India, etc. Son sales **muy solubles y muy tóxicas**. Se pueden presentar en cantidades importantes **en invernáculos** por aplicación excesiva de **fertilizantes**, los cuales conducen a un aumento importante de la **salinidad**. La elevada solubilidad hace que percolen en el perfil y **contaminen las aguas freáticas**. Actualmente, la contaminación con **NO₃⁻** de la napa freática es frecuente en áreas de agricultura intensiva, la disminución de la calidad de las aguas ha conducido a elevar el límite de tolerancia en aguas potables de 45 ppm a 50 ppm de NO₃⁻.

Boratos_.

Este anión **no es importante** desde el punto de vista de la salinidad de los suelos **en forma natural**. Sin embargo, merece ser mencionado por ser otro de los aniones edáficos que afecta el normal desarrollo de los cultivos, y que al igual que los **NO₃⁻** es incorporado como **abono y/o con el agua de riego**, pasando entonces a integrar las sales de la solución edáfica, y consecuentemente a **augmentar la salinidad total**. El **B** es un micronutriente cuyo intervalo de concentración entre carencia y toxicidad es muy reducido. Excesos genera problemas de **toxicidad muy graves** y se haya vinculado en forma natural a climas semiáridos y áridos. Su deficiencia se produce en suelos ácidos y percolantes. El agua de riego es la fuente principal de boratos al suelo en muchas regiones del país. Su presencia **en el agua** se encuentra asociado a la **meteorización de la turmalina**, en zonas volcánicas o aguas residuales de industria o poblaciones. Este tema se desarrolla en capítulo micronutrientes de la parte I de esta publicación (Alconada et. al., 2018a).

3.8 Consecuencias de la salinidad y sodicidad en las plantas

3.8.1 Efectos sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento. Niveles de referencia

El efecto de las **sales sobre el crecimiento de las plantas** puede manifestarse con diferentes sintomatologías: i) Retardo en la *germinación* y hasta inhibición de la misma; ii) Menor *área foliar* y *altura* de la planta, crecimiento más lento e incompleto; iii) Menor *producción* de materia seca; iv) *Necrosis* en las hojas; v) *Muerte* de la planta antes de completar su desarrollo en situaciones extremas (Porta *et al.*, 1994). Taleisnik y Rodríguez (2017) indican que los efectos negativos de la salinidad, alcalinidad y sodicidad sobre los cultivos se debe en esencia al estrés salino que impone en la vegetación limitaciones hídricas y iónicas que pueden a su vez generar desbalances nutricionales y toxicidad. Estos autores indican que los efectos osmóticos de la salinidad se manifiestan principalmente en las primeras etapas del estrés, y luego conviven con los efectos iónicos producto del incremento de la concentración interna de iones potencialmente tóxicos tales como el Cl^- y el Na^+ . El efecto final es una *disminución de los rendimientos y/o en calidad de lo producido*, la magnitud de dichos efectos *depende de la especie vegetal*.

La bibliografía presenta diferentes niveles y tipos de sales que afectan a las especies vegetales, debido a causas naturales o antrópicas (mejoramiento genético, injertos, entre otras técnicas) (Taleisnik y Rodríguez, 2017). Se presentan a continuación algunos valores de referencia de salinidad y alcalinidad en diferentes cultivos. En la Tabla 3.6 se presenta la tolerancia de especies vegetales a la salinidad y pH, elaborada a partir de diversas fuentes (Richards, 1973; FAO, 1976; Pizarro, 1978; FAO, 1979; Porta *et al.* 1994). En Tabla 3.6 (1) es el % de disminución de rendimiento (R) por cada unidad de incremento de CE por sobre el valor máximo en el cual no habría disminución en dicho rendimiento; CEs, es la conductividad eléctrica medida en el extracto de suelo a saturación con conductímetro (dS/m); CEw, conductividad eléctrica del agua; pH en pasta y PSI, porcentaje de sodio intercambiable.

	pH (otra fuente)	CE _s 50% dism.R	CE _s Nivel máx. no afecta R	CE _s 10-25-50% dism. R	CE _s Nivel máx. no afecta R. (1)	CE _s 50% dism.R	CE _w máx. no afecta R	CE _w 10-25-50% dism. R.	PSI tolerancia maxim/ 50% dism. R
referencia		Richard (1954)	Dominguez (1988)/ FAO(1979)	Pizarro (1978)/ FAO(1979)	Porta (1994)	Porta (1994)	FAO, (1976)	FAO, (1976)	
<i>Thinopyron ponticum</i> agropiro			6-12 7.5	11-15-18 9.9-13.3-19.4	7.5 (4.2%)	19.4			> 60
Medicago sativa alfalfa	6 -7.8	4-12	3-6 2.0	3-5-8 3.4-5.4-8.8	2 (7.3)	8.8	1.3	2.2-3.6-5.9	> 40 > 25
Avena sativa grano	5.5 -7 (4 -7.5)	6-10	4-8						
Avena heno	5.2 -7	4-12	3-6						20-40
Hordeum vulgare Cebada grano		10-16	8-12 8	12-16-18 10-13-18	8 (5%)	13	5.3	6.7-8.7-12	40-60 > 25
Cebada heno	5.6-7.9	12-18	6-12 6.0	8-11-13 7.4-9.5-13.0	6 (7%)	13	4.0	4.9-6.3-8.7	> 40
Secale cereale Centeno	5.5-6.5 (4.0-7.7)		5.6	6.9-8.9-12.2			3.7	4.6-5.9-8.1	
Cynodon dactylon			6.9	8.5-10.8-14.7			4.6	5.7-7.2-9.8	
Dactylis glomerata Pasto ovillo			1.5	3.1-5.5-9.6			1.0	2.1-3.7-6.4	
Festuca		4-12	6-12	7-10.5-14					20-40
Festuca arundinacea			6-12 3.9	5.8-8.6-13.3	3.9 (5.3%)	13.3			
Helianthus anua Girasol		6-10	4-8						
Lolium perenne			3-6 5.6	8-10-13 6.9-8.9-12.2					
Zea mays Maíz	5.2- 7 (5- 8)	6-10	4-8 1.7	5-6-7 2.5-3.8-5.9	Dulce 1.7 (12%) Forrajero 1.8 (7.4)	5.9 8.6	1.1	1.7-2.5-3.9	50% dism. R <15
Melilotus albus			3-6						
Melilotus officinalis			3-6						
Phalaris tuberosa			3-6 4.6	8-10-13 5.9-7.9-11.1	4.6	11.1			
Glycine max Soya	6-7 (4.5-7.5)		4-8 5.0	5.5-7-9 5.5-6.2-7.5	5 (20%)	7.5	3.3	3.7-4.2-5.0	
Sorghum sp. Sorgo grano	5.5-7 (5- 8.5)	6-10	4-8 4.0	6-9-12 5.1-7.2-11.0	4.8	11	2.7	3.4-4.8-7.2	
Trifolium sp trébol blanco	6- 7 (5.2- 7.5)	4-12	2-3 1.5	2.3-3.6-5.7					20-40
Triticum aestivum trigo	5.2- 7	4-12	3-6 6	7.4-9.5-13.0	6 (7%)	13	4.0	4.9-6.4-8.7	40-60

Tabla 3.6 Tolerancia de los cultivos a la salinidad y pH (Richards, 1973; FAO, 1976; Pizarro, 1978; FAO, 1979; Porta et al.1994, extraída de Alconada, 2008)

Otro criterio para definir el efecto de las sales sobre el rendimiento es el presentado por Aceves (1979) (en Porta *et al.*, 1994). En la Tabla 3.7 se presenta el rendimiento relativo para diferentes cultivos. En esta tabla, *Intervalo*, es el rango de CEs (conductividad eléctrica del suelo) en el cual pueden ser aplicadas las fórmulas elaborada por especie vegetal. Por ejemplo, si la CEs medida es de 8, el rendimiento relativo del maíz será de $125 - 2,5 * 8 = 25$.

	Rendimiento Relativo	Intervalo
Cebada	40 - 5,0 * CEs	8,0 < CEs < 28
Maíz	125 - 2,5 * CEs	2,0 < CEs < 10
Trigo	142,6 - 7,13 * CEs	6,0 < CEs < 20
Tréboles	115,3 - 11,5 * CEs	1,3 < CEs < 9,8
Alfalfa	114,5 - 7,2 * CEs	2,0 < CEs < 15,7
Soja	200 - 20 * CEs	5,0 < CEs < 10

Tabla 3.7 Cálculo del rendimiento relativo esperado para cultivos
(Aceves, 1979 en Porta *et al.*, 1994)

Para otros cultivos, tal como los que se consideran regionales o cultivos intensivos bajo diferentes sistemas productivos, la bibliografía es muy amplia. Pueden darse algunos ejemplos. Vallone *et al.* (2017) analizan el efecto de la salinidad en viñedos de Mendoza, principalmente el efecto del ión Cl⁻ y el Na⁺ sobre la calidad de vino, así como los límites para cada variedad de vid, en citricultura (Agusti, 2003), en arroz (García, 2014), no obstante, se recomienda consultar en todos casos las experiencias locales donde se considera además de la especie vegetal, las variedades, sistema de cultivo, riego, clima, suelo, etc.

Por último, pueden indicarse algunos valores de referencia en **especies forestales**. En la Tabla 3.8 se resumen las principales exigencias edafoclimáticas de especies seleccionadas para coadyuvar con ambientes con superficie freáticas próximas, salinizadas y alcalinizadas, en sistemas forestales y en silvopastoreo en el noroeste bonaerense (Alconada *et al.*, 2009).

Respecto a los efectos de un **exceso de Na⁺** varían con la **especie vegetal** (Tabla 3.9) (Bohn *et al.*, 1993). Sin embargo, es de destacar que los valores son solo una referencia general, a fin de establecer el orden de tolerancia de los cultivos a la alcalinidad. Como se indicó, los valores de CE-PSI-pH que afectan al suelo se asocian a la mineralogía, tipo de suelo, sales, otras propiedades o condiciones edáficas, tal como el hidromorfismo, etc (punto 3.3.2).

Especie	Clima	Drenaje	Ubicación topográfica	Textura-prof.	pH	CE	IMA	TC
<i>Pinus taeda</i>	plástico, resiste frío, ETP media 0.5 m ³ /día	resistente mal drenaje	bajo a media loma	F >0,75 m	4,5-6,5	no CaCO ₃	18	25
<i>Eucalyptus viminalis</i>	resiste frío, resiste sequías pero < que <i>E.c.</i>	buen drenaje	loma > 0,75 m prof	A	< 8	< 4	18-20	13
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	no resiste fríos, requiere alta humedad	imperfecto drenaje, no encharcables	bajos a media loma-lig.ondulado	Fa - a > 1m	8,3	4	12	30
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	no tolera frío extremo, resiste heladas y sequías	mal drenaje e inundación temporal	bajos	a >0,75 m	> 8,8	> 8	12-15	25
<i>Prosopis flexuosa</i>	asociado a la freática, muy resistente sequía y clima frío	asociada a más humedad que <i>p.chilensis</i>	variable	A	7,6-8,9	salino	13	≥30
<i>Prosopis chilensis</i>	freatófito, con < 300 mm lluvia.	no tolera anegamiento	variable	A o FA	7,6-8,9	salino sódico	13	≥30
<i>Prosopis caldenia</i>	resistente a frío y sequía.	tolerante	bajos, depresiones	A o FA	7,6-8,9		13	≥30

Tabla 3.8 Requerimientos edafo-climáticos especies arbóreas y características productivas
 Textura: F: franco; A: arenoso; FA: franco arenoso; a: arcilloso; Fa: franco arcilloso. Prof.: profundidad de perfil mínimo.
 CE: conductividad eléctrica (dS/m). IMA: Incremento medio anual estimado (m³. ha⁻¹ año⁻¹). TC: Turno de corte en años

Tolerancia al PSI e intervalo de valores de afectación	Cultivo	Respuesta de crecimiento bajo condiciones de campo
Sumamente sensible (PSI 2-10)	Frutales caducifolios, nogales, cítricos, palta,	Síntomas de toxicidad por Na ⁺ , incluso en bajas concentraciones
Sensible (PSI 10-20)	Legumbres	Bajo crecimiento aún con buenas condiciones físicas del suelo
Moderadamente tolerante (PSI 20-40)	Trébol, avena, festuca, arroz	Bajo crecimiento debido a factores nutricionales y adversas del suelo
Tolerante (PSI 40-60)	Trigo, algodón, alfalfa, cebada, tomate, remolacha	Bajo crecimiento por condiciones adversas del suelo
Muy tolerante (PSI > 60)	Agropiro	Crecimiento atrofiado por condiciones adversas del suelo

Tabla 3.9 Tolerancia de los cultivos a la alcalinidad (modificada de Bohn *et al.*, 1993)

3.8.2 Causas por las cuales se afecta el crecimiento, desarrollo y rendimiento

Se indica en la bibliografía que los cultivos presentan disminución de rendimientos y/o de calidad de lo producido por **tres causas principales** (Hayward y Bernstein, 1958; Lavado, 1988; Bohn *et al.*, 1993; Porta *et al.*, 1994): i) Concentración de sales totales, ii) Efecto de iones específicos, y iii) Desequilibrios nutritivos.

i) **Concentración de sales totales** (medido en CE, conductividad eléctrica). Las sales actúan sobre los **efectos osmóticos** de la solución edáfica. Estos, pueden analizarse por *dos acciones principales* que han dado origen a diversas teorías:

- **Teoría de la disponibilidad hídrica o sequía fisiológica**

Las sales aumentan el potencial osmótico de la solución edáfica. En casos extremos, la diferencia de potenciales osmótico entre la planta y el suelo puede posibilitar el paso de agua desde la planta al suelo, con lo cual se produce la **plasmólisis de las células**. Esta sequía fisiológica, así como el grado de **irreversibilidad** del proceso se manifiesta a partir de diferentes valores según la especie vegetal. Sin embargo, esto no explica totalmente el efecto de las sales sobre los cultivos, los mismos pueden disminuir su altura y mantener sus tejidos turgentes.

- **Teoría del ajuste osmótico, teoría de la división y crecimiento celular**

Estas teorías explican que el efecto principal de la salinidad es la de **restar energía a los procesos de crecimiento** con el fin de **mantener el diferencial osmótico**. La planta consume energía para realizar **adaptaciones de sus células. Incrementan el potencial osmótico** interno de las mismas mediante la *producción de ácidos orgánicos o por absorción de sales*, y/o se produce una **disminución del alargamiento** de las células mientras la división celular continúa. Esto último *explica el color oscuro* de algunas especies vegetales en condiciones salinas atribuido a un mayor número de células por unidad de área foliar. Otros autores, establecen que podría también producirse una *alteración de la división celular con engrosamiento de las paredes* que impide su crecimiento aún con un restablecimiento de los potenciales osmóticos. Consecuentemente, la planta no logra recuperar su crecimiento normal.

Taleisnik y Rodríguez (2017) indican que la adaptación principal al estrés salino se basa en el balance hídrico dado por los *solutos* orgánicos e inorgánicos para mantener la capacidad de agua; la *exclusión de iones* potencialmente tóxicos en los sitios de activo metabolismo (a nivel de órgano y subcelular); el *mantenimiento de concentraciones* intracelulares de nutrientes esenciales adecuadas para el normal metabolismo; y en los *mecanismos de detoxificación* del exceso de las especies reactivas del oxígeno que son producto del estrés para evitar el daño celular. Algunos de estos mecanismos estos autores los identifican en ***Cholris gayana***. Indican también principalmente en casos con alcalinidad, que pueden producirse adaptaciones como las que se observan en ***Lotus japonicus***, donde se dan mecanismos de captura del Fe y alteraciones estructurales de las raíces.

ii) **Efectos de iones específicos, la Teoría de la toxicidad específica**_. El efecto de iones específicos ha sido explicado por la *Teoría de la toxicidad específica*. El efecto perjudicial de las sales sobre los cultivos se origina en un incremento de *concentración de un ión determinado que altera la fisiología* de la planta, ya sea por *toxicidad o desequilibrio* en el metabolismo de los nutrientes. Hayward y Bernstein (1958), señalan que mientras un número limitado de especies vegetales presentan toxicidad al Cl^- y al Na^+ ; muchos aunque en grado variable, la presentan al B y al HCO_3^- . Bohn *et al.* (1993) indican que posiblemente la **toxicidad del boro** sea la más común, y resulta más difícil de controlar que la salinidad general. Taleisnik y Rodríguez (2017) destacan también al Cl^- y Na^+ como iones potencialmente tóxicos.

En relación al Na^+ , su acción sobre los cultivos se manifiesta más marcadamente con bajos niveles de salinidad total. Los **cultivos sensibles al Na^+** lo acumulan en sus hojas en niveles tóxicos, este mecanismo que parece ser semejante al de los Cl^- , conduce a necrosis de hojas y termina con la muerte de la planta. Por el contrario, las **plantas resistentes al Na^+ y Cl^-** , impiden el paso de estos iones a sus tejidos por intermedio de membranas radicales. Así por ejemplo, con el uso de portainjertos en vid con tal característica, disminuye su absorción de Cl^- en hasta 30 veces (Bohn *et al.*, 1993). Vallone *et al.* (2017) analizan el efecto del Cl^- sobre variedades de vid en Mendoza, Argentina. Blanc (1984), señala que en **cultivos de invernadero** si bien la salinidad total es el principal factor limitante en el normal desarrollo de los cultivos, esto se relaciona con la sensibilidad a aniones tales como SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- .

Si bien la sensibilidad a un determinado ión varía con la especie vegetal, también depende del **momento del cultivo**. Así, por ejemplo, **la toxicidad de las sales en la germinación** fue establecida por Hanis (1915) (en Porta *et al* 1994). El orden de *mayor a menor sensibilidad* es **NaCl , CaCl_2 , KCl , MgCl_2 , KNO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, Na_2SO_4** .

iii) **Desequilibrios nutricionales**_. Se relaciona principalmente con el **pH** de los suelos afectados por sales (Bohn *et al*, 1993). Estos autores y Hayward y Bernstein (1958) señalan que la **toxicidad** por HCO_3^- debe ser atribuida más que a una acción directa del ión, al desorden nutricional que ocasiona al elevar el pH y generar una **deficiencia de Fe** (clorosis férricas). En relación al Na^+ , su exceso conduce a deficiencias de Ca^{+2} y Mg^{+2} .

Diversos autores han señalado que **la tolerancia de las plantas a la salinidad puede variar con la fertilidad del suelo**, cuando esta es baja, se agudizan las sintomatologías resultantes de la salinidad. Así, aunque los resultados con frecuencia son contradictorios, algunas experiencias muestran que altas fertilizaciones con N y P, **enmascaran excesos de sales**. Sin embargo, los fertilizantes aportan sales y su exceso genera problemas de más difícil resolución tal como las deficiencias inducidas.

Se destaca al respecto lo dicho por Bohn *et al* (1993), en relación a que los *efectos de la salinidad sobre la nutrición de las plantas no son bien conocidos*, siendo en muchas ocasiones meras especulaciones. Esto aún es vigente en el manejo de la salinidad y fertilización en los cinturones hortícolas. La drástica disminución de rendimientos que se produce por pro-

blemas vinculados a la salinización y alcalinización, se intenta revertir mediante el agregado de cantidades crecientes de fertilizantes. Esto conduce a la **hiperfertilización**, y asociado a esto, desequilibrios nutricionales, contaminaciones de suelos, agua, planta, incrementos de costos sin lograr recuperar los niveles de rendimientos que se obtenían previo a la degradación (Alconada *et al.*, 2000).

3.9 Efecto de las sales sobre el suelo

3.9.1 Efecto sobre las propiedades hidrofísicas. Régimen de humedad extrema

Si bien los efectos de la salinidad sobre las plantas es un fenómeno complejo que no se limita a una “*menor disponibilidad hídrica*”, tal como se desprende de lo mencionado en punto anterior, se puede afirmar, que **las sales siempre inciden directa o indirectamente sobre el suministro de agua** para las plantas. Varallay (1981) señala que la baja fertilidad de los suelos afectados por sales está en la mayoría de los casos relacionado con las propiedades físicas e hidrofísicas desfavorables, que en el caso de suelos con sodicidad puede conducir a situaciones de “**régimen de humedad extrema**”.

Varallay (1981) señala que **la salinidad-alcalinidad incide sobre el régimen de humedad** (distribución espacial y temporal, potencial de humedad y movimiento de la humedad como vapor, agua en condición saturada y no saturada). debido a su efecto en:

- **estado mineralógico**: degradación y formación de arcillas, orientación de arcilla.
- **tasa de hidratación** (expansión-contracción-agrietamiento) **y dispersión** de coloides.
- **distribución del tamaño de poros**: arreglo de las partículas primarias, forma, tamaño y estabilidad de los micro y macroagregados.

Consecuentemente, se produce **en** el suelo una **disminución del suministro de agua** para los cultivos pudiendo establecerse **tres factores principales**:

- **Capacidad de almacenaje limitada**: debido a una menor infiltración del agua en el perfil como consecuencia de la formación de *costras sobre superficie (cementaciones de sales de Na⁺ o yeso)*, y *subsuperficialmente* por capas compactadas por acción principalmente del Na⁺ intercambiable o por precipitaciones de sales en la base del perfil.

- **Agrietamiento, fenómenos de expansión-contracción**: una elevada proporción de Na⁺ intercambiable *incrementa los procesos de agrietamiento* típico de suelos con *arcillas expandibles*. La acumulación de sales, y la liberación de **sílice** que se produce *en suelos alcalinos favorece la formación de arcillas expandibles de tipo montmorillonita* (Kovda, 1965; Pla, 1979, punto 2.2.2). En **condición seca**, el agrietamiento conduce a **mayores pérdidas de agua** por percolación y evaporación profunda, y elevación de napas freáticas, que en caso de estar salinizadas acentúan la problemática planteada.

- **Baja disponibilidad de agua edáfica:** debido a un bajo rango de humedad disponible entre capacidad de campo (CC, 0,3 atm) y punto de marchitez permanente (PMP, 15 atm) como resultado de un **incremento en la retención hídrica** al aumentar la succión mátrica debido al **incremento del PSI (Na^+ intercambiable)**, y como resultado del alto potencial osmótico con **alta salinidad** (CE). La alta sodificación disminuye también la transmisión del agua y aire en el interior del perfil, consecuentemente, el agua absorbida por la planta será menor que la evapotranspirada.

Como resultado de un **régimen de humedad extremo** aparecerán problemas de sobresaturación en momentos de **excesos hídricos**, y asociado a esto, pobre aireación, disminución de nutrientes disponibles, procesos biológicos anaeróbicos, incremento del escurrimiento superficial y erosión. Mientras que en condiciones de **baja humedad**, la sequía para los cultivos será extrema ya que la capacidad de almacenamiento será baja produciéndose sequías aún con riego.

Las condiciones imperantes en el medio así como las prácticas de manejo definirán la evolución de un suelo hacia un proceso de salinización y/o sodificación, y consecuentemente, se producirán algunas de las acciones mencionadas precedentemente (Varallay, 1981). La sola presencia de sales de Na^+ en una cierta concentración en solución, no resulta necesariamente en la evolución de un suelo alcalino. Los **niveles críticos** de salinidad y sodicidad que conducen a un proceso de sodificación edáfica dependen del contenido y naturaleza del material arcilloso, de la predominancia de los fenómenos de contracción o expansión, de la concentración total y el tipo de sales imperante en la solución edáfica, del equilibrio entre las fases sólido-líquido, pH del medio, alternancia de sequías-humedad, entre otros factores (Pla, 1993; 2014, punto 3.3.2).

3.9.2 Reversibilidad de los efectos según tipo de arcilla y contenido de limo

Cambios reversibles o irreversibles_.

Los **cambios** que ocurren en suelos afectados por sales de Na^+ pueden ser de naturaleza **reversible o irreversible**. Los **irreversibles** implican una **alteración del material arcilloso** con liberación y migración de formas móviles de SiO_2 , Al^{+3} y Fe^{+2} , y la translocación de arcillas que migran y taponan poros. Los cambios **reversibles** afectan a las arcillas in situ, se expanden y contraen, pero sin que exista una translocación del material.

Efecto de las sales en las arcillas expandibles_.

Porta *et al.* (1994) señala que en presencia de **sales con Ca^{+2}** se produce la unión entre láminas paralelas de arcilla en paquetes denominados tactoides los cuales pueden considerarse cuasicristales. Por el contrario, si prevalecen **sales a base de Na^+** , la sodificación conduce a procesos reversibles “*expansión de partículas coloidales con achicamiento de poros*” o irrever-

sibles “*dispersión de tactoides o coloides con migración y taponamiento de poros*”, con consecuentes cambios en la geometría de poros y de la conductividad hidráulica.

La **montmorillonita** en su origen **cálcica** podrá tener diferente comportamiento según el contenido total de Na^+ que se incorpore al sistema. Inicialmente el Na^+ provoca expansión de arcillas y consecuente estrechamiento de poros, al incrementarse el Na^+ (PSI 15-20 %), el Ca^{+2} de la *superficie externa* será sustituido por Na^+ dando origen a un tactoide disperso; con un 50% de PSI, el Ca^{+2} será sustituido también en el *interior del tactoide* y se producirá el colapso del coloide.

Efecto de las sales en arcillas no expandibles_.

Pla Sentis (2014) indica que la dispersión afecta más los suelos con arcillas no expandibles, ilitas y caolinitas, incluso a valores muy bajos de RAS si los niveles de salinidad total (CE) se mantienen bajos. Estos autores indican que por ejemplo suelos con illita, requieren respecto de las expansivas de un menor contenido de Na^+ para dispersarse, y provocan colmatación de poros por translocación de arcillas sódicas. El proceso es de tipo irreversible.

Consecuentemente, en ambos tipos de arcilla, la sodicidad provoca cambios en las propiedades físicas de los suelos, por **dispersión** de las partículas de arcilla, limo y ulterior **taponamiento de los poros** por dichas partículas en el agua percolante, y por el **bloqueo de los poros** por las arcillas expandibles. El taponamiento de los poros del suelo superficial provoca un sellado que reduce la infiltración y provoca anegamiento que afecta el crecimiento de las plantas. Rengasamy y Olson (1991) en Pla Sentis (2014) indican que el impacto de estos mecanismos (dispersión, taponamiento, bloqueo, anegamiento etc.) esta determinado especialmente por la *textura, la mineralogía de las arcillas, la salinidad total y el pH*.

Relaciones textura-PSI-salinidad-propiedades físicas_.

Pla Sentis (1967; 1968, 1998) indica que las relaciones entre salinidad del suelo (*efectos floculantes*), y sodicidad del suelo (*efectos dispersantes o hinchamiento*), sobre las propiedades físicas del suelo (velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica) dependen principalmente del *tipo de arcilla, reacciones químicas* (solución edáfica-agua) y de la *textura* del suelo (proporción limo/arcilla).

Respecto a las principales **reacciones químicas** que afectan las relaciones salinidad/sodicidad se destacan las que ocurren entre los **bicarbonatos y carbonatos de Ca, Mg y Na**, y los **sulfatos de Ca**, que conducen a disoluciones o precipitaciones, con cambios en los niveles de salinidad y sodicidad. En Figura 3.10 se dieron ejemplos de evolución de las soluciones edáficas en función de su composición y la calidad del agua de riego. En Pizarro (1978) se analiza con gran detalle.

Sin embargo, no solo es importante el tipo de arcilla y la composición de sales con Na^+ , sino también la **relación limo/arcilla** (Pla Sentis, 1993; Hénin et al., 1972). Los problemas físicos derivados del Na^+ son más comunes en suelos con *elevada* proporción de *limo* y *bajo* porcentaje de *arcillas expandibles*. Pla (1988,1993), señala una “**impermeabilización irreversible**” con *elevado % de limo* y *arcilla caolinita*, micas hidratadas, por transloca-

ción de material con colmatación de poros en horizontes subsuperficiales. Estos suelos pueden dispersarse con tan sólo **5 % o menos de PSI**, si es que la salinidad total (CE) es baja. Por el contrario, si prevalecen las **arcillas expansibles**, como se comentó al inicio de este punto, la obstrucción de poros se produce por su expansión en condiciones de humedad elevada en **forma reversible**, requiriendo para ello niveles de **10-15 %** de PSI. Esto generalmente va acompañado de valores **altos de pH** y acumulación de **sales de hidróxis alcalina** (NaHCO_3 y Na_2CO_3). Estos efectos, fenómenos de dispersión de arcillas y expansión debido al Na^+ son menores si **aumenta la salinidad** en la solución edáfica (CE) (Hénin *et.al.* (1972); Iruetia y Peinemann (1986). Este tema se comentó en diversos apartados de esta publicación (Figura 1.1, punto 3.3.2, punto 3.5)

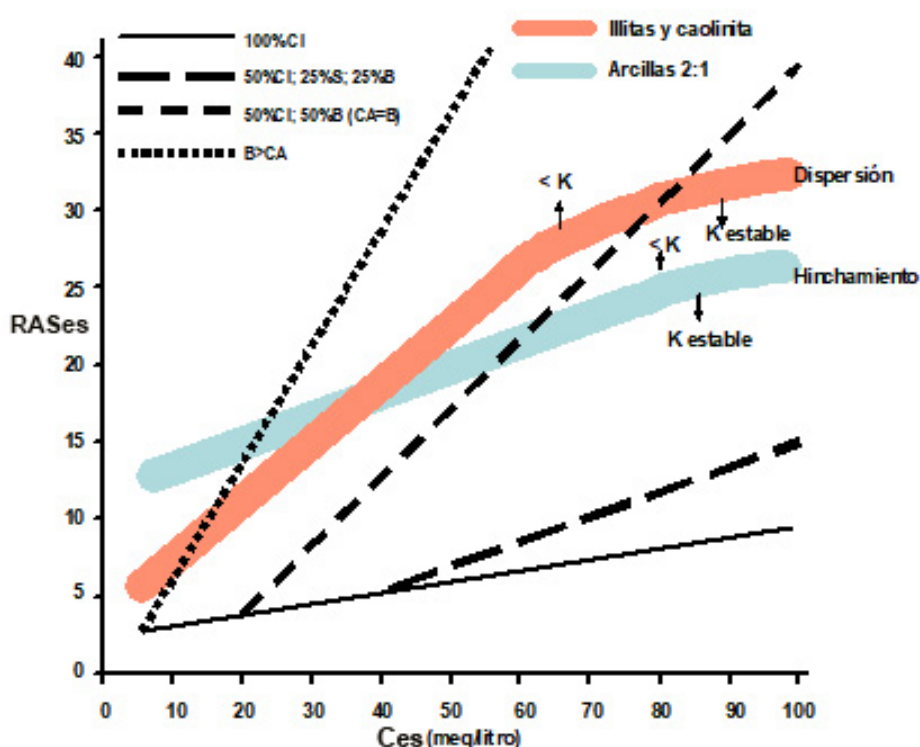
Abu-Sharar *et al.*, (1987) indican que **no existe un criterio** totalmente confiable que permita definir a priori los niveles de salinidad total que mantienen floculados los suelos ante variados niveles de Na^+ . Porta *et al.* (1994) analizan el concepto de *Valor de Floculación o Concentración crítica de coagulación (CCC)*, definido como la “Concentración de sales en el agua que al entrar en equilibrio con el suelo para un valor de PSI dado, provoca una disminución de permeabilidad de 10-15%” o “Concentración mínima de electrolito necesaria para flocular un coloide disperso dado en un determinado tiempo (24 horas)” (Tabla 3.10).

<u>tipo de mineral</u>	<u>CCC (mmol/litro)</u>
-montmorillonita sódica	7 - 20
-montmorillonita cálcica	0,17
-caolinita- sódica	0 - 5 (CINa)
-caolinita -cálcica	estable
-illita-sódica	7
-illita cálcica	0,25

Tabla 3.10 Valor de Floculación o Concentración crítica de coagulación (CCC)
(extraída de Porta *et al.*, 1994).

Pla Sentis desarrolló el Modelo SALSODIMAR (Pla Sentis, 2014, 2017) a fin de establecer el efecto del **agua de riego y freática**, sobre la composición edáfica. En este modelo se analizan las relaciones, **CE, RAS, cationes y aniones del suelo y agua de riego**, en función de las **características del suelo** (permeabilidad, textura) y posibilita arribar a satisfactorias predicciones de los efectos del riego según el agua, suelo, clima y manejo. En la Figura 3.11 se presentan posibles relaciones entre la salinidad, alcalinidad, cationes, aniones y tipo de coloides (extraída de Pla Sentis, 2014). Este autor señala que muchos errores en la evaluación y predicción de problemas de sodicidad y sus efectos se deben a una incorrecta consideración de las reacciones químicas que se producen, bajo diferentes proporciones entre cationes y aniones. Por ejemplo, no considerar la acumulación de **bicarbonato de sodio** en la solución del suelo, proveniente de las aguas de riego o de las

aguas freáticas, o producido por reacciones bajo condiciones anaeróbicas como la contenida en la Figura 3.11. En la Figura 3.12 se presenta un ejemplo de evoluciones de agua según el MODELO SALSODIMAR, que considera las relaciones comentadas entre variables del agua y del suelo. Cabe destacar que las relaciones suelo-agua, principalmente cuando esta es freática, puede modificarse conforme al funcionamiento dinámico de un sitio (Töth, 2000). El agua freática puede variar con eventos locales y regionales, debido a los tipos de flujo y sus zonas que coexisten en un área (punto 3.6.3).



Valores de $RAS_{ES} = (Na^+ / (Ca^{+2} + Mg^{+2}))^{1/2}$ (mmoles/l)^{1/2} a medida que aumenta la concentración de sales en el extracto de saturación del suelo (C_{ES}) partiendo de un agua con 5 meq/l de sales (2,5 meq/l Na^+ ; 1,25 meq/l Ca^{+2} ; 1,25 meq/l Mg^{+2}) con diferentes contenidos y proporciones de aniones (Cl: Cloruros; S: Sulfatos; B: Bicarbonatos) (CA: Ca + Mg), mostrando las relaciones RAS vs Salinidad en las que se produciría un descenso de la conductividad hidráulica saturada (K), por dispersión o hinchamiento, en suelos con predominio de diferentes tipos de arcillas.

Figura 3.11. Relaciones entre salinidad y sodicidad en la solución del suelo, y sus efectos sobre la dispersión o hinchamiento de arcillas y sobre la conductividad hidráulica saturada del suelo, para diferentes composiciones aniónicas del agua original y diferentes tipos de arcillas (extraída de Pla Sentis, 2014)

Condiciones				
AGUA DE RIEGO O AGUA FREÁTICA				
Concentración:	(Alta)	(Media)	(Baja)	
CE	<u>>2dS/m</u>	<u>1-2 dS/m</u>	<u><1dS/m</u>	
Composición	Cl>S>B	S≥Cl>B	B≥S>Cl	B>S>Cl (B<CA)
	<u>Na ≥CA</u>	<u>CA>Na</u>	<u>CA>Na</u>	<u>Na≥CA</u>
DRENAJE	(Variable)	(Muy restringido)	(Restringido)	
Perm Suelo (I)	1-50 mm/hour	< 1mm/hour	< 5mm/hour	
Prof. Nivel Freático#	<u>< 1.5 m</u>	<u>< 0.5 m</u>	<u>< 1.0 m</u>	
CLIMA	(Ar.-SAr.Seco)	(Ar.-SAr.Seco)	(SAr.Seco-SH.)	(Ar.-SAr.H)
IMA (P/ETP)	< 0,5	< 0,5	0,5-1,0	< 0,8
LGP (P>(ETP/2))	<u>< 120 días</u>	<u>< 120 días</u>	<u>120-270 días</u>	<u><180 días</u>
Problema Resultante				
SOLUCIÓN DEL SUELO (ES)	(Muy Salina)	(Mod. Salina)	(Lig. Salina)	(Var. Salinidad)
Concentración (CE)	<u>> 8 dS/m</u>	<u>≥ 4 dS/m</u>	<u>< 4 dS/m</u>	<u>> 2 dS/m</u>
Composición	Cl>>S>>B	Cl≥S>>B	S>Cl>B	S≥B>Cl (*)> B≥S>Cl
	<u>Na>CA</u>	<u>Na≥CA</u>	<u>Na>CA</u>	<u>Na>>CA</u>
pH	< 8,5	< 8,5	> 7,5	> 8,5
SALES PRECIPITADAS	CAC + CaS	CAC + CaS	CAC	CAC
PROBLEMA POTENCIAL		SALINIDAD	SODICIDAD	
(*) Cambio en composición bajo condiciones anaeróbicas (2Na ⁺ +SO ₄ ⁼ +2C+2H ₂ O = S ⁼ +2NaHCO ₃)				
# Profundidad de un nivel freático permanente o presencia de capas de suelo que restringen el drenaje interno.				
Profundidades para suelos de texturas medias a finas. Pueden ser menores para suelos de texturas gruesas.				
(CE: Conductividad Eléctrica; Cl: Cloruros ; S: Sulfatos; B: Bicarbonatos; Na: Sodio; CA: Calcio+Magnesio; CAC: Carbonatos de Ca+Mg; CaS: Sulfato de Ca; SE: Extracto de Saturación; I: Velocidad de Infiltración; P: Lluvia; ETP: Evapo-Transpiración Potencial; Ar.: Clima Árido; SÁr. Seco: Clima Semi-Árido Seco; SH: Clima Sub-Húmedo; Sar.H: Clima Semi-Árido Húmedo)				

Figura 3.12 Combinación de condiciones conducentes al desarrollo de diferentes tipos de suelos salinos y sódicos, aplicando el modelo SALSODIMAR (Pla 1997, extraída de Pla Sentis, 2014).

3.9.3 Proceso de formación natural y antrópico de suelos sódicos

En punto 3.5 se definieron los principales *tipos de suelos afectados por sales*, y se indican sus principales características morfológicas, y químicas. En punto 3.6 los orígenes de las sales, dentro de este se analizaron los *factores que inciden en la formación de los suelos salinos y sódicos (punto 3.6.1), ciclos de salinización (punto 3.6.1),* y la vinculación entre el suelo, y el agua subterránea (punto 3.6.3). En este punto, se amplía y explica con mayor detalle el **proceso de formación de un suelo sódico**, y a partir de esta comprensión, relacionarlo con los aspectos analizados precedentemente, en relación a la necesidad de comprender el funcionamiento del paisaje que define **causa-efecto** de los fenómenos naturales y acciones antrópicas (riego, desmonte, habilitación de ecosistemas frágiles para la producción, forestación, biodrenaje etc).

De lo comentado en puntos anteriores, puede indicarse que en los suelos sódicos, existen diversas relaciones entre *textura, estructura, pH, CE, RAS o PSI, permeabilidad, e infiltración*. Los diversos autores consultados coinciden en indicar que **no existen datos suficientes como**

para dar límites precisos para todas las regiones del mundo. Szabolcs (1988) indican que en algunos lugares del mundo no se manifiestan características morfológicas de Solonetz con valores de **15-20 de PSI** y pueden incluso ser relativamente fértiles, por el contrario, en otras regiones con valores muy inferiores a **15 de PSI** aparecen dichas características, tal como se analizó en punto 3.5 y 3.9.

Influencia de la superficie freática_.

Kovda (1965) señala que los **suelos alcalinos** se encuentran asociados a la presencia de una *superficie freática de relativamente baja salinidad* (entre 0,5 y 5 g/l) pero **siempre alcalina**, a profundidad variable, siendo su **influencia directa** cuando se encuentra entre **1-3 m** y **5 m** de profundidad. Sin embargo, esto se modifica según condiciones locales y regionales conforme explica la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea (Töth, 2000). La fluctuación de la **superficie** freática causa migraciones de las sales. Como se indicó en punto 3.6.3, en base a los sistemas de flujo que coexisten en un área, tipos y zonas (posición local y regional), los flujos pueden ser ascendentes y descendentes, por lo cual pueden haber incluso en un sitio recargas locales y descargas de flujos intermedios o regionales determinando diferente tipo y concentración de sales en el perfil (Figura 3.6 y 3.7). Pla Sentis (2014) plantea el posible balance de sales que podría producirse en un suelo y clima particular, por fluctuaciones de la superficie freática para un momento determinado, tal como se presentó en punto anterior 3.9 en la Figura 3.12. Sin embargo, si las condiciones de calidad y fluctuaciones de la superficie freática se modifican, también lo hace el balance de sales. La fluctuación de la superficie freática puede deberse a causas naturales asociado o no a la acción del hombre (Töth, 2000), o por el riego (Pla Sentis, 2017).

En la Argentina, al igual que en otros países, es principalmente atribuida la presencia de **Na₂CO₃** en los suelos a la influencia de superficies freáticas ricas en Na⁺ pudiendo estar presentes **todos los aniones** en cantidad variable (según tipo de flujos tal como se ejemplificó en la Tabla 3.5). Cabe destacar que si bien los HCO₃⁻, se indican como característicos de zonas de recarga (punto 3.6.3, Figura 3.7), el equilibrio del CO₂-H₂O (actividad biológica, materia orgánica) incide en el balance de sales que se **enriquece en NaHCO₃** (sistemas hídricos someros y/o abiertos, Carrillo Rivera com.pers.).

Influencia del manejo en ausencia de una superficie freática_.

Es posible que se formen **suelos sódicos en ausencia de superficies freáticas** como consecuencia del **riego y manejo**. La ausencia de la superficie freática, esto es, que no incide en forma directa en el suelo, podría darse en zona de recarga con flujo descendente y/o encontrarse profunda. Por ejemplo en la región del Gran La Plata, en condiciones de producción con invernadero, se observa la formación de horizontes E de degradación (proceso eluvial intenso por lavado y dispersión de la base del horizonte A), sobre un horizonte Bt de estructura prismática alcalinizado (suelo en condición natural *Hapludert típico*, Serie Gorina, no salino ni alcalino), debido al riego con agua bicarbonatada sódica (Alconada y Zembo, 2000). En la Figura 3.13 se presenta el suelo en su condición natural respecto a igual suelo degradado en invernáculos (extraída de Alconada *et al.*, 2018b). Cabe destacar

que estas fotos fueron tomadas en forma simultánea en una zanja que se cavó para instalar drenes (foto izquierda dentro del invernáculo y foto derecha fuera del invernáculo en la misma zanja, a pocos centímetros de distancia).



Figura 3.13 Perfil del suelo *Hapludert típico* (Serie Gorina suelo) en invernáculo con detalle de agrietamiento en superficie (izquierda) e igual suelo en su condición natural con detalle de estructura granular (derecha)

Etapas del proceso de formación de un suelo sódico_.

Se indican dos condiciones principales: i) *disminución de la salinidad de un suelo natural o salinizado por el hombre*, y ii) sales que migran alternativamente hacia arriba y hacia abajo, debido a la *alternancia periódica* entre sequías y humedad.

i) Disminución de la salinidad de un suelo salinizado: Los suelos sódicos (**Solonetz**) pueden formarse a partir de un **suelo no afectado** por sales por **incremento** de la concentración de sales o a partir de un suelo salino (**Solonchak**), por una **disminución** de una concentración electrolítica (Figura 3.14). Así, como resultado de una fuerte lixiviación, **suelos salinos** pueden transformarse en **suelos no afectados por sales sin pasar por la faz sódica si durante la lixiviación se excluye la adsorción de Na^+ por los coloides**. Esto es posible en presencia de yeso u otros compuestos de reacción ácida, o en suelos de textura gruesa, debiendo ser el flujo constante y la lixiviación completa. Si se produce una **lixiviación parcial**, con estancamientos de agua se puede originar un **Solod** (Solonetz degradado) (Figura 3.14). Esto es frecuente en suelos de regadío (Szabolcs, 1988). Es posible que lo señalado precedentemente en la zona hortícola del Gran La Plata, con formación de un horizonte E, se vincule a este proceso (Figura 3.13).

Los **suelos sódicos** han pasado por una **etapa previa** donde hubo una acumulación en **exceso de sales solubles**; a medida que la solución del suelo **se concentra** por evapotranspiración, el Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiables son reemplazados por el Na^+ que es el principal catión soluble. En presencia de CO_3^{-2} y HCO_3^- , el Ca^{+2} y Mg^{+2} precipitan cuando alcanzan el límite de solubilidad (aproximadamente **10 meq.l⁻¹**) incrementando aún más la participación del Na^+ (Pizarro, 1978, Pla, 1979) (Figura 3.10, Figura 3.12). El **lavado de sales** y/o aporte de los mencionados **aniones** con el agua de riego favorecen este proceso (Pla, 1979). Pizarro (1978) presenta diferentes ejemplos muy sencillos sobre balances de sales con diferentes calidades de agua. Lo explicado por estos autores, y analizado aquí sintéticamente, permiten entender lo que se comentó en punto 3.3 respecto a que la clasificación de calidad de agua de USDA, manual 60 (Richards, 1973), no tiene vigencia actualmente, sino que por el contrario, se aceptan como más adecuados criterios como los de FAO presentados en Ayres y Westcot (1987) y en forma más precisa el Modelo SALSODIMAR de Pla Sentis (2014) (comentado en punto 3.9).



Figura 3.14 Evolución de suelos afectados por sales (extraída de Szabolcs, 1988)

ii) Migración de sales con alternancia periódica entre sequías y humedad: Otra **pre-condición** es que las soluciones de sales migren alternativamente hacia arriba y hacia abajo. Diversos autores concluyen que la **alternancia periódica entre sequía y humedad** es una condición necesaria que permite la **interacción de las fases líquida-sólida**. La solución alternativamente se **disuelve y concentra**, acumulándose algunos compuestos y a medida que migran continúa esta interacción líquido-sólido y se origina una alteración cada vez mayor. Se producen entonces, **translocaciones y cambios del material**. La migración de **soluciones de Na^+** relativamente diluidas conduce a los procesos de **intercambio** de arcillas y coloides, pero no sólo afecta la superficie de estos, sino también afecta la estructura de los mismos. Así, se produce la presencia de formas móviles de materia orgánica, conocidos genéricamente como “**humatos sódicos**”, que dan el color oscuro a los extractos acuosos de estos suelos, el incre-

mento de la cantidad de **SiO₂ disuelto** y móvil, así como de **aluminatos**, son características constantes en estos suelos.

Como consecuencia de esto, las **soluciones edáficas de estos suelos son particularmente coloidales**, más ricas que en otros suelos, ya que contienen además de los *minerales de arcilla* cristalizados, una considerable cantidad de *minerales amorfos* y *compuestos orgánicos* (Kovda, 1967). Entre las arcillas cristalizadas prevalece la **montmorillonita** lo que da a los suelos alcalinos una *alta adsorción catiónica* (35-40 meq/100), por otra parte, el color HUE oscuro de la montmorillonita, especialmente sus formas ferrosas, intensifica los colores oscuros de los suelos alcalinos. La presencia de *este tipo de arcillas* favorece la formación de suelos con **estructura prismática-columnar**. Sin embargo, la magnitud de estos cambios es variable según condiciones del medio y características de los minerales.

Los cambios de la superficie de los coloides son **procesos reversibles**, la alteración del material con *migración de SiO₂, Fe⁺² y Al⁺³*, es de naturaleza **irreversible**, originando el típico horizonte B de un Solonetz desarrollado. La **calidad y cantidad de las arcillas** determinan principalmente que nivel de PSI es el que conduce a que un suelo sea o no de naturaleza sódica (punto 3.9, Figura 3.11).

Si la concentración de **sales sódicas** del suelo *exceden los límites* necesarios para que en el mismo se desarrolle un **B fuertemente estructurado**, una vez que este se ha formado, este *suelo evolucionará en el muy largo plazo* a un suelo afectado con sales pero **sin horizonte B** estructurado como consecuencia de la alteración del material aún más profunda. A este suelo Szabolcs (1988) lo denominaba suelo salino-sódico, ya que aumenta el nivel de sales en las capas superficiales. Tal como se indicó, esta categoría actualmente se considera suelo salino (Lavado y Taboada, 2017) (punto 3.5). Asimismo, cabe destacar que se reconocen suelos sódicos que no llegan a formarse horizonte B por las características climáticas y del material original, tal como se presentó en punto 3.5.2.1 (Figura 3.1).

A continuación se resumen algunos puntos comentados precedentemente sobre el proceso de formación de suelos sódicos:

- El *principal origen de los suelos salinos y sódicos, es el agua subterránea*, deben conocerse los flujos que circulan y coexisten en un área a fin de definir manejos sustentables.
- Un *suelo salino o no salino puede transformarse en un suelo alcalino* por causas naturales y antrópicas. El lavado de un suelo no puede ser efectuado sin conocer el funcionamiento del sistema, origen de las sales, permeabilidad, entre otras propiedades.
- Dos condiciones principales conducen a un *suelo sódico*: i) una disminución de la salinidad de un suelo natural o antrópicamente salinizado, y ii) sales que migran alternativamente hacia arriba y hacia abajo, debido a la alternancia periódica entre sequía y humedad.
- *En períodos húmedos*, por el elevado contenido de **Na⁺** en las superficies de intercambio, se dispersan y migran por acción del lavado hacia la profundidad: *arcillas, sílice, aluminatos*, junto con formas móviles de la *materia orgánica*.

- Las *soluciones edáficas* de estos suelos son particularmente *coloidales*, *arcilla cristalizados* (prevalece la montmorillonita), una considerable cantidad de *minerales amorfos* y *compuestos orgánicos*, por lo que poseen *HUE altos* y *alta CIC*.

- La *calidad y cantidad de las arcillas* determinan principalmente que *nivel de PSI* es el que conduce a que un suelo sea o no de naturaleza sódica.

- La ocurrencia de ciclos de *humectación-desección* en el suelo, y efecto de expansión-contracción de las arcillas del tipo expandibles saturadas en sodio, provoca un *agrietaamiento* vertical, formándose en una primera etapa un horizonte B con estructura prismática.

- En cada lluvia o ascenso de agua freática, se desplaza una pequeña cantidad del material coloidal que tienden a ser arrastradas y depositadas en las fisuras de los prismas. El continuo drenaje del agua y arcilla redondea las aristas y ángulos de estos prismas (cabezas redondeadas por erosión) dando origen a agregados gruesos denominados **columnas**, que progresivamente pueden revestirse de **humatos de sodio**. Estos se presentan más frecuentemente como manchas negras continuas en superficie.

3.10 Suelos afectados con sales en la Argentina: Ejemplos por procesos naturales y antrópicos

En el punto 3.1 se presentó la importancia de los suelos afectados por sales en el país y en el mundo según diferentes autores en condiciones naturales y por riego (Pla Sentis, 2006; 2014; Imbellone et al., 2010, Prieto et al., 2015; Lavado y Taboada, 2017) . En este punto se amplía con ejemplos de suelos salinos y sódicos en la Argentina, por causas naturales y por el hombre (riego, desmontes, forestaciones).

En el país sobre **suelos sódicos**, Lavado (1988), Imbelloni et al (2010) señalan que son comunes en tres principales regiones: **Pampa Deprimida** (Buenos Aires), **Bajos Submeridionales** (Santa Fe), y en el **Oeste de la provincia de Buenos Aires**. Se podría mencionar una cuarta región que es la **Depresión de Laprida** pero generalmente tiende a agruparse con la Pampa Deprimida. Lavado (1988) destaca que en las **zonas con riego** los procesos de migración y alteración del material se producen en forma acelerada y la evolución a un suelo sódico o salino es frecuente. Moscatelli y Paso (2008) presentan una síntesis de los principales suelos de la Argentina. En punto 3.5.1 se analizaron los suelos salinos y en punto 3.5.2 los suelos sódicos, y sus correspondencias taxonómicas. Como se indicó, a nivel de Orden en el sistema clasificatorio de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) no queda reflejada la presencia de sales en exceso, sino en otros niveles taxonómicos, Suborden, Subgrupo, en cuyo nombre queda en general expresada la condición salina-alcalina, debido a la identificación de un horizonte diagnóstico vinculado a dicha condición. Los horizontes diagnóstico característicos son: **sálico, gypsico, nátrico, y cálcico**. Por ejemplo, suelos sódicos, con horizonte nátrico: **Natracuol, Natrustol** (Molisoles), **Natracualf, Natrustalf, Natrixeralf** (Alfisoles), **Natrargid o Na-**

durargid (Aridisoles) (Soil Survey Staff, 2014). Sin embargo, tal como se comentó no siempre queda en el nombre indicada la condición de salinidad-alcalinidad (punto 3.5).

Pradera pampeana. Imbelloni *et al.* (2010), indican que los suelos halomórficos ocupan alrededor de 160.000 km², que representa cerca del 20% de la superficie total de la región. La provincia de Santa Fe, es la que presenta mayor representación, con 40% de sus suelos afectados por sales, 52.570 Km², sobre una superficie provincial de 133.000 km². Dominan aquí ampliamente los suelos sódicos, no salinos, **Natracuoles y Natracualfes** son los más difundidos, seguidos de **Natralboles y Hapludoles tpto nátricos**. Los restantes suelos sódicos y salinos ocupan escasa superficie. En la provincia de Buenos Aires, si bien, representa una % menor respecto al total provincial, la superficie es mayor (70.520 km² sobre 307.500 km²). Igualmente, dominan ampliamente los **Natracuoles**, le siguen los **Natracualfes** y los **Hapludoles tpto nátrico**.

Lavado (1988) e Imbellone *et al.* (2010), indican que la Pampa Deprimida (95.000 km²) es una de las principales zonas mas afectadas por sales, el 50% de la superficie se halla ocupada por suelos afectados por sales. Mencionan además, al NO y SE de Buenos Aires, N de Santa Fe, parte de La Pampa y Córdoba. A modo de ejemplo puede indicarse; suelos salinos, clasificados como **Salortid** (Aridisol) se reconocen en Buenos Aires (1.100 km²), en Córdoba (1.500 km²), y en La Pampa (3100 km²) (total, 5.700 km²). Se destaca en Entre Ríos, la presencia de **Halacuept** (Inceptisol) como suelo con sales y a los Natracualf (Alfisol) (2.100 km²) (Imbellone *et al.*, 2010).

En la Pampa Deprimida (PD), Lavado (1988) indica que los suelos afectados por sales son característicos de sectores de **relieve cóncavo**, donde hay aporte por **agua de escurrimiento y/o superficie freática**. Esto es frecuentemente indicado en muchas publicaciones. Sin embargo, surgen algunos aspectos a considerar en relación a las aguas de escurrimiento:

i) Las pendientes de la PD son muy bajas, aún con variaciones locales el volumen de agua de escurrimiento resultaría insuficiente para explicar excesos hídricos y tiempo suficiente de permanencia de esta agua (relación precipitación-EVT) como para posibilitar alcalinizaciones asociadas a la meteorización química (punto 2.2.2)

ii) No es previsible que el agua de escurrimiento debida a las precipitaciones tenga tan elevada carga salina. Esto último ha sido explicado en la bibliografía por el arrastre de sales superficiales por el agua que escurre, ante lo cual surge preguntarse el origen de dichas sales en superficie.

iii) Si bien ambientes bajos se asocian a suelos con sales, no necesariamente las geoformas son cóncavas o bajos bien definidos. Es importante aquí considerar la escala local y la regional. En la Pampa Deprimida al igual que otros ámbitos como el noroeste bonaerense, se presentan suelos afectados por sales en lomas planas tendidas (punto 3.6.3).

En base a lo expuesto, es posible afirmar que es el **agua subterránea** la que ha dado origen a estos suelos, no sólo en la **Pampa Deprimida** sino también en la **región pampeana en general**. El loess es el material original que caracteriza a toda la región y muchos otros sitios del país, consecuentemente, si bien hay componentes ricos en Na⁺, tal como la albita, requiere permanencia del agua para que el Na⁺ se libere (punto 2,2.2). El origen de las sales en la magnitud que se presenta

sólo puede ser explicado por una fuente externa y/o una alteración in situ de materiales por elevado hidrohalomorfismo.

Imbellone et al. (2010), Lavado y Taboada (2017) si bien actualmente reconocen como **principal origen al agua subterránea**, no incluyen en sus análisis el concepto de funcionamiento del agua; sistemas de flujo y continuidad hidráulica regional (Töth, 1963, 1995, 2000, Engelen y Jones, 1986, Carrillo Rivera, 2000, entre otros). El diferente enfoque de análisis se aprecia por ejemplo, al abordar el *origen de las inundaciones en la región pampeana* asociado al tipo de suelo afectado por sales (Taboada et al., 2017), y que difiere al menos en parte, de lo observado en Alconada et al. (2011a; 2014, 2016) y Alconada y Damiano (2017), aplicando los criterios de sistemas de flujo y de la continuidad hidráulica regional comentada.

Taboada et al. (2017) indican que la probabilidad de que una inundación se origine por el agua de lluvia o por el agua subterránea, depende de la presencia de un Btn poco permeable que separe el agua superficial de la subterránea. Describen *dos situaciones*, con ascenso freático libre en *ausencia de un Btn*, y otra con ascenso *confinado por el fondo del Btn* poco permeable a impermeable, con formación de una napa colgada en el techo del Btn. Si bien estos autores indican que las sales pueden llegar a la superficie por capilaridad desde el Btn, que es cargado por la superficie freática, señalan también, que es frecuente que no aparezca ninguna manifestación de halomorfismo en el pastizal debido a que se impermeabiliza el Btn y consecuentemente, se inunda con agua no salina de lluvia, siendo el suelo **Natracuol típico**; mientras que a los que llega el agua salina de la freática, el suelo es **Natracuolf típico**, indicando que los primeros presentan en superficie pH <7 y en los segundos pH >8. Si bien el Btn limita el ascenso del agua freática, y se hace evidente en algunos sitios, asociado también al clima local y regional, *surgen de lo señalado por estos autores los siguientes aspectos a considerar en futuros estudios*:

i) El agua subterránea asciende por **capilaridad**, pero también por **presión hidráulica** (potencial hidráulico, punto 3.6.2). En las zonas de descarga, que es donde se ubican los suelos afectados por sales, el flujo de agua subterránea es **ascendente**, la presión hidráulica queda definida por la carga hidráulica en su recarga, longitud de recorrido y material litológico que atraviesa (Freeze y Cherry, 1979; Töth, 2000; Price, 2003; Sánchez San Román, 2012) (Figura 3.6 y 3.7). ii) la **impermeabilidad de un suelo**, no resulta tan claramente previsible, porque aún siendo muy baja la permeabilidad existe un movimiento de flujos suficiente como para que los fenómenos de migración de solutos-agua se produzcan, existiendo además la presión hidráulica comentada. iii) Asimismo en épocas con **lluvias normales**, en general la EVT supera la precipitación, principalmente en épocas cálidas. En tal caso, podrían separarse agregados hasta incluso agrietarse (abundante montmorillonita punto 2.2.2, y 3.5.2; con procesos reversibles, punto 3.9.2) y las aguas subterráneas que responden a las lluvias de otros sitios pueden ascender (coexistencia de zonas y flujos de diferente origen en un mismo sitio, punto 3.6.3). iv) Por último se comenta, los patrones fotográficos característicos de PD han sido definidos como **“moteados u overos”** atribuido a la forma irregular en que se alternan suelos **Natracuolf con Natracuol**, los cuales se reconocen próximos entre si en superficies muy pequeñas. El agua

subterránea es a priori la misma, o las mezclas de flujos o zonas que coexisten, pudiendo además considerarse que algunos Natracuulf no llegan a ser clasificados como Natracuol por que no se cumplen los requisitos de epipedón mólico, por espesor, color, consistencia. La erosión es característica de estos ambientes por la denudación vegetal que se produce. Asimismo, se destaca que en la región se reconocen **Natracuoles típicos** con muy alta alcalinidad desde superficie, ejemplo Serie Guido con 10 de PSI en el horizonte A; Serie Castelli con 15 de PSI, y si bien en ambos, el pH no resulta alcalino o solo ligeramente alcalino (<8) (GeoINTA, 2018), podría asociarse a elevados contenidos de materia orgánica y/o tipos de sales (Tabla 2.12).

En la Pampa Arenosa (noroeste bonaerense), Alconada *et al* (2011, 2014) señalan que las inundaciones y tipos de suelos están vinculados a flujos de agua de tipo local e intermedios con mayor salinidad y alcalinidad (punto 3.6.3). En épocas de grandes crecidas o inundaciones regionales es posible que estos flujos intermedios se mezclen con los flujos locales conduciendo a inundaciones y/o anegamientos con sales. No obstante, en épocas de lluvias normales, los suelos que prevalecen en algunas posiciones presentan alta salinidad y alcalinidad de manera permanente debido a que se asocian a flujos intermedios (Tabla 3.4 y 3.5). A continuación se indican secuencias de suelos, ambientes, flujos y zonas, a nivel regional y local en el noroeste bonaerense:

Secuencia regional: En la Figura 3.15 se presenta una secuencia de suelos en la localidad de Trenque Lauquen entre Mari Lauquen (posiciones más altas, 100-110 msnm y Berutti, 85-88 msnm) donde se indican las zonas y flujos de agua subterránea que se reconocieron en el sitio donde dichos suelos fueron identificados (Alconada, 2008). En la primera parte de esta publicación (Alconada *et al.*, 2018), puede consultarse también esta secuencia de suelos en la Figura 2.5, donde se incluyen los ambientes y unidades geomorfológicas reconocidas para la región (Dillon *et al.*, 1985).

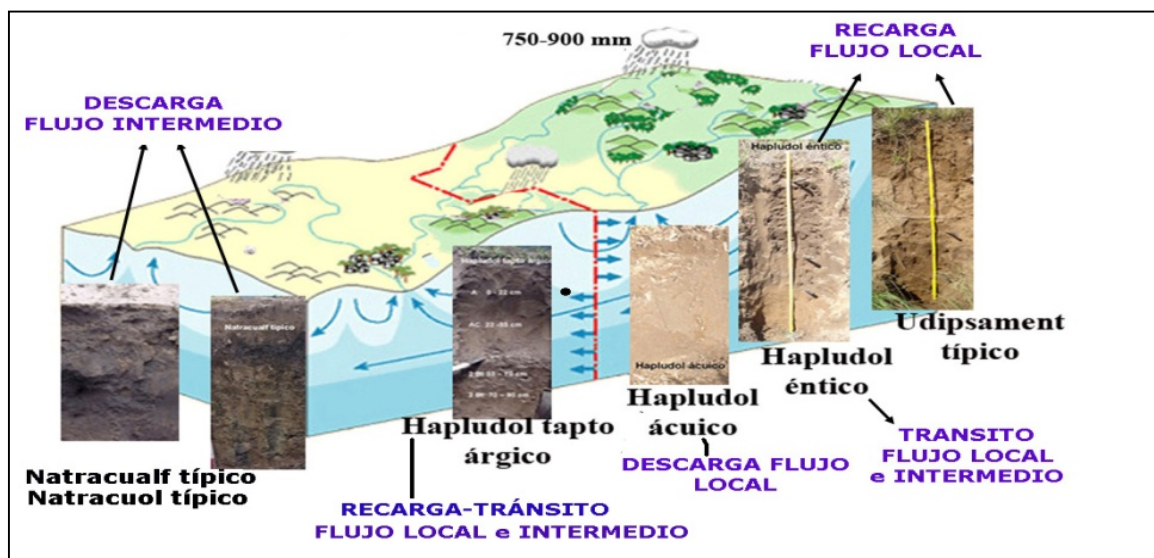


Figura 3.15 Secuencia de suelos en Trenque Lauquen entre Mari Lauquen y Beirutti, zonas y flujos en esquema general de paisaje (extraída de Alconada, 2008)

En la Figura 3.16 se presenta un detalle de la vegetación en los suelos de la Figura 3.15, en Trenque Lauquen, en una depresión intermedanosa con suelo *Natracuall* típico, con vegetación de *Distichlis* sp, *Salicornia* sp., y *humatos de sodio* (Alconada, 2008).



Figura 3.16 Ambiente halomórfico en la Pampa Arenosa, Trenque Lauquen, depresión intermedanosa con suelo *Natracuall* típico, con vegetación de *Distichlis* sp, *Salicornia* sp, y *humatos de sodio* (extraída de Alconada, 2008)

Secuencia local: En la Figura 3.17 se presenta una secuencia de suelos en un establecimiento de Lincoln, los suelos y aguas freáticas medidas se ubican a una distancia máxima de aproximadamente 1500-2000 m (Alconada *et al.*, 2014, 2016). Las características de estos suelos y aguas se presentaron en Tabla 3.4. Los suelos se han desarrollado a partir de dos materiales originales diferentes (discontinuidad litológica), Fm Pampeana (loess) y una más reciente Fm Médano Invasor (Dillon *et al.*, 1985, González, 2005). En punto 1.1 de la primer parte de este libro (Alconada *et al.*, 2018a) en la Figura 1.1 puede apreciarse el efecto sobre la vegetación de la discontinuidad litológica y agua freática incidente en Lincoln.

En base a los estudios comentados en el noroeste bonaerense, se concluye que esta región a nivel regional funciona como zona de descarga de flujos de largo recorrido. Los ámbitos donde la Fm Médano Invasor es más espesa, se alejan de la superficie freática que se presenta en toda la región a poca profundidad (suelos potencialmente afectados por sales). Dentro del noroeste, la localidad de Lincoln no obstante ubicarse en semejantes alturas topográficas que otros partidos vecinos (próximos a 80-100 m snm), la alcalinidad del agua es significativamente mayor (Tabla 3.5), funcionaría como descarga de otras zonas aún más lejanas (Alconada *et al.*, 2014; 2016; Alconada y Damiano, 2017).

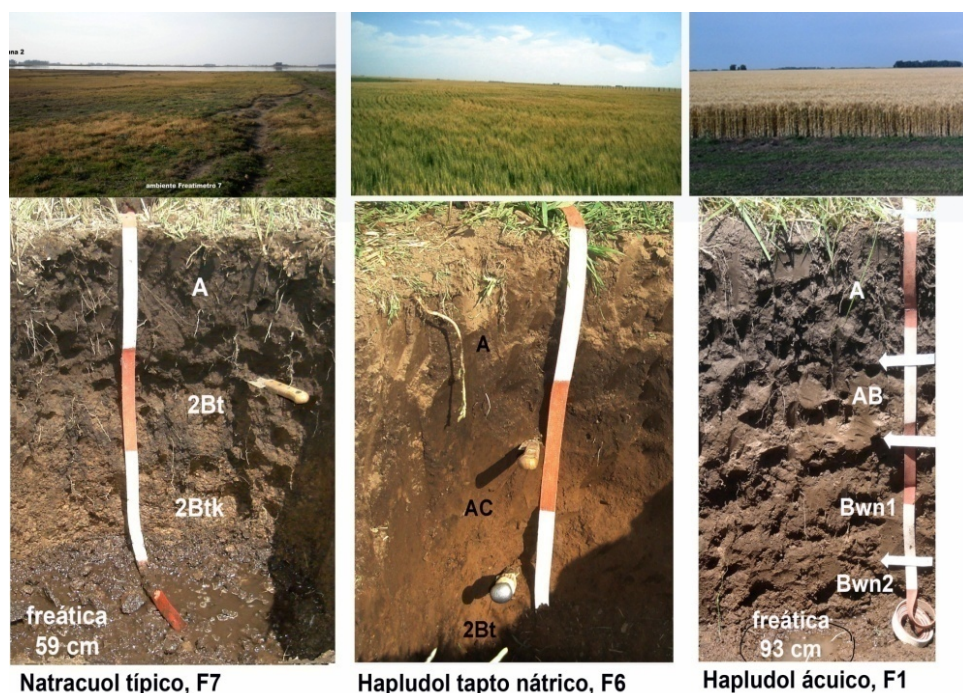


Figura 3.17 Secuencia de suelos y ambientes asociados, en un establecimiento de Lincoln, en tres posiciones: loma plana extendida (F1) y (F6) y en bajo tendido (F7) (Extraída de Alconada *et al.*, 2014)

Sobre las relaciones **suelo salino y sódico y comunidades vegetales** reconocidas en la pradera pampeana la bibliografía es extensa, se destaca principalmente para la Pampa Deprimida y pastizales bonaerenses en general, a Berazategui y Barberis (1982), Veersvood (1967), Batista *et al.* (2005), Burkart *et al.* (2005) y otros autores en Oosterheld *et al.* (2005).

Patagonia_. Son numerosos los ámbitos donde se describen suelos afectados por sales. Se destacan entre estos, por su frecuente incorporación a esquemas productivos con riego, los **ambientes de valles**, con agua superficial y subterránea de diferente origen; y los **mallines**, que son la base de la producción ganadera. Un mallín, es una zona de tierras bajas inundables o humedal, de gran importancia biológica (biodiversidad) y económica, debido a su productividad, con especies vegetales palatables para el ganado vacuno y ovino. En punto 2.6 se presentaron mallines con condiciones ácidas. En este punto se amplía y se enfoca hacia el origen de la salinidad de estos ambientes.

Raffaele (1997) indica diferentes definiciones según diferentes autores y criterios. Los **mallines**, al igual que las turberas, son formaciones netamente diferenciadas de las áreas circundantes por su tipo de suelo altamente orgánico, en cuencas con alto contenido hídrico y flora característica. Marcolín *et al.* 1978 (en Raffaele, 1997) indican que se ubican en el gradiente ambiental que se extiende de Oeste-Este, desde la cordillera de los Andes (2000 mm de precipitación) hasta la estepa (300 mm de precipitación), y se hallan asociados a una gran variedad de comunidades, desde bosques lluviosos de *Nothofagus* hasta estepas en ambientes áridos y semiáridos. En función del **tipo de flujo** de agua subterránea que los origina se presentan **ma-**

llines con agua dulce hasta muy salinos. La característica común es que son **zonas de descarga de agua subterránea** (punto 3.6.3).

Se indican *dos disturbios principales que favorecen los procesos* de salinización-alcalinización en mallines: *fluctuaciones de la superficie freática*, y *sobrepastoreo* (Raffaele, 1997).). Como consecuencia de estos disturbios puede producirse un reemplazo de especies *Juncáceas* por *Distichlis sp.*, disminución de la cobertura vegetal, aumento de la erosión, y aparición de grandes concentraciones de sales en superficie. Las *juncáceas* y *ciperáceas* tienen baja germinación en condiciones salinas, mientras que *Distichlis sp* posea alta germinación. En la Figura 3.18 se presenta un *mallin salino/alcalino* en la provincia de Santa Cruz y en la Figura 3.19 en la provincia de Chubut, se indica la calidad del agua freática que aflora, destacándose la elevada alcalinidad pH 8,59, y moderada salinidad 1,6 dS.m⁻¹, que conduce a una salinización extrema del suelo debido principalmente a la evaporación. Ambos ambientes se encuentran como sitios húmedos rodeados de la estepa patagónica con vegetación xerófila.

Cabe destacar, que el origen de la salinización por sobrepastoreo sólo es posible cuando el agua que subyace u origina al mallín, contiene cierta proporción de sales, la cobertura del suelo impide el ascenso de sales por EVT (efecto mulch), o por cambios en los aportes de flujos de agua subterránea.



Figura 3.18 Mallin salino/alcalino en la provincia de Santa Cruz

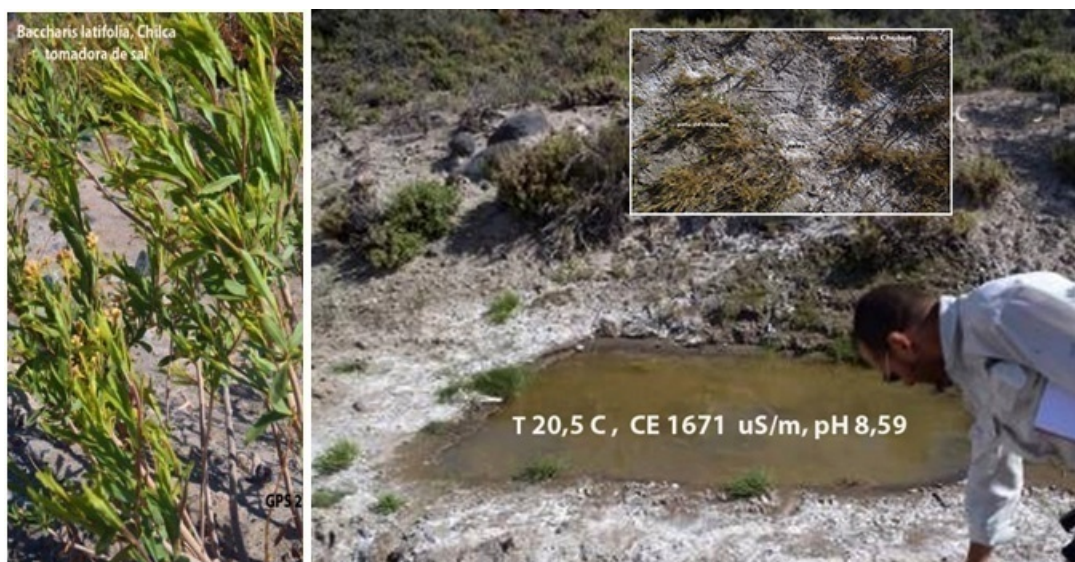


Figura 3.19 Mallin salino/alcalino en la provincia de Chubut (Alconada en CFI, 2013)

En la **Cuenca Alta del río Chubut** pueden indicarse degradaciones asociados al riego, tal como la salinización, alcalinización, anegamiento, con inhabilitación de tierras (Alconada en CFI, 2013). En las Figuras 3.20 se presenta una imagen Google del Río Tecka, con plantación de sauces, y parcelas trabajadas muy degradadas por el riego, manchones de suelo desnudo, salinizado, e hidromorfismo, y en la Figura 3.21 un detalle del efecto del riego en melgas y surcos en un establecimiento de la Costa del Chubut, tal como se aprecia la degradación resultó en la inhabilitación de estas tierras. En la parte I de esta publicación en las Figuras 1.16, 1.17, 1.18, y 1.19 se presentaron iguales degradaciones en otros ríos pertenecientes también a la Cuenca del río Chubut (Alconada *et al.*, 2018a).

En general, esto que aquí se muestra se repite con diferente magnitud en toda la Cuenca (alta, media y baja) del río Chubut y es también frecuente observar en otros valles patagónicos, tal como en el Valle del río Colorado, río Negro, río Chalia, etc. Esto no significa que no sea posible regar en todos los casos, sino que debe efectuarse con un **enfoque hidrológico** de manejo (causa-efecto), que considere al paisaje y su funcionamiento, tal como destaca Pla Sentis (2014, 2017). Tal como se explicó en punto 3.6.3, es factible definir manejos y consecuencias en el ambiente aplicando los criterios de la teoría de sistemas de flujos de Töth (2000), esto adquiere particular importancia en los ambientes aquí discutidos, valles y mallines patagónicos, ambientes muy frágiles con fuertes restricciones principalmente climáticas.



Figura 3.20 Río Tecka, en la Cuenca Alta del río Chubut, con plantación de sauces, y parcelas trabajadas muy degradadas por el riego, manchones de suelo desnudo, salinizado, e hidromorfismo (extraída de Alconada en CFI, 2013)



Costa del Chubut, Cuenca Alta del río Chubut

Figura 3.21 Ambiente degradado por riego en Costa del Chubut, Cuenca Alta del río Chubut (Extraída de Alconada en CFI, 2013)

En la primer parte de esta publicación se presentan otros ejemplos de degradación, en la provincia de Chaco (**Cuenca sedimentaria Chaco-Paranaense**) (Figuras 1.10, 1.14 y 1.15). Las consecuencias del desmonte y el riego conducen a la inhabilitación de tierras cuando son manejados sin considerar las particularidades del sitio. Las superficies freáticas salinas están próximas a la superficie, tanto más cerca, cuanto menor es el espesor de los materiales sedimentarios que se depositan regularmente por desbordes de los ríos (albardones). Se destaca el

patrón irregular de distribución de ambientes con suelos de variada aptitud con los esteros, que son la manifestación directa de la superficie freática que subyace a dichos suelos (IICA-PROSAP, 2013).

Se presenta a modo de síntesis la Figura 3.22 donde se comparan tres ambientes con problemas de salinidad natural (foto izquierda, de Coronel Suárez, con salinidad, alcalinidad, vegetación de pelo de chanco y humatos sódicos, foto de Jorge Giménez), respecto a dos ambientes salinizados por el uso incorrecto del riego. En Chubut, por elevación de la superficie freática y riego en melgas y surcos, y en el ejemplo del riego por goteo (cultivos protegidos del Gran La Plata), es en ausencia de una superficie freática próxima, la salinización es debida al mal manejo del suelo, agua y uso excesivo de abonos orgánicos e inorgánicos (Alconada *et al.*, 2000). Se destaca que esta foto de superficie se corresponde con la degradación subsuperficial mostrada en la Figura 3.13.

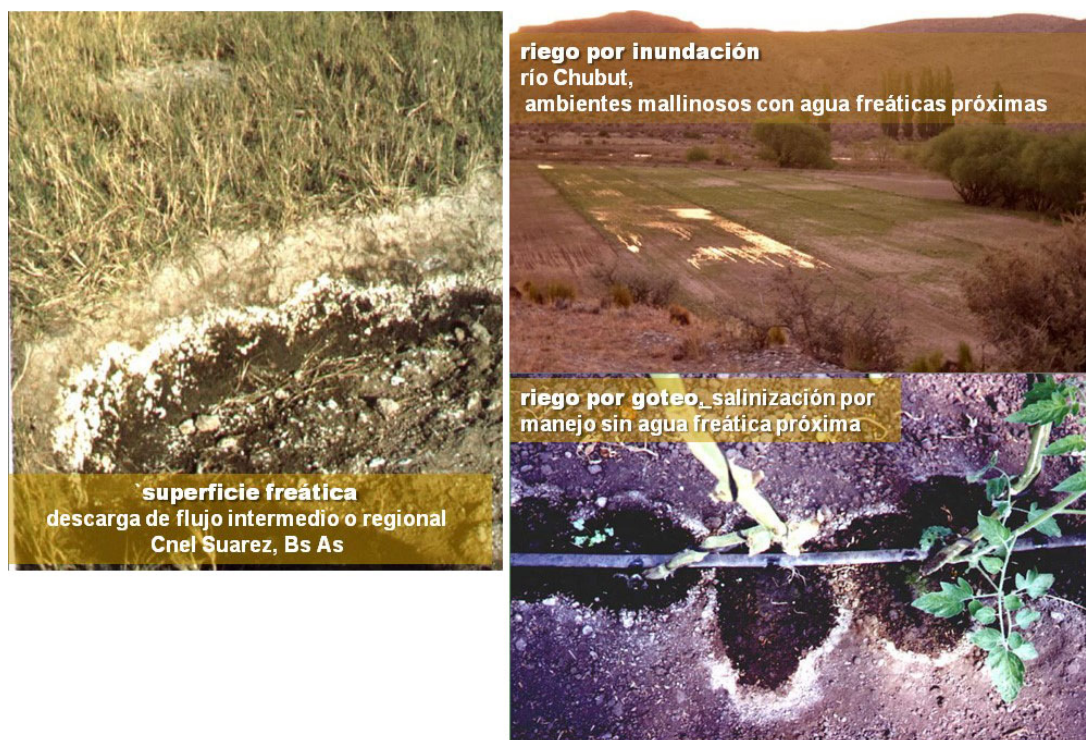


Figura 3.22 Salinizaciones naturales vs antrópicas

3.11 Determinaciones analíticas en suelos afectados por sales

Se ha generalizado la utilización de **dos parámetros** para evaluar la respuesta de las plantas y el comportamiento de los suelos en relación con **la salinidad y sodicidad**.

Salinidad_. Si bien, la evaluación de la **resistencia eléctrica** se usan desde hace mucho tiempo para estimar sales solubles en los suelo, **la conductividad eléctrica** que es la recíproca de la resistencia es más apropiada para mediciones de salinidad, ya que **aumenta con el**

contenido de sales, lo cual simplifica la interpretación de las lecturas. La metodología más difundida y aceptada en el mundo para la evaluación de la salinidad es la determinación de la **Conductividad eléctrica de un extracto de pasta saturada**: “mide la salinidad de una muestra en condiciones de saturación”. Las **unidades** que se usan actualmente son decisiemens por metro (dS.m^{-1}) que es equivalente a la denominación antigua de la conductividad eléctrica de milimhos por centímetro (mmhos.cm^{-1}) ($\text{CE} \cdot 10^{-3}$). Para el agua de riego se utiliza con frecuencia $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$ ($\text{CE} \cdot 10^{-6}$) o mS.m^{-1} ($1 \text{ mS.m}^{-1} = 10 \mu\text{mhos.cm}^{-1}$).

A continuación se indican algunas *transformaciones y equivalencias* vinculadas a iones y sales.

$1 \text{ dS.m}^{-1} = 1 \text{ milimhos.cm}^{-1} = 1000 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $1 \text{ mS.m}^{-1} = 10 \mu\text{mhos.cm}^{-1}$; $1 \mu\text{S.cm}^{-1} = 1 \mu\text{mhos.cm}^{-1}$; $0.1 \text{ mS.m}^{-1} = 1 \mu\text{mhos.cm}^{-1}$. Para convertir $\mu\text{mhos.cm}^{-1}$ a mS.m^{-1} se divide por 10.

- ppm dividido 1000 = $\text{g.kg}^{-1} = \text{g.l}^{-1} = \text{Kg.m}^{-3}$

- CE a meq.l^{-1} $\text{meq.l}^{-1} = 10 \cdot \text{CE} \cdot (10^{-3})$

- CE a ppm $\text{ppm} = 0,64 \cdot \text{CE} \cdot (10^{-6})$

- meq.l^{-1} a ppm..... $\text{ppm} = \text{meq.l}^{-1} \cdot \text{PE}$

- Sales solubles en extractos en meq.l^{-1} a meq^{100} de Ca, Mg, Na o K:

$\text{meq}^{100} = \text{meq.l}^{-1} \cdot \text{Hs} / 1000$; Hs = humedad a saturación, g 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).

Determinación de la salinidad utilizando la Conductividad eléctrica, mediante un **conductímetro** (puente de Wheatstone), refiriendo las lecturas a 25°C .

i) **Pasta saturada del suelo**: Se prepara la pasta, tomando 250 g de suelo, se agrega agua destilada, agitando con una espátula, al saturarse la muestra la pasta brilla por la reflexión de la luz. Se deja reposar varias horas y se verifica la saturación. Se transvasa la pasta a la célula de ebonita para medir **resistencia en pasta**.

ii) **Extracto de saturación**: El procedimiento comprende la preparación de una pasta saturada de suelo, como se indicó precedentemente. La pasta se coloca en unos embudos especiales (Butchner) con papel de filtro y se aplica vacío a un kitasatos por medio de una bomba de vacío. Si el filtrado inicial es turbio (con material en suspensión) se puede descartar o pasar nuevamente por el filtro. En el extracto de suelo obtenido se mide con conductímetro la conductividad eléctrica.

iii) **Relaciones suelo-agua 1:2 a 1:5**: Nijensohn (1988), Mendía (1981) han utilizado la relación suelo-agua 1:5 con buenos resultados. Caro Fernández (1964) presenta algunas relaciones entre las diferentes diluciones. En la Tabla 3.11 se presenta un ejemplo de correspondencia entre CE medida en diferentes relaciones a 25°C (autor anónimo). Jarabejo *et al.* (2018) indican que puede calcularse la CE en el extracto a partir de una relación suelo-agua 1:5 según las texturas. Por ejemplo, para una textura arenosa se multiplica el valor obtenido con la relación 1:5 por 23 para estimar la CE en el extracto, en textura franca por 10, y en textura arcillosa por 6. No obstante, es importante destacar que estas relaciones **deben ser ajustadas en cada sitio**, siendo lo presentado **sólo valores de referencia**.

Respecto a la temperatura de medición, se indica que la CE de las soluciones y extractos de suelos, aumenta aproximadamente el 2% por cada grado centígrado que aumenta la temperatura. Los equipos modernos tienen incorporada la corrección por temperatura a 25°C, no siendo en general necesario ningún cálculo adicional.

Relación 1:2	Relación 1:5	Extracto saturado	Efectos en planta
0- 0,25	0-0,12	0-0,74	Escasos nutrientes
0,25-0,75	0,12-0,35	0,75-1,49	Deseables plantas sensibles
0,75-1,25	0,35-0,60	1,5-2,99	Optimo mayoría cultivos
1,25-1,75	0,60-0,85	3,0-4,5	Reducción del crecimiento
1,75-2,25	0,85-1,0	4,5-5,5	Síntomas toxicidad
>2,25	>1,0	>5,5	Tóxico para la mayoría de las plantas

Tabla 3.11 Correspondencia de la CE dS.m⁻¹ en diferentes relaciones suelo:agua (T 25°C)

Determinación de la salinidad conociendo la resistencia eléctrica de la pasta o la conductividad del extracto. La resistencia de la pasta de suelo (R), es inversa a la CE. En las descripciones de perfiles edáficos, suele indicarse la resistencia. Se toma en forma tentativa un valor de R de 200-300 Ohms como valor de referencia a partir del cual se encuentra libre de sales. Si es mayor, en general no se hace el extracto de suelo para medir CE ya que se estima resulta baja la salinidad. En algunas fuentes, se indica como valor de referencia para considerar que el suelo esta libre de sales cuando la resistencia es mayor a 170 Ohm. Sin embargo, en general los suelos totalmente libres de sales tienen resistencias próximas a 1000 Ohms. Resulta frecuente en muchos laboratorios considerar un valor de 600 Ohm, se prepara el extracto y con frecuencia se miden además, los cationes solubles en me.l⁻¹. Cabe destacar, que en las descripciones de perfiles edáficos cuando no se indica el valor de CE es porque la resistencia es elevada. Si no se consignase ninguno de los dos valores, es porque el evaluador desestimó la presencia de sales.

Determinación de la salinidad por sales totales. Este criterio es considerado en la taxonomía de suelos para definir por ejemplo horizontes diagnósticos sálcos (Soil Survey Staff, 2014). En términos generales se indican las siguientes escalas Tabla 3.12.

sales totales g.l ⁻¹	
0 – 2,0	libre de salinidad
2,0– 3,5	ligeramente afectado
3,5 – 6,5	medianamente afectado
> 6,5	fuertemente afectado

Tabla 3.12 Valores de referencia de sales totales g.l⁻¹

Sodicidad_. Se mide la sodificación a partir del **PSI** (porcentaje del sodio intercambiable) o a partir de la **RAS** (relación de adsorción sodio). Actualmente se incorpora el **CROSS** que considera también el posible efecto dispersivo del Mg^{+2} y el K^+ (Pla Sentis, 2017). Este autor indica que los suelos sódicos presentan altos niveles de Na^+ (acompañado de Mg^{+2} en algunos casos) en el complejo de intercambio del suelo. Aristizabal Arboleda (2009), analiza el efecto del Mg^{+2} como dispersante, destacando que incrementa los efectos dispersivos del Na^+ , cuando el Mg^{+2} se encuentra en elevadas proporciones del complejo de intercambio ($> 35\%$) (ver punto 3.3.2).

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se calcula de la siguiente manera ($me.100^{-1}$ o $cmol.kg^{-1}$).

$$PSI = \frac{Na \text{ me.}100^{-1} \text{ g}}{CIC \text{ me.}100^{-1} \text{ g}} .100$$

Gapon (citado por Richards, 1973) y otros autores, han sugerido que si se toma en cuenta la influencia de la concentración catiónica total, se obtiene una *relación lineal entre cationes intercambiables y solubles monovalentes y divalentes*, cuando la concentración molar del catión soluble monovalente se divide por la raíz cuadrada de la concentración molar de cationes divalentes solubles. Así, para discutir la relación de equilibrio que hay entre los cationes solubles y los intercambiables se usa la **relación de adsorción del sodio (RAS)**:

Relación de Adsorción Sodio (RAS) mide la relación de los **cationes solubles**, que se suponen **en equilibrio con el PSI**. Diversos trabajos muestran las ventajas de la RAS a fin de establecer el problema de sodicidad de los suelos debido a la estrecha relación que ambas determinaciones presentan. Por esta razón, es una **medición que con frecuencia se utiliza en reemplazo del PSI**, ya que la obtención de este último valor resulta costoso y laborioso. Por otra parte, el dato de **PSI** es considerado **poco confiable** en suelos que contienen minerales silicatados ricos en Na^{+1} soluble o grandes cantidades de $NaCl$. En tales circunstancias el PSI podría brindar datos erráticos y la RAS. resulta más conveniente. Pla Sentis (2017) indica que **es preferible y recomendable utilizar la RAS para fines prácticos**, dado que el PSI es muy difícil de determinar correctamente en la mayoría de los suelos sódicos y es mucho más costoso. Bajo muy diferentes condiciones la **RAS resulta más confiable como índice de sodicidad que el PSI**.

$$RAS = Na / ((Ca + Mg)/2)^{1/2} \text{ (me.litro}^{-1})^{1/2}$$

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}}$$

Según se indica en Manual 60 (USDA, Richards, 1973) un valor de **13 de RAS se corresponde con un valor de 15 del PSI**. Consecuentemente, en base a este autor, puede estimarse

el valor de PSI a partir de los valores de RAS. No obstante, como se indicó, si bien se relacionan puede haber diferencias con el tipo de suelo. Con fines de **investigación se recomienda utilizar un RAS teórico** que resulta de la corrección de la RAS descripta (denominado **práctico**) por los efectos que originan los **pares iónicos** (Porta *et al.*, 1994). Para uso frecuente sigue siendo de utilidad la RAS obtenida como aquí se indica.

Catión Ratio of Structural Stability (CROSS). En este criterio **se** considera que deben separarse los efectos de los cationes Na^+ , Mg^{+2} y K^+ , del Ca^{+2} (autores citados en Pla Sentis, 2017). Puede calcularse:

$$\text{CROSS} = \text{Na} + 0,56 \cdot \text{K} / [(\text{Ca} + 0,6\text{Mg})^2]^{1/2} \text{ meq/l}^{1/2}$$

Procedimiento para efectuar las **mediciones de Sodicidad**_. i) *Preparación del extracto de saturación*, idem CE. li) *En dicho extracto se mide Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^+ soluble*. Una de las técnicas más frecuentemente usadas para **medir Ca^{+2} y Mg^{+2}** es por titulación con etilén-diamino-tetraacetato (EDTA 0,01 M) (Método 7 del Versenato, en Manual 60, Richards, 1973) y la modificación de esta última EDTA 0,02 M (SAMPLA, 2018). Las ventajas de una u otra metodología son diversas y existen diferentes criterios para su elección (costo, precisión, disponibilidad). **La determinación de sodio** puede efectuarse por fotometría de llama. Para todos los cationes, existen procedimientos más modernos y de mayor precisión, tal como los análisis espectrofotométricos, que se basan en la medida de la intensidad absorbida o emitida de una radiación conocida (absorción y emisión atómicas). Puede utilizarse: espectrometría de absorción atómica (AA), espectrometría de emisión atómica (**EA**), o por espectrofotometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (**ICP**). Puede consultarse en <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8252/4/T7Abasorc.pdf>; SAMPLA (2018), y en las Normas IRAM (Kloster, 2017) para análisis de suelos y aguas.

Muestreos de suelos_. La concentración de sales en los suelos puede variar notablemente en el **espacio** (horizontal y vertical) y en el **tiempo**, y fundamentalmente con la **humedad edáfica**. Se recomienda que dicha humedad sea también medida. **No existe un sólo procedimiento** de muestreo para su evaluación, los detalles dependen del **propósito** de estudio. Si se trata de una evaluación general de salinidad y/o de acumulación Na^+ de un área determinada, el contenido medio de sales de cierto número de muestras proporciona un buen índice de salinidad, la heterogeneidad del sitio determina la intensidad de muestreo y debe respetar los criterios de cualquier otro muestreo de suelos. Los principios básicos para muestrear son: i) **variabilidad** (distribución en el ambiente), ii) **homogeneidad** (cada muestra extraída de igual condición), iii) **representatividad** (a fin de extrapolar), iv) **selectividad** (según la variable). En base a lo comentado en relación al origen de las sales, se recomienda efectuar mediciones de **cationes y aniones solubles**, los cuales permiten inferir la calidad del agua incidente (Alconada *et al.*, 2016)

Se sugiere muestrear como a continuación se indica: i) Si el suelo muestra evidencias de desarrollo del perfil o estratificación, tomar las muestras por **horizonte o por capa**, has-

ta la profundidad en que se estima tiene influencia la superficie freática o hasta la profundidad de alguna impedancia mecánica importante tal como roca. ii) En función de la **zona de desarrollo radicular, la naturaleza del problema y el detalle requerido**. iii) Si no existen horizontes o capas bien definidas, pueden tomarse muestras a intervalos de 0-15, o cualquier otro intervalo que se juzgue conveniente hasta las profundidades comentadas en i). iv) Las muestras de suelos destinadas al análisis de salinidad o alcalinidad, pueden mezclarse para formar **muestras compuestas**, si es que se considera **homogéneo** el sector a muestrear, cuanta mayor sea la intensidad mayor será la precisión. En todos los casos medir la humedad edáfica actual del suelo a analizar.

Bibliografía

- Abu-Sharar, T. M., Bingham F. T. and Rhoades J. D. (1987). Stability of Soil Aggregates as Affected by Electrolyte Concentration and Composition. *Soil Science Society of America Journal*, 51 (2) 309-314. Recuperado de: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/51/2/SS0510020309>.
- Agusti, M. (2003). *Citricultura*. España; Editorial Mundi Prens, 422p.
- Ayers, R.S. and Westcot D.W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO. Irrigation and Drainage. U.S.A. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/t0234e00.HTM>.
- Alconada M. (2008). Procesos de inundación en el sector de médanos longitudinales al noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina su relación con la vegetación, suelo, agua y clima. Opciones de desarrollo. (Tesis Doctoral del Posgrado en Geografía de la UNAM Universidad Nacional Autónoma de México). 528 p y anexos. Recuperado de: Biblioteca UNAM.
- Alconada M. y Zembo J. (2000). Influencia cualitativa del riego con aguas subterráneas en suelos con producciones intensivas a campo y en invernáculo. *Actas 1er Joint World Congress on Groundwater*. Brasil.
- Alconada, M., Giuffrè L., Huergo L., y Pascale C. (2000). Hiperfertilización con fósforo de suelos Vertisoles y Molisoles en cultivo de tomate protegido *Avances en Ingeniería Agrícola*: 343–347. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, UBA.
- Alconada Magliano, M.M., Bussoni A., Rosa R. y Carrillo Rivera J.J. (2009). El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires. Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 68: 50-72. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56912236005>.
- Alconada Magliano, M.M., Fagundo-Castillo, J.R., Carrillo-Rivera, J.J. y Hernández, P.G. (2011a). Origin of flooding water through hydrogeochemical identification, the Buenos Aires plain, Argentina, *Environmental Earth Sciences*, 64 (1), 57-71.
- Alconada Magliano, M.M., Cuellas M., Poncetta P., Barragán S., Inda E, y Mitidieri A. (mayo-agosto, 2011b). El cultivo de tomate protegido: 1- Nutrición nitrogenada. Efectos en el suelo y la producción. *Revista Horticultura Argentina, Asociación Argentina de Horticultura*, 30: (72), 5-13. Recuperado de: <http://www.horticulturaar.com.ar/publicaciones-15.htm>
- Alconada Magliano, M.M., Damiano F. y Fagundo-Castillo J.R. (2014). El suelo en el funcionamiento hidrológico y manejo agropecuario-forestal. *Actas XX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Cuzco. Perú.
- Alconada Magliano, M. M., Damiano, F. y Fagundo Castillo, J. R. (2016). Estudio del suelo en el paisaje regional como base para definir su manejo agropecuario-forestal. *Actas XXV Congreso Argentino Ciencias del Suelo*. Río Cuarto. Córdoba.
- Alconada Magliano, M.M. y Damiano F. (2017). Caracterización de suelos y del agua subterránea para definir intervenciones sustentables. Simposio Pedogénesis y cartografía de suelos como herramientas para la planificación (1-7p). *XX Congreso Geológico Argentino*.

- Alconada Magliano, M.M., Damiano, F., Carrillo-Rivera, J.J. y Fagundo-Castillo, J.R. (2017). Arsenic & fluoride in water in Northwestern Buenos Aires: their association with natural landscape elements. *Journal of Geography and Regional Planning*, 10 (2), 8-27.
- Alconada Magliano, M.M., Lanfranco J.W. y Pellegrini A.E. (2018a). El suelo en el paisaje. Parte 1 Condiciones de dotación. La Plata: Edulp. Recuperado de:
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1> AGREGAR la a
- Alconada Magliano M.M., Garbi M. y Martínez S.B. (2018b). *Producción intensiva flori-hortícola sustentable en el Gran La Plata*. Publicación del Proyecto de Extensión, F CsAg y Fs, UNLP.2017.
- Aristizabal Arboleda, A. J. (2009). *Efecto de altas saturaciones de Mg^{+2} y Ca^{+2} en las propiedades físicas de un suelo del Valle del Cauca* (Tesis Maestría Cs Agrarias, Universidad de Colombia). Recuperado de:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1794/1/7005002.2009.pdf>
- Batista, W.B., Taboada M.A., Lavado R.S., Perelman S.B. y León R.J.C. (2005). Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. en: Oesterheld, M., Aguiar M., Ghera C. y Paruelo J.M. (eds.). *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas* (pp. 113-129). Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- Berasategui, L.A. y Barberis L.A. (1982). Los suelos de las comunidades vegetales de la región Castelli-Pila, Depresión del Salado (Prov Bs. As.). *Revista de la Facultad de Agronomía*, (3),13-25.
- Bertram, N. y Chiacchiera S. (2017). Efecto de la salinidad edáfica sobre forrajeras perennes. Los efectos de la salinidad en viñedos del oasis norte de Mendoza. En Taleisnik, E. y Lavado R.S, (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 541-551). Editorial Orientación Gráfica.
- Bohn, H.L., Mc Neal B.L. y O'Connor G.A. (1993). *Química del suelo*. México: Ed. Limusa. 370 p.
- Burkart S.E., Garbulsky M.F., Ghera C.M., Guerschman J. P., León R.J.C., Oesterheld M., Paruelo J.M. y Perelman S.B. (2005). Las comunidades potenciales del pastizal pampeano bonaerense. En Oesterheld, M., Aguiar M., Ghera C. y Paruelo J.M. (eds.). *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas* (pp. 379-399). Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- Carrillo Rivera, J.J. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins. *Hydrogeology Journal*, 8(5), 503-520.
- Caro Fernández, M. (1965). *Suelos salinos y procesos de salinización en el sureste español*. Universidad de Murcia, España, 65p. Recuperado de:
<http://digitum.um.es/xmlui/bitstream/10201/4867/1/Suelos%20salinos%20y%20procesos%20de%20salinización%20en%20el%20Sureste%20español.pdf>
- Chavez Benites, J., Dioses Morales J. y Nakaya Barzola D. (octubre, 2018) Reacciones de precipitación y disolución en aguas naturales .Recuperado de:
<https://vdocuments.mx/reacciones-de-precipitacion-y-disolucion-en-aguas-naturales-final.html>

- CFI (2013). Alconada Magliano, M.M. Edafología. En *Plan Director de Recursos Hídricos del río Chubut*. Consejo Federal de Inversiones. 280p. Tiradas Reducidas en biblioteca CFI, CABA.
- Custodio E. y Llamas M.R. (1976). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Dillon, A.A., Hurtado M., Giménez J. y Castillo R.J. (1985). Consideraciones Geomorfológicas y Estratigráficas como Base del Carteo de Suelos de un Sector de la Pampa Arenosa (Pcia. Buenos Aires). *Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerense, Tandil*, 737-749.
- Fagundo R.J., Carrillo Rivera J.J., Antigüedad I., González P., Peláez R., Melián C., Suárez M.; Hernández R. y Cáceres D. (2005). Caracterización hidrogeoquímica del sistema de flujo. Local-regional de la sierra del Rosario (Cuba). *Rev Latinoamericana de Hidrogeología*, 5: 75-90.
- Fagundo Castillo, J.R., González P. Alvarez Varela E., Tillán Ochoa G, Vinardell Grandal E., Fagudo Sierra J, Suárez Muñoz M., Melián Rodríguez C. (2005). Solución de problemas ambientales mediante la Modelación Hidrogeoquímica *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36, N° especial. Recuperado de:
<http://www.fagundojr.com/documentos/Articulo%20ALHSUD.pdf>
- FAO. (2016). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i3794es/i3794es.pdf>. 218p.
- FAO- UNESCO (octubre 2018). Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO. Recuperado de: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faounesco/es/>
- Freeze, A. y Cherry J. (1979). *Agua Subterránea*. Recuperado de:
<http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-espanol/capitulo-7/ y ...capitulo-6/>
- García A. (2014). *Problemática de la salinidad en el cultivo de arroz*. IPNI. Recuperado de: [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/0/8BDECBA3B42BF11105257C27004F16D4/\\$FILE/3.%20Salinidad%20Alvaro%20Garc%C3%ADa.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/0/8BDECBA3B42BF11105257C27004F16D4/$FILE/3.%20Salinidad%20Alvaro%20Garc%C3%ADa.pdf). 92p.
- González, N.(2005). Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Buenos Aires. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Cap XXII: 359-374.
- Hayward, H.E.y Bernstein L. (1958). Plant-growth relationships on salt-affected soils. *Bot. Rev*, 24, 584-635. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02872595#page-1>
- Heuperman, A. (2003). *Bio-drainage; a situation analysis*. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture (ISIA) at Tatura, Australia, for the International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID). Recuperado de:
www.wca-infonet.org/cds_upload/1058154421850_BIO_DRAINAGE.pdf.
- Heuperman, A.F., Kapoor A.S. and Denecke H.W. (2002). *Biodrainage. Principles, experiences and applications*. International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO. Knowledge Synthesis Report N°6. Recuperado de: <http://www.iptrid.org>.

- Hernández, M., González N., Cabral M., Giménez J. y Hurtado M. (2003). Importancia de la caracterización física del riesgo hídrico en la llanura húmeda. En Maiola, M., Gabello-ne N. y Hernandez M. (Ed), *Inundaciones en la región pampeana* (pp.159-173). Argentina: Ed. UNLP.
- Hénin, S., Grass R. y Monnier G. (1972). *El perfil cultural*. España: Ed. Mundi Prensa.342p.
- Ibáñez J. J. y Manríquez Cosio F.J. (2013) .Gypsisoles o Gipsisoles (WRB): Suelos con yeso Edafogenético. Recuperado de:
<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/11/07/144670>)
- IICA-PROSAP (2009). Alconada Magliano, M.M. Estudio de suelos y aptitud de tierras para riego en los valles del río Percy y río Corintos de Trevelin; y en el valle del río Blanco en Cholila. En *Proyecto Desarrollo y ampliación del área irrigable de la Cuenca del río Futaleufú-Provincia de Chubut*. Convenio Instituto Interamericano para de Cooperación para la Agricultura- Programa de Servicios Agrícolas Provinciales. Informe 100 pag. y mapas.
- IICA-PROSAP (2013). Alconada Magliano, M.M. Determinación de la capacidad agrícola de suelos. En *Proyecto Manejo de Cuencas: Guaycurú-Iné y Río de Oro*.Informe 133p y mapas.
- Imbellone, P.,Giménez J.E. y Panigatti J.L. (2010). *Suelos de la región pampeana. Procesos de Formación*. Argentina. Buenos Aires: Editorial INTA. 288p.
- Irurtia, C. y Peinenman N. (1986). Efecto de la relación de adsorción sodio y la concentración de sales sobre la conductividad hidráulica de diferentes suelos. *Rev. Ciencia del Suelo*, 2 (165-177). Recuperado de: http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_4n2/Irurtia.pdf
- Jarabejo, J., Celis R., Ramos J.M., Busto H., Angelo S. y Pangilinan W. (abril 2018). *Analyzing the Salt Level in Different Soil Textures*. Recuperado de:
<https://www.ukessays.com/essays/sciences/analyzing-salt-level-soil-textures-2892.php>
- Jobbagy E. y Noretto M.D. (2015). Las napas freáticas superficiales como agente de degradación de suelos. En .Casas, R. y Albarracin G. (Editores). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I (pp 287-300). Buenos Aires: Editorial FECIC. 604p
- Kovda, V.A. (1965). Alkaline Soda-Saline Soils. *Agrokémia Es Talajtan*, 14:15-48.
- Lavado, R. (1988). Origin, Characteristics and Management of Solonetz Soils in Argentina. Proceedings of the International Symposium on Solonetz Soils. Problems Properties Utilization. Yugoslavia:128- 134.
- Lavado, R.S. (2007). Visión sintética de la distribución y magnitud de los suelos afectados por salinidad en la Argentina . Recuperado de:
http://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=29764&capitulos=yes&detalles=yes&capit_id=451821
- Lavado, R.S. y Taboada M. (2017).Génesis y propiedades de los suelos halomórficos. En Taleisnik, E. y Lavado R.S, (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 9-27). Buenos Aires, Argentina: Editorial Orientación Gráfica.

- Oosterheld, M., Aguiar M., Ghera C. y Paruelo J.M. (2005). *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía, UBA.
- SAMLA (octubre 2018). Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorios de Análisis de suelo
Recuperado de: <http://www.suelos.org.ar/sitio/sistema-de-apoyo-metodologico-a-laboratorios-de-analisis-de-suelo-samla/>
- Talesnik, E. y AA Rodriguez. (2017). Aspectos fisiológicos de la tolerancia a la salinidad en plantas superiores.. En Talesnik, E. y Lavado R.S, (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 327-338). Buenos Aires, Argentina: Editorial Orientación Gráfica.
- Raffaele, E. (1997). *Mallines: aspectos generales y problemas particulares*. Recuperado de: <http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/ciencias%20naturales/mab/3.pdf>
- Richards, L. A. (1973). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. México: Ed. Limusa.172p.
- Moscatelli, G. y Paso M.S. (2008). *Principales suelos de la Argentina*. Recuperado de: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/04/17/89382>
- Müller-Sámann, KM., Restrepo M. y José M. (1999). *Conservación de suelos y aguas en la zona andina: Hacia el desarrollo de un concepto integral: Memorias*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Publicación N° 309. Cali, Colombia. 230p.
- Nijensohn, L. N. (1972). Influencia de la calidad del agua de riego a nivel de predio *Rev. Fac.de Cs Agrarias, Mendoza*, XVIII (2), 93-116.
- Nijensohn, L.N. (1988). Determinación del nivel de salinidad edáfica a partir del quintuple extracto de saturación. *Revista Ciencia del Suelo*, 6 (1), 8 -13.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E. G., Tóth, T, y Di Bella, C.M. 2007. The effects of tree establishment on water and salt dynamics in naturally salt-affected grasslands. *Oecologia*, (152), 695-705.
- Peñuela, L.A., García Rubio G. y Carrillo Rivera J.J. (2015). Importancia del agua subterránea en la conservación de los ecosistemas. *Biodiversidad en el Distrito Federal: Estudio de Estado. Sección Medio Físico*. GDF, DGZVS y Conabio.
- Pla Sentís, I. (1979). Suelos salinos y elementos secundarios. *Revista Suelos Ecuatoriales*, X (2), 26- 50.
- Pla Sentis, I. (1983). Sistema integrado agua-cultivo-suelo-manejo para evaluar la calidad de agua para riego. *International Atomic Energy Agency, Vienna. Reprint from Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies*: 192-206.
- Pla Sentís, I. (1993). Soil Salinization y Land Desertification. College on Soil Physics. *International Centre for Theoretical Physics*. Italia.
- Pla Sentis, I. (2006a). Problemas de degradación de suelos en el mundo: Causas y consecuencias. *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*.
- Pla Sentis, I. (2006b). Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causa y efectos. *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*.
- Pla Sentis, I. (2014). Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated conditions. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(4):50-63. WASWAC. China

- Pla Sentis, I. (2017). Anthropogenic and climate change factors in present and future soil and water conservation problems. (Zlatic and Kostadinov, ed.) Soil and Water Resources Protection in the Changing Environment. *Advances in GeoEcology CatenaVerlag GMBH*.
- Pizarro, F. (1978). *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. España, Ed Mundi Prensas. 521 p.
- Porta, J.; López Acevedo M. y Roquero C. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Ed. Mundi Prensas. 807 págs.
- Prieto Garra, D., Sánchez R.M. y Martínez R.S. (2015) Las áreas de suelos y la degradación de la degradación de los suelos. En Casas, R. y Albarracín G. (Editores). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I (pp 319-346). Buenos Aires: Editorial FECIC. 604p
- Sánchez San Román, J. (2012). *Hidráulica subterránea: Principios Básicos*. España: Dpto Geología, Universidad de Salamanca. Recuperado de: http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/09.Hidraulica_Subterranea.pdf
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de suelos*. USDA, Dpto de Agricultura de los Estados Unidos. Traducción, Ortiz Solorio C.A., Gutiérrez Castorena M.C. y Gutiérrez Castorena E.V. 410p. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Sosa, D. (2012). El agua, excesos y déficits, en la producción agrícola de secano y pecuaria dentro de la cuenca inferior del río salado. (Tesis Doctoral Universidad de la Coruña, España). 236p. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/61906252.pdf>.
- Sosa, D.; Picatto H., Genesio M., Pratto M., Vergini E., Mergiola P. y Graciela Bernal (2011). *Comportamiento de las aguas subterráneas en el noroeste de la provincia de Santa Fe. producción ganadera*. CFI-INA-Provincia de Santa Fe.
- Sosa, D., Díaz Ucha D., Marchetti Z., Genesio M. y Vergini E. (2012). Los flujos subterráneos locales, intermedios y regionales en la hidroquímica de los Bajos Submeridionales, Argentina. *XI Congreso Latinoamericano de Geología*, Cartagena, Colombia.
- Sosa, D., Díaz Ucha D., Genesio M., Marchetti Z., Castro S., Venencio M.V., Heredia Díaz J., Rodríguez L., Silva Busso A., Moreno L. y Veizaga E. (2016). Primera aproximación sobre la circulación de los flujos subterráneos en los Bajos Submeridionales santafesinos. *IX Congreso Nacional de Hidrogeología. Ed Científica Universitaria, Secretaría Cs y tecnología, Catamarca*.
- Szabolcs, I. (1988). Solonetz Soils. *Proceeding of the International Symposium on Solonetz Soils*. Problems Properties Utilization. Yugoslavia, 9-25.
- Taboada, M., Damiano F. y Lavado R.S. (2017). Suelos afectados por sales e inundaciones en la Pampa Deprimida y el Oeste Bonaerense. En Taleisnik, E. y Lavado R.S. (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 56-87). Buenos Aires: Editorial Orientación Gráfica.

- Talesnik, E. y AA Rodriguez. (2017). Aspectos fisiológicos de la tolerancia a la salinidad en plantas superiores.. En Taleisnik, E. y Lavado R.S, (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 327-338). Editorial Orientación Gráfica.
- Töth, J. (1962). A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canadá. *Journal of Geophysical Research*, 67 (11), 4375-4387.
- Töth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3 (4), 4-16.
- Töth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Tecnológico GeoMinero España, 8, 49-26.
- Töth, J. (2008). *From the artesian Paradigm to basin hydraulics*. Institute of Geography and Earth Sciences, Eötvös Loránd University, Hungría. 106pp.
- Vallone, R., Martínez L.E., Olmedo F.G., y Sari S.E. (2017). Los efectos de la salinidad en viñedos del oasis norte de Mendoza. En Taleisnik, E. y Lavado R.S, (Ed.). *Ambientes Salinos y Alcalinos de la Argentina* (pp 553-570). Buenos Aires: Editorial Orientación Gráfica.
- Varallyay, G. (1981). Extreme Moisture Regime as the Main Limiting Factor of the Fertility of salt affected soils. *Agrokemia es Talajtan*, 3, 73-95.
- Vervoorst, F.B. (1967). Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado (Prov. de Buenos Aires). *Serie Fitogeográfica 7*. Buenos Aires: INTA.

CAPÍTULO 4

Dinámica de las fases del suelo

Jorge Washington Lanfranco

El presente capítulo reflexiona sobre la interacción de los componentes del suelo como carácter diagnóstico de abastecimiento. Se pondrá énfasis en su utilidad para el ejercicio profesional.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO.

Suelo en el paisaje

4.1. Los componentes y propiedades

Las plantas requieren satisfacer necesidades esenciales para su crecimiento y desarrollo, por lo que el rol profesional de Ingenieros Agrónomos y Forestales es identificarlas y abastecerlas. En lo posible arbitrar medios para mejorarlas, pero nunca propiciar su degradación. En la base de este concepto encontramos la calidad del suelo y en su manejo a modificaciones de su salud (Figura 4.1)..

Esas necesidades de las plantas podrían englobarse en seis parámetros principales: sostén, nutrientes, agua, aire, luz y temperatura. Las propiedades del sostén de las plantas son atribuibles directamente al suelo (Alconada *et al.*, 2018). Podríamos pensar que el agua y el aire; los factores temperatura y la luz se originan en el clima y el brillo solar. Sin embargo la planta los recibe administrados por medio de la organización del suelo, expresión de su relieve y ubicación geográfica.

Macroscópicamente el suelo puede ser definido como un sólido, pero en realidad es un sólido poroso, con espacios vacíos donde puede circular y almacenarse el aire, el agua, la energía calórica, electroquímica y ocurre la actividad biológica del suelo (Lanfranco, *et al.*, 2014).

Así desde un punto de vista físico el suelo puede ser considerado como un sistema trifásico y su interacción es preponderantemente un fenómeno de superficie. Sobre ella ocurren los procesos físicos, químicos y biológicos, estudiados como **abastecimiento** del suelo para que los nutrientes estén disponibles a las plantas en forma continua. Las propiedades del suelo que los definen condicionan la solubilidad de nutrientes, movimiento del agua y aire para la biología del suelo macro y microscópica (Jury, 1991). En términos generales puede indicarse que representan aquellas propiedades que vinculan con las partículas: textura, su organización como

estructura del suelo y estabilidad de la misma, la porosidad de aire, la porosidad de almacenamiento de agua, la densidad aparente, el contenido de carbono orgánico (Taboada, 2006), drenaje y composición de la solución del suelo, salinidad, sodicidad y pH.

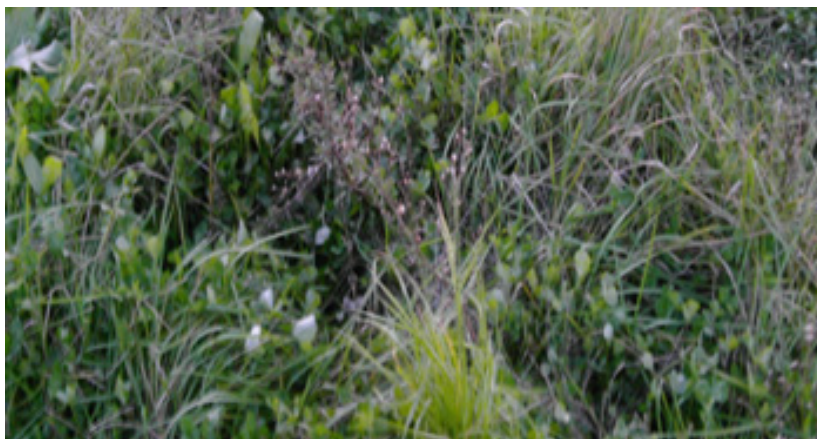


Figura 4.1 El abastecimiento depende de la calidad de los suelos y su manejo

Otras propiedades relacionadas podrían considerarse: color, profundidad, reconocimiento de capas u horizontes, expansión, contracción, compactación e impedancias para enraizamiento. Todo regulado por el factor temperatura (Porta *et al.*, 1994).

Muchas propiedades dependen de otras, por ejemplo la predominancia de partículas de limo en textura franco limosa permiten inferir susceptibilidad a la compactación.

En la región Pampeana Húmeda, núcleo de producción de soja, maíz y trigo, predomina la textura franco limosa y una de las principales propiedades negativas de abastecimiento es la compactación por agricultura continua y uso de maquinaria pesada.

4.1.1. Elección de propiedades físicas para elaborar diagnósticos de abastecimiento

La tendencia reduccionista nos lleva elegir un solo factor o a lo sumo dos y encontrar respuestas de comportamiento amplias. Nada más equivocado. El estudio de los suelos agrícolas y forestales es multivariable, generalmente un factor o varios inciden sobre otro u otros y a su vez se modifican durante el proceso. Por ello se deben elegir las propiedades *distintivas*, que se *repiten* con mejor correlación estadística y que permiten *prever* (Porta *et al.*, 1994) el comportamiento de los suelos con las plantas cultivadas y la incidencia del manejo.

Elección de las variables_.

Si bien el concepto de variable, es porque pueden cambiar con el tiempo; a algunas de ellas en suelos se denominan como *propiedades "permanentes"* por su gran resiliencia. Son entre otras la textura, existencia de estructura, espesor de capas u horizontes, impedancias mecánicas, profundidad efectiva, materiales y horizontes diagnósticos que definen carácter taxonómico hasta el nivel de familia (Soil Survey Staff, 2014). Son útiles para conceptos bási-

cos importantes de nivel regional y aún local. Podemos inferir que sus cambios afectan la salud del suelo como modificaciones de textura o espesor del suelo por *erosión o decapitación*. Por lo cual, el concepto de “*permanente*” es relativo. La principal causa de degradación de las tierras es la erosión (Casas y Albarracín, 2015).

Las llamadas *propiedades semipermanentes*; como el contenido de carbono orgánico, color, ciertos grados de consistencia, capacidad de agua y aire, densidad aparente y porosidad pueden verse modificadas con sólo un cambio de uso como el uso del manejo productivo, compactación, exportación de nutrientes y mineralización de la materia orgánica (Figura 4.2).

Las *propiedades transitorias* son las más dinámicas y cambian fácilmente de estado, como el contenido de agua, composición del aire del suelo, punto de adherencia, cambios de volumen y densidad aparente.

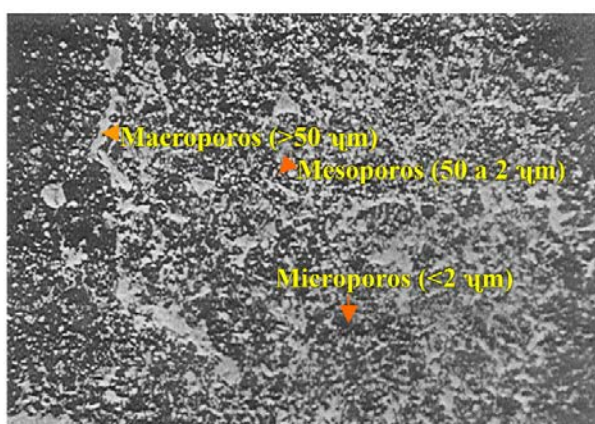


Figura 4.2. La estructura del suelo es el resultado de la integración de sus fases

4.1.2 Afectaciones en el abastecimiento

Afectaciones químicas.

Las propiedades físicas son modificadas marcadamente por la composición química de la doble capa difusa en reacciones de superficie en la interfase suelo-solución edáfica, y son debidas a los coloides del suelo y a la solución del suelo (Alconada *et al.*, 2018). Las principales son: acidez, alcalinidad, pH, salinidad, RAS y PSI (SAMLA, 2018). Su origen puede ser natural o influenciado por el manejo del riego, fertilizantes, inundaciones, ascenso de superficies freáticas y degradación por exportación/agotamiento de nutrientes.

En grandes rasgos el exceso de sales, en general, brinda condiciones de stress hídrico. Consecuentemente, el suelo puede contener agua pero no esta disponible para las plantas por la tensión osmótica desarrollada (Lanfranco *et al.*, 2014).

Valores de PSI elevados propician la inestabilidad de la estructura que disminuye la permeabilidad, el drenaje; dando lugar al anegamiento y la asfixia radical.

Papel de la actividad biológica_.

Muchas de las conclusiones extraídas sobre el comportamiento de los suelos surgen de mediciones que consideran al suelo como un sustrato sin vida. Se debe a que el uso continuo para producción acarrea contralor biológico de las plagas, especialmente en horticultura y por el excesivo y continuo uso de agroquímicos. Sin embargo en la agricultura actual de los grandes cultivos de leguminosas se ha instalado la práctica de la inoculación de fijadores de Nitrógeno. Mas localmente en cultivos orgánicos con mayor incidencia agroecológica, se recupera el concepto de la actividad biológica como precursora de la organización estructural del suelo, almacenaje de agua y resistencia a la erosión. Específicamente corresponde a la fase sólida del suelo.

El abastecimiento de los suelos como carácter estático y dinámico._.

Los suelos son estudiados de manera estática y dinámica. En el primer caso obtenemos un resultado sobre una sola variable. Por ejemplo textura, densidad aparente, consistencia en seco o cohesión, pH (Lanfranco *et al.*, 2014). En cambio las propiedades dinámicas cambian según el estado de la incidencia de otra como la plasticidad, adherencia, infiltración o difusión del aire.

Por ejemplo suelos arcillosos montmorilloníticos (Vertisoles de Entre Ríos) en estado de escasa humedad (menor al 15 %, Punto de Marchitez Permanente, PMP) pueden presentar grietas de mas de 3 cm de grosor por 1 m de profundidad. En ese estado el suelo puede contar con una adecuada aireación y la infiltración del agua podría ser rápida. Con una precipitación importante o bien riego aumentaría el tenor de agua en el suelo (superior a 40 %, Capacidad de Campo, CC) y las arcillas expandentes comenzarían a hincharse hasta cerrar totalmente las grietas y generar presiones internas que dejan los rasgos de los barnices de frotamiento (slickensides). En este nuevo estado, la infiltración y el intercambio gaseoso podría disminuir o anularse. La evaluación de estas propiedades físicas que afectan el abastecimiento cambia según el contenido de agua para este tipo de suelos. Por lo tanto es conveniente asociar ambas para un correcto diagnóstico. Las plantas en general, y cultivos en particular, pasan por este proceso a lo largo de su crecimiento y desarrollo.

Otro ejemplo contrapuesto puede ser un suelo arenoso (Entisol, *Pssament* de la Pampa Arenosa) donde los parámetros de infiltración, permeabilidad y aireación son altos con bajo contenido de agua (inferior a 8%, PMP). Aunque cambien las condiciones de contenido de agua por elevadas precipitaciones o riego (15 %, CC) los parámetros mencionados seguirán siendo altos porque el material arenoso posee macroporos y la fase sólida no se contrae o hincha como en el caso anterior.

4.2. Fase sólida

Se halla conformada por minerales y materia orgánica. Los primeros originados en la litósfera y los segundos en la fijación de energía del sol por medio de la fotosíntesis y fotoquímica.

La litosfera esta formada por minerales con predominancia de O, H, Si y Al, que suman 91,47% en conjunto. En el 8,53 % restante encontramos los nutrientes que sostienen la vida, lo cual inicialmente podría asociarse con una pobreza relativa en nutrientes (Alconada *et al.*, 2018). Debe aclararse que uno de los macronutrientes más demandado es el N y que proviene de la atmósfera siendo fijado por microorganismos en la materia orgánica.

La fase sólida posee una interacción permanente con la atmósfera, hidrósfera y la biósfera que provocan la alteración de minerales primarios, liberación de nutrientes para las plantas y generando minerales secundarios con fenómenos de superficie y cargas. La fase sólida aparenta ser la más estable o aún inerte. Sin embargo, participa de los procesos de alteración y de interfase con la solución del suelo y el aire. Son dinámicos y afectan propiedades desde permanentes hasta transitorias de los suelos.

En la fase sólida se encuentran partículas de gran variabilidad de tamaño que se pueden agrupar en macroscópicas, del esqueleto del suelo y microscópicas o coloidales (Mengel y Kirkby 2000). Las primeras se constituyen por arena y limo, mientras que las segundas por arcilla, óxidos, hidróxidos y materia orgánica. Las partículas se organizan por simple apilamiento o generando relaciones más estrechas mediante uniones que realizan los coloides del suelo.

La variabilidad de tamaño de las partículas y los poros tiene hasta 6 ordenes de magnitud, desde los micrómetros (μm) hasta los milímetros (mm), desde los espacios interlaminares de las arcillas donde se pueden albergar solo iones o virus hasta los espacios que dejan las arenas donde circula el agua, el aire y habita la macrofauna.

Coloides del suelo_.

La presencia de los coloides orgánicos, inorgánicos y sus interfases líquida y gaseosa, han permitido el desarrollo de estructuras más estables al agua pero deformables para facilitar el avance de las raíces y actividad de lombrices e insectos. Los coloides definen propiedades relevantes para el abastecimiento, capacidad productiva y sustentabilidad como la estructura estable, hidrofilia, reservorio de agua, existencia de cargas, exceso de energía libre por fuerzas intermoleculares no compensadas que generan fuerzas de atracción y repulsión (Bornemisza, 1982). Son fuerzas atractivas de enlace entre moléculas sin carga o fuerzas físicas llamadas de *Van der Waals*, *fuerzas de enlace por puentes de hidrógeno*, y *las fuerzas de repulsión electrostáticas y estéricas*. Existen coloides hidrófobos, con poca afinidad con el agua, como los sesquióxidos cristalinos y algunas arcillas que están rodeadas por una delgada capa de agua que frecuentemente plantean desecamiento irreversible en regiones tropicales de nuestra Mesopotamia.

4.3. Fase gaseosa. Aire en el suelo

La mayor parte de los cultivos que impulsa el hombre exigen condiciones aerobias también llamadas de oxidación. Las condiciones de oxidación de un suelo dependen de la eficacia en el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera. La presencia de oxígeno resulta imprescindible para la respiración de las raíces y de los microorganismos aerobios que viven en él.

Un suministro de oxígeno se reflejará en el coeficiente respiratorio (CR), que compara el volumen de CO₂ que libera el suelo con el volumen de O₂ consumido (Porta *et al.*, 1994). La relación debe aproximarse a 1 en condiciones aerobias. También lo refleja la tasa de respiración (TR) que mide volumen de O₂ consumido por volumen del suelo (cm³) en un tiempo dado (minuto). El aire se difunde por los macroporos que poseen conectividad en toda la masa del suelo y la atmósfera. Estos poros son de circulación de agua y aire. El agua no permanece retenida en esta clase de poros (superiores a 50 μ m) por lo que en condiciones normales quedan vacíos.

4.3.1. Incidencia sobre el abastecimiento

El oxígeno afecta al crecimiento al incidir sobre la absorción de nutrientes y agua en la mayoría de las plantas. Específicamente el aire es el elemento fundamental para la fijación biológica del Nitrógeno.

En suelos de *drenaje impedido* o en aquellos en los que la velocidad de circulación del agua es excesivamente lenta, la reposición de oxígeno es deficiente y aumenta el tenor de CO₂ disminuyendo el CR. Se originan condiciones anaeróbicas llamadas de reducción, que pueden afectar a la movilidad o expresión de los nutrientes. Siendo el Fe⁺² una excepción. En condiciones de exceso de agua, únicamente pueden sobrevivir aquellos organismos que estén adaptados a tales condiciones. En condiciones de *adecuada aireación*, el aire del suelo es una mezcla principalmente de nitrógeno (79 % en volumen), oxígeno y anhídrido carbónico (21 % entre ambos). La concentración de estos últimos fluctúa grandemente según las condiciones de aireación y según la actividad biológica.

Diagnóstico del estado de óxido-reducción de un suelo _.

Se puede afirmar que las condiciones de los suelos de oxidación o de reducción son muy variables y dependen del contenido hídrico del suelo. En suelos bien drenados predomina la oxidación aunque pueden existir periodos breves de reducción por encharcamiento o inundación. Procesos como la compactación de los suelos pueden contribuir negativamente. Los procesos de óxido-reducción modifican el estado de los iones del suelo que llegan a evidenciarse por rasgos morfológicos muy característicos. Dado que el oxígeno actúa de aceptor de electrones en los procesos de mineralización de la materia orgánica,

en ausencia de oxígeno, los microorganismos anaerobios deben obtener energía de otros aceptores secundarios y los productos resultantes pueden ser fitotóxicos (S^- , NO_2^- , Mn^{++} entre otros). La humificación y mineralización de la materia orgánica se ven lentificadas. Agregados como prismas gruesos en suelos arcillosos bien aireados pueden tener un ambiente reductor en su interior por su predominio de microporos.

El reconocimiento de ambientes reductores en el suelo puede diagnosticarse en el campo por apreciación de color gris, gris-verdoso y azulados (2,5 Y o 10 Y), asociado al Fe^{+2} o Mn^{+2} , en la masa o en moteados y concreciones. Coloraciones rojizas, pardas o similares (7,5YR) evidencian suelos bien aireados, estado de oxidación máximo por presencia de Fe^{+3} (pardo-rojizo) como agente cromógeno. Alternancia de condiciones oxidantes y reductoras a lo largo del año se suelen localizar en la zona de oscilación de la superficie freática.

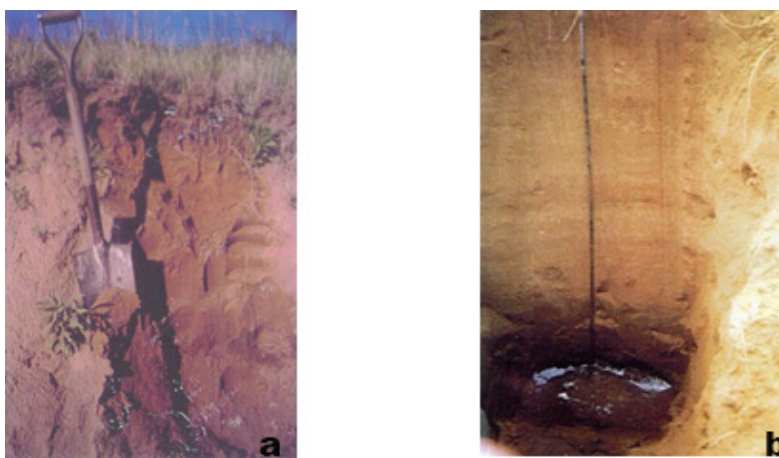


Figura 4.3 a) Suelo bien drenado en 9 de Julio, *Hapludol*. b) Suelo deficientemente drenado con superficie freática próxima en Pinamar, *Udipsament*

4.3.2. Mecanismos de intercambio de gases en el suelo

Si bien el suelo no es un elemento vivo el intercambio gaseoso con la atmósfera puede representarse como una respiración del suelo, imagen que nos hace reflexionar sobre su importancia en el abastecimiento de nutrientes. En la interfase suelo-atmósfera se produce un intercambio de gases de forma continua (Duchaufour, 1975) para equiparar las concentraciones del O_2 que se ve reducido por el consumo de los microorganismos y raíces, con el consiguiente desprendimiento de CO_2 , lo cual provoca diferencias de concentración que conducen la transferencia de gases.

Los mecanismos implicados en el transporte son:

- **Difusión** de moléculas de gas debido a gradientes de presión parcial o de concentración de los componentes entre distintos puntos de la masa de gas.

Es el mecanismo más importante en el suelo, modificado por las diferencias térmicas. Las moléculas de los gases se mueven desde los sectores de alta concentración a los de baja hasta llegar a un equilibrio (Lanfranco *et al.*, 2014). La actividad biológica es el agente desesta-

bilizante, y las moléculas de CO₂ y el O₂ se difunden en flujos opuestos por los mismos canales y poros. Lo cual dificulta a ambos flujos (Ball, 1991). De acuerdo con la ley de Fick, el movimiento de gases a través del suelo por difusión en estado estacionario es directamente proporcional al gradiente de concentración, al área de la sección disponible y al tiempo.

- **Flujo de masa** de los gases en su conjunto debido a gradientes de presión, por cambios de temperatura, por variación en el volumen del espacio poroso disponible por ingreso de agua, hinchazón, contracción, laboreo o viento en la superficie del suelo.

En todos los casos, el transporte del aire depende de la organización estructural, su estabilidad, la geometría de los poros y la existencia o no de encostramientos en la superficie.

- Transporte de **oxígeno disuelto en el agua** edáfica. Su eficiencia es muy baja e insuficiente para los procesos aeróbicos de los grandes cultivos.

Se presenta en suelos de llanuras en los que la circulación de la capa freática lleva O₂ para la respiración de las raíces. Cultivos como arroz o forestales de *Populus* y *Salix* o pueden encontrar en este mecanismo su principal intercambiador de gases. El agua no debe ser estancada.

4.3.3. Efectos de la aireación sobre el abastecimiento

Principalmente facilita el desarrollo biológico, mineralización de la materia orgánica, la organización del suelo y la liberación de nutrientes. En suelos bien drenados y condiciones aerobias, la difusión del aire permite la oxidación del C de la materia orgánica, como fuente de energía para los procesos biológicos, su mineralización y liberación de nutrientes (Alconada *et al.*, 2018). En términos de transporte de energía el proceso incluye un dador de electrones que es el C de la materia orgánica y un aceptor de electrones mediante la reducción del O₂ del aire. Las reacciones redox afectan principalmente a O, N, Mn, Fe, S, y C y, en el caso de suelos contaminados, pueden verse afectados otros elementos, tales como Se, Cr, entre otros.

Medidas del estado de aireación del suelo.

El diagnóstico de campo visual por la morfología del paisaje y del suelo (Figura 4.4) puede complementarse por medio de técnicas de campo y laboratorio:

- tasa de difusión del oxígeno
- potencial redox,
- de la tasa de difusión de oxígeno,
- composición de la atmósfera del suelo,
- actividad biológica. Mide CO₂ producido,
- actividad respiratoria,
- porosidad de aire,
- poros comunicados.



Figura 4.4 Crecimiento horizontal de raíces en suelos arcillosos indica impedancia mecánica y deficiente aireación en profundidad

4.4. Fase líquida. El agua en el suelo

El hombre debe reflexionar ante la disposición cuidadosa de los recursos naturales finitos, en ese sentido es importante señalar que el 97% del agua del planeta es salada y se encuentra en los océanos. El 3 % restante es agua dulce que se halla formando glaciares, capas de hielo, aguas superficiales y profundas. Es globalmente insignificante el agua que se retiene en los suelos (0,06 %) y que permite la producción de alimentos y la propia vida del hombre. Es por ello que adquiere un significado muy importante su retención en los continentes, cosecha de agua en el campo, infiltración en los suelos evitando desagües exagerados a los mares (Ameghino, 1884) su contaminación, extracción de aguas subterráneas y riego innecesario.

La vida en un ecosistema terrestre depende del estado energético del agua del suelo. El agua es uno de los parámetros más dinámicos que influye sobre el abastecimiento por su efecto fisiológico sobre las plantas durante los excesos por encharcamiento, inundación o defectos por sequías y por su rol en el transporte de los iones. Se representa en un proceso de ciclo continuo atmósfera – suelo - planta.

El agua en el suelo puede hallarse libre, o con un gradiente de vinculación energética con los poros sujeta al potencial mátrico, por efecto de la capilaridad y en interfase por efecto de la adsorción que ejerce la superficie de la fase sólida (Tschapek, 1959). Puede contener elementos nutritivos, sales disueltas, compuestos orgánicos solubles, contaminantes, fitosanitarios, y otros materiales en suspensión. Lo expresado indica que no existe en el suelo agua en estado puro, siendo “*solución del suelo*” una referencia más precisa para definirla.

Efectos sobre la fase sólida_.

- **Disolución:** El carácter bipolar del agua disminuye la energía que une los iones con el sólido, produciéndose su separación de la red cristalina o de su superficie; quedando en la solución del suelo a disposición de las plantas, microorganismos o ser adsorbidos por otros coloides del suelo. Una parte importante de la solución del suelo infiltra produciendo el lavado de iones, favoreciendo la ocurrencia de suelos ácidos como los Oxisoles. En el caso de que

exista aridez o deficiencias de drenaje, la solución del suelo puede acumular una mayor cantidad de iones generando salinidad que afecta la disponibilidad de agua para las plantas por aumento de la tensión osmótica. Sobre la estructura del suelo, la salinidad produce floculación de los coloides contribuyendo a su organización.

- **Hidrólisis:** La interacción de los iones H^+ y OH^- del agua con algunos iones del suelo puede romper la molécula de agua modificando su pH.
- **pH:** El pH del suelo se origina en la interacción con la fase sólida y se modifica con el agua en función de la hidrólisis, del lavado del agua pluvial y el consumo por parte de las plantas,

Ingreso del agua en el suelo_.

El agua pluvial, de escorrentía o de riego, ingresa al suelo por su superficie e *infiltra* por el espacio de poros, siguiendo la acción de la gravedad. Pasa a ocupar parcialmente o totalmente los espacios vacíos, donde puede ser retenida o infiltra mas profundamente llevando iones y coloides. Presenta un comportamiento dinámico, con variaciones a escala diaria. El comportamiento físico de los diferentes suelos se ve modificado por su contenido, que influye en la consistencia, plasticidad, penetrabilidad, transito y temperatura.

El ingreso de agua al suelo también puede ser por ascenso capilar desde la superficie freática y en este caso puede generar enriquecimiento de sales no beneficiosa para los cultivos.

Las raíces de la mayoría de las plantas toman el agua de la zona insaturada¹, ya que para respirar requieren un adecuado suministro de oxígeno del aire.

Las comunidades vegetales hidrófilas están adaptadas a poder vivir en condiciones con elevados contenidos de agua, en algunos casos pueden extraerla incluso de la napa freática, zona saturada, donde todos los poros están llenos de agua. Es el caso del arroz y salicáceas.

Propiedades físicas del agua_.

El agua es una de las sustancias más abundantes en el planeta, sin embargo, es considerada de comportamiento excepcional. Su estructura molecular de formula H_2O , es eléctricamente neutra pero posee un momento dipolar al estar desplazados los núcleos de carga positiva de los H^+ , formando un ángulo de 105° con el O^- , generando asimetría a la molécula (Figura 5.4).

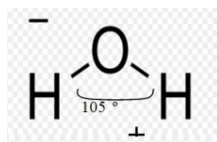


Figura 4.5 Estructura de la molécula del agua

Con relación a la asimetría molecular del agua, se reconocen propiedades importantes relacionadas con el abastecimiento tales como:

¹ En la zona insaturada los macroporos conservan aire para la respiración mientras que los mesoporos retienen el agua en niveles energéticos que permiten su absorción por parte de las plantas y los microporos la fijan con

- **Cohesión:** En la masa de agua, las moléculas interaccionan por medio del llamado *punto de hidrógeno*, que une las partes de diferente carga del dipolo con alta energía. El punto de hidrógeno genera la cohesión de las moléculas formando cadenas resistentes en toda la masa, lo cual permite que columnas de aproximadamente 10 m de altura sean traccionadas sin romperse. Propiedad que permite extraer agua subterránea de pozos mediante bombas desde la superficie.

- **Adherencia:** El agua como dipolo genera adherencia cuando interacciona con la matriz del suelo, especialmente con partículas cargadas eléctricamente como los coloides.

- **Tensión superficial:** La *tensión superficial* es la resistencia de la superficie del agua es a ser modificada por la existencia de una capa monomolecular de agua en interfase. Allí el punto de hidrógeno repliega las moléculas de agua hacia el seno del líquido tensando la superficie que adquiere la forma de menisco cóncavo en los capilares del suelo.

Estas tres propiedades son las responsables de la retención, el movimiento y el ascenso capilar del agua en el suelo.

Dinámica de la interacción con otras fases_.

En los mesoporos el agua se adhiere a la superficie en espesor de unas decenas de moléculas de agua, y otras moléculas las siguen por cohesión ascendiendo en contra de la gravedad formando meniscos como si fueran tubos capilares (Tschapek, 1959, Bornemisz, 1982). También forman una película alrededor de las partículas sólidas, especialmente las coloidales con carga.

En los suelos este mecanismo de dinámica de fases permite tanto el almacenamiento del agua que ingresa desde la superficie, movimientos laterales y el ascenso capilar desde la superficie freática. Tanto la retención del agua como la altura del ascenso capilar se determinan directamente por el valor de la tensión superficial del agua e inversamente por el diámetro de los poros del suelo, dado por la estructura y su estabilidad. Siendo la tensión superficial² del agua relativamente constante ($72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ a 20°C), podemos considerar que el factor más dinámico e importante es el diámetro de los poros y la estabilidad estructural. Con la fase gaseosa la interacción permite la solubilidad de aire y facilita la respiración de los microorganismos.

Cuando ingresa el agua a los poros de un suelo seco comprime el aire en su interior y lo obliga a salir, si la estabilidad de la estructura es débil puede desmoronarse generando compactación.

4.4.1. Contenido de agua del suelo

Al definirse el contenido de agua se produce la imagen errónea de considerar al suelo como un recipiente. Contrariamente, los suelos bien drenados no poseen impedimento para que el

² Tensión superficial en J m^{-2} o Nm^{-1} a 20°C , es la cantidad de energía necesaria para aumentar la superficie de una sustancia por unidad de área.

agua se profundice, sin embargo parte del agua es retenida en los poros del suelo por un equilibrio energético entre la acción de la gravedad y el ascenso capilar (Figura 4.6). Se puede interpretar que cuando se refiere al contenido de agua disponible, se lo debe relacionar con los aspectos físicos del suelo.



Figura 4.6 Equilibrio de fuerza que suspenden el agua en el espacio vacío del suelo

La planta **rompe el equilibrio energético** con la tensión de **succión** introduciendo el agua en su protoplasma disminuyendo el contenido de agua de la matriz del suelo hasta llegar a un nuevo equilibrio en que la planta no posee energía suficiente y comienza a marchitarse.

El contenido de agua puede representarse de diferentes maneras:

- expresado en peso de agua (kg) por peso de suelo (kg) en relación porcentual (%)
- expresado en volumen de agua (m^3) por volumen de suelo (m^3) en relación porcentual (%).

Ambos contenidos están relacionados con la densidad aparente del suelo seco (kg m^{-3}), que habría que determinar en cada caso ya que es variable y la densidad del agua que puede considerarse constante (1kg m^{-3}) variando ligeramente con la temperatura. El uso del contenido en la relación de masas es de uso rutinario en laboratorios sobre muestras disturbadas. Sin embargo para el uso profesional el contenido volumétrico es más útil. Posee valor local más preciso, a nivel de potrero, donde deben conocerse las condiciones de campo en cuanto a densidad aparente, organización y estabilidad estructural, para obtener información en tiempo real sobre la porosidad llena de agua, fácilmente transformable en mm de lluvia almacenada. Así prever continencia de sequías, previsión de riego y pronóstico de cosecha.

Perfil hídrico _.

El suelo es un cuerpo anisotrópico, esto es que sus propiedades cambian con relación a la profundidad por lo que se debe reconocer un diferente comportamiento de almacenaje de agua y eventual disponibilidad, en cada horizonte determinando el perfil hídrico en un eje de coordenadas.

En la Figura 4.7 se presenta un ejemplo en un Argialbol típico (Soil Survey Staff, 2014), donde se aprecia que es posible extraer conclusiones para el manejo del suelo. Este suelo es característico de paisajes plano cóncavo de la región pampeana. Se evaluó bajo tres condiciones hídricas. “Capacidad de campo”, luego de una etapa de recarga hídrica, finalización del invierno, el suelo posee su máximo almacenaje de agua en todo el perfil. Las diferencias de contenido de agua se deben principalmente a la textura de cada horizonte y el contenido de materia or-

gánica en el horizonte superficial. En “*sequía*”, estacional de verano, se observa importante disminución del contenido de agua en los horizontes superficiales. No así en los Bt₁ y Bt₂ de textura fina, con predominio de microporos. Allí el agua se retiene fuertemente y el desarrollo radicular es escaso por lo que su contenido no fue afectado. En forma análoga los horizontes más profundos pueden estar independizados del sector superficial, tal como en la situación con “*napa freática*” el perfil toma contacto con el agua subterránea, por flujos subterráneos, y posibilita el ascenso del agua (capilar o presión hidráulica) hasta la superficie, encontrándose saturado a partir de los 60 cm donde toda la porosidad del suelo contiene agua.

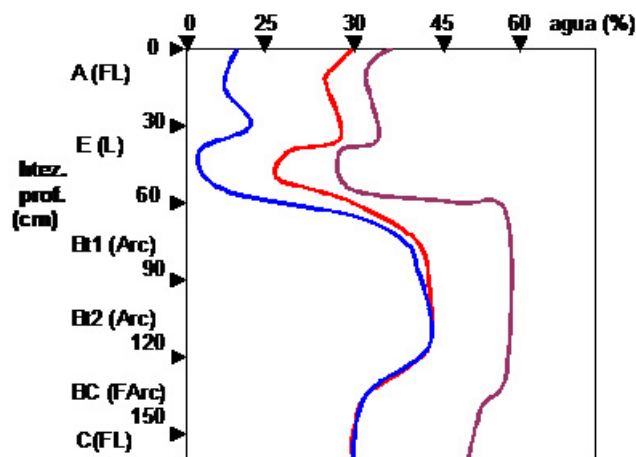


Figura 4.7 Perfil hídrico de un Argialbol típico en tres condiciones hídricas: Capacidad de campo (línea roja), Sequía (línea azul), y Superficie freática próxima (línea violeta)
FL, franco limoso. L, limoso. Arc, arcilloso.

Dinámica de la retención del agua en el suelo.

Podría esperarse que suelos con igual contenido de agua diesen lugar a solicitudes energéticas análogas por parte de una misma planta. Sin embargo existe un rango de variabilidad muy elevado que permite diagnosticar que un mismo contenido hídrico en suelos diferentes brinda a las plantas diferentes condiciones de disponibilidad. Así 10 % de agua en un suelo franco arcilloso generaría un estrés por *sequía* o *marchitamiento*, mientras que el 10 % de agua en un suelo arenoso estaría disponible a un bajo costo energético.

Ese estado de equilibrio energético agua-suelo-planta puede definirse como **potencial agua del suelo**.

4.4.2. Potencial del agua del suelo (Ψ_t)

Una masa de agua retenida en el suelo no saturado posee una capacidad de trabajo potencial si se desplazara en forma vertical o en movimientos laterales. Se la establece con relación

a un plano de referencia arbitrariamente definido, como podría ser la altura de la superficie freática. En la medida que la masa de agua se acerca al plano de referencia pierde parte de esa potencial capacidad de trabajo expresada como una diferencia de potencial agua.

Sin embargo, qué *capacidad de trabajo puede poseer una masa de agua retenida en el suelo?* La respuesta es sencilla: ninguno. Primero se la debería liberar de la retención de la matriz del suelo con *subsidio de energía externo* para luego caer libremente y producir un trabajo. Por lo tanto el *potencial agua* del suelo (Ψ_t) siempre tiene signo negativo para suelos no saturados. Las plantas, otros organismos del suelo y otros sectores del mismo suelo con menor contenido de agua, son los que necesitan disponer de una parte de la misma, y en la medida de sus capacidades entregan energía para primero liberar el agua y luego acceder a ella. El agua se mueve por diferencia de potencial (Ψ_t); de los más altos a los más bajos, siempre en signo negativo. El potencial cero se toma como estado de referencia, la altura de la superficie freática.³

La transferencia de agua desde un punto del suelo a una planta, organismo u otro sector del suelo posee un costo energético para liberar el agua retenida que se denomina potencial agua total (Ψ_t)

Componentes del potencial agua (Ψ_t)_.

Integra la suma de otros potenciales (Porta *et al.*, 1994):

- Potencial de presión. (Ψ_p). Siempre presente y es muy dinámico
- Potencial gravitacional. (Ψ_g). Siempre presente. Varía con la altura topográfica, de las plantas y con relación al nivel del mar.
- Potencial osmótico o de soluto: (Ψ_o). Se lo considera de existir sales más solubles que el yeso (SAMLA, 2018).

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_o$$

El potencial de presión (Ψ_p) está formado por otros dos potenciales que tiene lugar en los poros del suelo:

- Potencial mátrico. (Ψ_{pm}).

Siempre presente. Es el más importante y se relaciona con la retención que se produce por la matriz del suelo y su interfase con el agua.

- Potencial neumático o de presión de aire. (Ψ_{pa}).

Este está presente cuando el suelo se inunda, riega o por precipitaciones violentas. El aire no puede salir con rapidez y el avance del agua de infiltración comprime el aire entrampado que a su vez presiona a la fase líquida del suelo.

³ La International Society of Soil Science define estado de referencia a un depósito de agua sin solutos ni impurezas, sin estar sometida a fuerzas externas distintas de la gravedad, no afectada por la fase sólida y su interfase con la fase gaseosa es plana, presión atmosférica normal y temperatura constante y similar que el agua del suelo.

$$\Psi_p = \Psi_{pm} + \Psi_{pa}$$

En los laboratorios de Edafología y en campo se mide casi con exclusividad el potencial matricial, Ψ_{pm} , que tiene valores con intervalo de 0 kPa⁴ (kilopascal) en suelo saturado de agua hasta menos de -2000 kPa en suelos con sequía extrema.

El potencial osmótico o soluto, Ψ_o , le sigue en importancia para las condiciones de nuestro país y se lo mide como presión osmótica, por lo que se manifiesta en las plantas por medio de su membrana celular semipermeable. Ψ_o solicita mayor energía por parte de la planta para absorber agua, al tener que separarla de los iones hidratados disueltos (Figura 4.8). Conduce a una posible sequía fisiológica ya que la planta sufre marchitamiento aunque el suelo tenga agua a Ψ_{pm} altos.

La suma de $\Psi_{pm} + \Psi_o$ tiene el mayor interés en la absorción de agua por las plantas.

En árboles altos adquiere importancia el potencial gravitacional, Ψ_g , y en los macroporos y grietas desempeña un importante papel en la eliminación del exceso de agua (drenaje) en la zona radicular después de una lluvia o de un riego.

Medida del potencial total, Ψ_t y sus componentes_.

- Potencial de presión Ψ_p : piezómetro y tensiómetro en el campo. En laboratorio por equipo de placa de presión (Richards, 1965 en Porta *et al.*, 1994).
- Potencial gravitacional, Ψ_g : por la distancia vertical al estado de referencia.
- Potencial osmótico, Ψ_o : en un extracto de solución del suelo midiendo la presión osmótica o indirectamente mediante la concentración de sales por la conductividad eléctrica, CE. (SAMLA, 2018)



Figura 4.8. Izq. Plantas crasas (*Salicornia sp.*) extrae agua a bajos Ψ_o . Der. Napa freática salina a 25 cm de profundidad. En suelos salinizados por flujos subterráneos de Trenque Lauquen.

⁴ kPa corresponde al sistema internacional de unidades. Sin embargo, existen trabajos y aparatos de laboratorio que consideran a la atmósfera (atm) o al Bar (B) como unidad, siendo su equivalencia de 100 kPa a 1 atm.

Retención de agua en el suelo_.

En condiciones de suelos bien drenados, el agua de lluvia o de riego ingresa al suelo en un proceso de **infiltración** siguiendo grietas o espacios porosos comunicados y se almacena a disposición de las raíces de las plantas. Los excesos constituyen el agua de drenaje por predominio de la acción de la gravedad.

El potencial matricial (Ψ_{pm}) está relacionado con el contenido de agua en el suelo y su movimiento por el sentido en que tiene lugar el cambio en el contenido de agua; moviéndose de zona húmeda a seca, en una redistribución del agua dinámica hasta que el potencial sea uniforme.

El consumo de agua por las plantas en una línea de cultivo puede generar diferencias de Ψ_{pm} con el entresurco y movimiento de agua lateral hasta uniformizar los potenciales.

En condiciones de campo se desarrolla este proceso pero lo interrumpen humedecimientos periódicos por lluvias o riego. En este caso las curvas adquieren un comportamiento complejo llamado histéresis.

Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)_.

El agua se halla suspendida en los poros del suelo por una composición de fuerzas y las plantas pueden generar otras que desequilibren el sistema para absorberla. La cantidad de agua disponible para las plantas es la que se halla en los rangos energéticos de succión o tensión que esta puede desarrollar. Cuando el suelo deja de tener agua de exceso y suspende el drenaje, puede estimarse que se encuentra en el máximo almacenamiento de agua y el Ψ_{pm} tiende a 0 kPa, aunque su valor se considera 33 kPa, por lo que el costo de energía para las plantas es mínimo.

Cuando almacenamiento de agua es máximo el suelo halla en **capacidad de campo (CC)** y la planta debería desarrollar - 33 kPa para equilibrar el Ψ_{pm} y obtener agua.

En ese estado los poros que retienen el agua son los de menos de 50 μm que incluye a los mesoporos (50 μm a 2 μm) y microporos (< 2 μm) (Figura 4.2). En la medida que la planta consume el agua y se producen otros efectos desecantes como la evaporación, se van vaciando poros de radio cada vez más pequeños en donde la fuerza de capilaridad es mayor y la energía demandante aumenta de manera importante hasta un límite de Ψ_{pm} que llega a - 1500 kPa, considerado en equilibrio con los poros de 2 μm . En ese estado las plantas mueren por marchitamiento porque aunque el suelo posea agua remanente, esta se halla fuertemente retenida (Tschaepke, 1959) y no puede ser extraída por las plantas cultivadas.

Cuando se observa un marchitamiento irreversible debido a que la solicitud de energía para obtener agua supera a las posibilidades de las plantas cultivadas el suelo halla en su **punto de marchitez permanente (PMP)** y la planta debería desarrollar -1500 kPa para equilibrar el Ψ_{pm} y obtener agua.

Plantas de regiones áridas (plantas crasas), pueden superar este límite mediante estrategias fisiológicas tal como aumentando el contenido protoplasmático de sales.

En la Figura 4.9. se seleccionan a modo de demostración, cinco tamaños de poros, teniendo como finalidad exponer su relación con el contenido de agua del suelo y su equilibrio energético. En **CC** todos los poros elegidos se hallan llenos con agua y la demanda energética por parte de la planta es baja (-33 kPa). Con mayor demanda de la planta (-100 kPa) se ha consumido el agua de los poros de mayor diámetro y es conveniente **regar** para no generar un **estrés hídrico** que en general se sufre a -300 kPa , en donde los poros con agua son los de $10 \mu\text{m}$ o menores. A partir de este estado las plantas dejan de crecer o desarrollarse para sólo gastar más energía en obtener agua. En el punto de marchitez temporario (**PMT**) a -800 kPa la planta sólo genera estrategias de supervivencia como cierre de estomas y acartuchamiento o abscisión de hojas. Cuando queda agua sólo en los poros $2 \mu\text{m}$ se ha llegado al **PMP** y la planta no esta en condiciones de extraer agua a -1500 kPa ⁵.

Tamaño de poro	50 μm	30 μm	10 μm	2 μm	<2 μm
CC - 33 kPa					
regar -100 kPa					
Estrés hídrico. -300 kPa					
PMT - 800 kPa					
PMP -1500 kPa					

Figura 4.9 Relación esquemática entre el contenido de agua del suelo, diámetro de los poros y energía que debe ejercer la planta para su extracción

Capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es el volumen entre las situaciones, capacidad de campo(CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP)

El valor de la CRAD tiene importancia en el suministro hídrico de riego. En secano permite establecer servicios de alarma por sequía y proyecciones de cosecha. Para determinar los volúmenes se debe tener en cuenta la densidad aparente del suelo, el contenido volumétrico en % y el espesor de los horizontes considerados para el ambiente rizosférico de las plantas.

⁵ Para percibir el significado de estos valores es conveniente recurrir a la equivalencia con una unidad utilizada en aparatología de E.E.U.U., la libra.pie⁻², donde -33 kPa equivalen a 14 libra.pie⁻² y -1500 kPa a 225 libra.pie⁻².

El concepto de la **CC** surge de contenido de agua en el suelo después de 48 horas de un riego o de una lluvia abundante. Se supone que transcurrido este tiempo ha drenado el agua libre del suelo que se movía por acción de la gravedad en los macroporos comunicados. Podría definirse como una medida del contenido máximo de agua que puede retener el suelo cuando la mayoría de la macroporosidad está ocupada por aire. En PMP corresponde al límite inferior del agua retenida por fuerzas capilares absorbible por las raíces y se ha convenido en una presión de -1500 kpa.

En los estudios de suelos el CRAD se asocia a factores algo variables como el tamaño de los poros y estos, a la organización estructural y su estabilidad (Hénin *et al.*, 1972). Las fuentes de variación surgen de la erosión y la compactación que disminuyen la porosidad total y en especial, la proporción de los macroporos. Para reducir las fuentes de variación, la mayor cantidad de trabajos científicos se basan en estudios sobre muestras perturbadas en laboratorio mediante desmenuzamiento y tamizado a 2 mm. En estas muestras las determinaciones del CRAD dependen de su textura, ya que prácticamente no existe reconocimiento de estructuras; salvo las de los pseudolimos y pseudoarenas. Consecuentemente, en muestras disturbadas puede asociarse a las texturas arenosas con predominio de macroporos, a las texturas arcillosas con predominio de microporos y a las demás texturas con mayor incidencia de los mesoporos.

En la Figura 4.10 se puede observar que la textura arenosa es la de menor CRAD por poseer baja porosidad (40 %) y predominio de macroporos. La textura arcillosa si bien es la de más alta porosidad (60 %), sus poros predominantes son de $<2\mu\text{m}$ y retienen el agua con energía superior a la que pueden desarrollar las plantas y por lo tanto su CRAD es bajo. Las texturas franca a franca limosa, con mayor variabilidad de partículas y poros, son las que poseen mayor CRAD a pesar que su porosidad es intermedia (50 %).

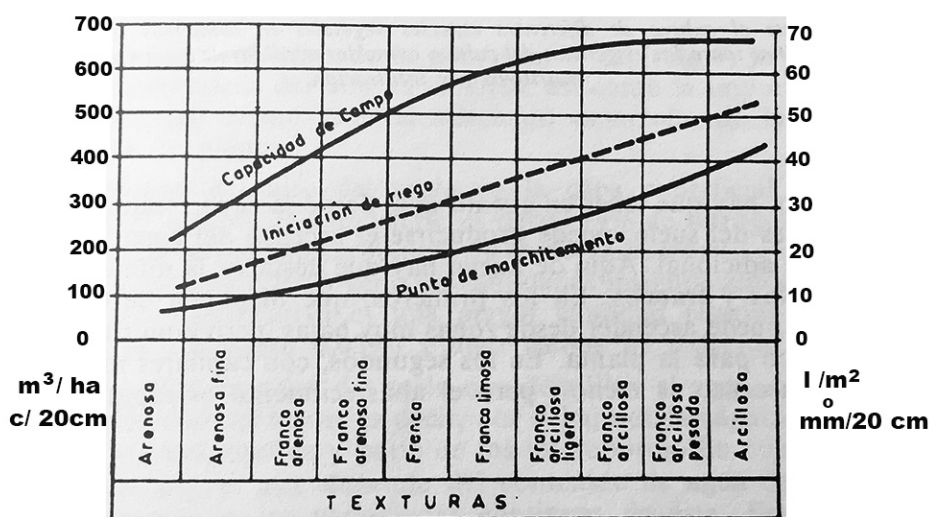


Figura 4.10. El CRAD se halla representado por el área entre las curvas de CC y PMP para cada textura (modificada de Domínguez Vivancos, 1989)

Para los diferentes suelos y tipo de manejo podemos encontrar que el proceso de desecación por consumo de las plantas va modificándose en función del tamaño de los poros que están reteniendo el agua desarrollando una curva característica de desecación o desorción. En la Figura 4.11 se presenta para tres texturas las curvas de desorción.

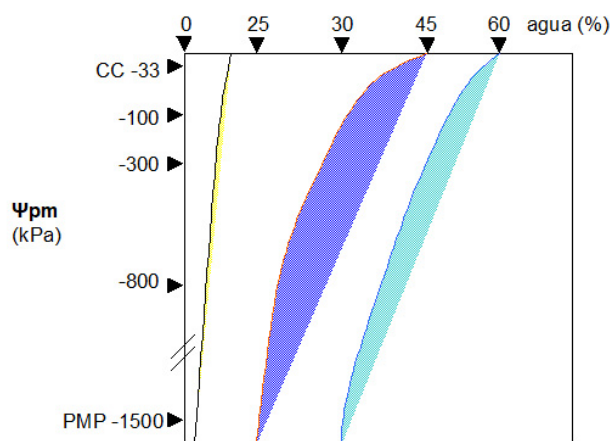


Figura 4.11 Curvas de desorción: textura arenosa (izquierda); textura franco limosa (centro); textura arcillosa (derecha). Área de integración representa el CRAD

Medición del potencial matricial (Ψ_{pm})_.

- **Tensiómetro:** se instala en el terreno y se integra al suelo sin prácticamente modificar la estructura del suelo para potenciales matriciales altos de de 0 a - 80 kPa. Es útil para definir el riego.
- **Placa de presión en laboratorio,** determina la curva de desecamiento con equipo de placa de presión (Richards, 1965 en Porta *et al.*, 1994) con un Intervalo de trabajo de -10 a menos de -2.000 kPa. En Edafología de la FACyFs., se puede observar su funcionamiento.

4.4.3. Histéresis

En condiciones naturales o en producciones bajo riego, las plantas desecan el suelo pero salvo desastres climáticos raramente llegan hasta el PMP sin antes recibir reposiciones de agua. En la desecación se va agotando el agua de los poros siguiendo un orden diámetros cada vez más reducidos disminuyendo el Ψ_{pm} y solicitando cada vez más energía a las plantas. Sin embargo ante un aporte de agua, esta ingresa al suelo por sectores de mejor acceso que son los poros de mayor diámetro. En ese instante la planta posee la oportunidad de aprovechar agua a menor costo energético aunque el contenido de agua total aún no haya aumentado substancialmente.

La curva de desorción obtenida en la Figura 4.12., partiendo de una muestra *saturada* de agua no sigue el mismo recorrido que la determinada por sorción, a partir de una muestra *seca* o que recibe agua en estados intermedios. Como señalan las marcas circulares rojas, que se ubican con igual tenor de % de agua, en la *curva de desorción el contenido de agua se halla en un Ψ_{pm} de PMP* y en cambio en la *curva de sorción el Ψ_{pm} se ubica entre estrés hídrico y PMP*. Inciden marcadamente la textura, la forma (con o sin uniformidad), y tamaño de los poros y la compactación. Los procesos de histeresis son diferentes para cada suelo pero **en general** un mismo **contenido de agua es retenido con mayor energía si el suelo se está secando que si se está humectando**.

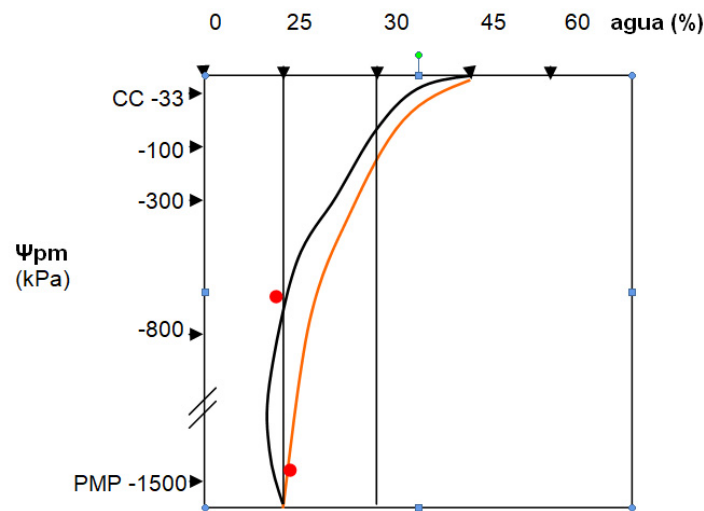


Figura 4.12. Suelo de textura fracolimososa. Curva de desorción --- Curva de sorción---
● similares condiciones de agua % y diferentes Ψ_{pm}

4.4.4. Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua inicial en suelos bien drenados es la *infiltración* o *las entradas laterales*. En suelos con drenaje deficiente la entrada de agua puede también producirse por *ascenso de la superficie freática*. Existen también movimientos del agua generados por la *absorción por parte de las plantas* y la *evaporación*.

La *infiltración* es el proceso más importante, generalmente vertical originado en la lluvia o riego. El ingreso de agua tiene lugar bajo la influencia de la *aceleración de la gravedad* y los *gradientes de Ψ_{pm}* , pudiendo afectar marcadamente el encostramiento, pisoteo, laboreo reciente, compactación, grietas en suelos con arcillas expansibles, textura, estructura, cubierta vegetal y la calidad del agua. La intensidad del aporte de agua puede atrapar aire y limitar la infiltración o el impacto de las gotas de lluvia sobre agregados de baja estabilidad producirá su desintegración, colmatando los poros en una capa superficial. Ante una deficiencia de infiltración se favorece el escurrimiento, la erosión y se pierde de almacenar agua para las plantas. En la Figura 4.13 se aprecia un ejemplo de sellamiento y encostramiento.

En la Figura 4.14 se presenta un simulador de lluvias utilizado en el INTA (Michelena, Irurtia, y colaboradores) para medir el escurrimiento y erosión. La gota de lluvia impacta en la superficie del suelo, el agua con el material edáfico suspendido es recojido en un recipiente a partir del cual se estima la erosión.



Figura 4.13 Sellamiento en suelo desnudo por impacto de la gota de lluvia (izquierda), y encostramiento por erosión (derecha), ambas impiden infiltración de escorrentía con el material en suspensión (se infiere erosión)



Figura 4.14 Simulador de lluvia para medir infiltración, escorrentía y erosión por impacto de la gota de lluvia (izquierda) y detalle de su base donde se recoge el agua

Tanto las sequías como las inundaciones pueden tener un origen común y es el manejo deficiente en la cosecha de agua para el suelo

En los poros de los suelos bien drenados y de calidad productiva deben coexistir el aire y el agua; y ambos son fluidos que se difunden por la conectividad de los poros del suelo en un *flujo no saturado*, por diferencia de potenciales (Youngs, 1991) siguiendo la ley de Darcy-Buckingham.

En condiciones de deficiente drenaje o en la superficie freática no se reconoce la fase aire y el flujo se denomina *saturado*. El espacio poroso está lleno de agua y podrían generarse condiciones de anaerobiosis e hidromorfismo. El Ψ_{pm} tiende a cero. Sin embargo existe un movimiento del flujo lateral que se explica por ley de Darcy. En ambas situaciones el agua se mueve por gradientes energéticos de cargas y potenciales. Siendo más compleja su aplicación a los flujos no saturados.

Permeabilidad _.

Es un factor de abastecimiento importante porque puede asociarse a la velocidad con que un suelo puede recuperar su capacidad aeróbica luego de un aporte importante de agua. Conceptualmente es la resistencia que ofrece el suelo al movimiento del agua y se asocia a la conductividad hidráulica aunque en medio no saturado no es constante y pasa a depender del Ψ_{pm} . Influyen las características físicas del suelo, especialmente la textura, de la organización y estabilidad estructural, la compactación y la existencia de materiales expandibles.

4.5. Temperatura en el suelo

Los procesos de abastecimiento, físicos, químicos y biológicos del suelo son influenciados por la temperatura (Buchan, 1991). Generalmente los procesos asociados a condiciones de intervención biológica se ven influenciados sensiblemente en bajas y altas temperaturas poseyendo regímenes intermedios ideales. Los principales efectos son sobre:

- actividad respiratoria,
- disponibilidad de agua para la planta,
- actividad microbiana (nitrificación es inhibida por las bajas temperaturas),
- mineralización de la materia orgánica,
- intensidad de la biodegradación de pesticidas,
- reacciones de meteorización química de rocas y minerales.

La temperatura del suelo se halla determinada por los intercambios energéticos con el medio exterior y las transferencias de calor con los compartimentos contiguos (Porta *et al.*, 1994). El contenido de calor en el suelo es función de las características y estado del sistema, flujo radiante que recibe (latitud), propiedades térmicas que posee, contenido de agua en sus distintos puntos y color.

Transmisión de calor en el suelo _.

El calor es transmitido en el suelo o intercambiado con la atmósfera, por diversos procesos que se producen según las condiciones de las fases del suelo.

- **Radiación:** Es el principal proceso por el cual el suelo intercambia calor con el

medio y en especial recibe calor procedente del sol en forma de energía radiante.

- **Conducción:** Las moléculas, de la fase sólida, al recibir calor aumentan su energía y las transfieren a las contiguas por contacto, aumentando su temperatura. Es un mecanismo de transferencia de calor en suelos secos donde se debe producir contacto entre sus componentes. El calor se transfiere de los puntos de mayor a los de menor temperatura. El aumento del contenido de agua perfecciona el contacto entre las partículas y facilita la conductividad.
- **Convección:** El calor se propaga por movimiento de agua o aire caliente modificando su densidad y produciendo movimiento por convección.
- **Cambios de estado del agua:** Ante los cambios de estado de congelamiento (líquido a sólido), evaporación (líquido a gas), condensación (gas a líquido) se producen transferencias de calor en el suelo.

Capacidad calorífica del suelo _

Conceptualmente es la cantidad de calor necesario para que la unidad de masa o volumen de un suelo aumente un grado su temperatura en condiciones a presión constante. Su valor depende del calor específico de sus componentes y contenido de agua, así un suelo mineral ($1,9 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) pobre en materia orgánica requiere menos energía calórica para aumentar su temperatura que uno orgánico (componentes orgánicos $2,47 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). En suelos secos el aire transporta más fácilmente el calor ($1,25 \times 10^{-3} \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$). En la medida que el suelo se humedece (agua $4,19 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) requiere aún mayor energía calórica, para aumentar su temperatura.

Bibliografía

- Alconada Magliano, M.M., Lanfranco J.W. y Pellegrini A.E. (2018). *El suelo en el paisaje. Parte 1 Condiciones de dotación*. La Plata: Edulp. Recuperado de:
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1>
- Ameghino, F.(1884). *Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires: Ministerio de Asuntos Agrarios PBA, 3, edición 1969. 66 p
- Ball, B.C. and K.A. Smith. (1991). Gas movement. En K.A Smith and C.M. Mullins (Ed). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (pp.499-538). New York: Ed Marcel Dekker
- Bornemisza, Elmer. (1982). *Introducción a la química de suelos*. Monografía N.25 OEA. Universidad de Costa Rica.
- Buchan, G. D. 1991. Soil temperature regime. EEn K.A Smith and C.M. Mullins (Ed). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (pp. 551-612). New York: Ed Marcel Dekker
- Casas, R. y Albarracín G. (2015). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I y II. Buenos Aires: Editorial FECIC. 604p y 452p.
- Domínguez Vivancos, A. (1989). *Tratado de Fertilización*. Madrid. España: Ed. Mundi Prensa. 601p.
- Duchaufour, P. H. (1975). *Manual de Edafología*. Barcelona: Toray Masson. 476p
- Hénin, S., Grass R. y Monnier G. (1972). *El perfil cultural*. España: Ed. Mundi Prensa.342p.
- Jury W.A., Gardner W.R. y Gardner W.H. (1991). *Soil physics*. New York: 5th Edition John Wiley & Sons.. 328 pp.
- Lanfranco, J.W., Pellegrini A.E. y Cattani V.M. (2014). Contenidos de Edafología. Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo. Facultad Cs Ag y Fs, UNLP. Recuperado de: Aula Virtual Edafología. 254p.
- Mengel, K. y Kirkby E.E. (2000). *Principios de la nutrición vegetal*. Traducción R Melgar. 4 Ed Instituto Internacional de la Potasa, Suiza. 597p.
- Michelena, R., Irurtia, C., Eiza, M., Carfagno, P. y Pirolo, T.. (2010). *Manual de Procedimientos de Análisis Físico de Suelos*. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-protocolo_de_analisis_fisicos.pdf
- Porta, J., López-Acevedo M. y Roquero C. (1994). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Madrid. España: Editorial Mundi Prensa.804p.
- SAMLA (2018). *Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorios de Análisis de suelo*. Recuperado de:
<http://www.suelos.org.ar/sitio/sistema-de-apoyo-metodologico-a-laboratorios-de-analisis-de-suelo-samla/>
- Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de suelos*. USDA, Dpto de Agricultura de los Estados Unidos. Traducción, Ortiz Solorio C.A., Gutiérrez Castorena M.C. y Gutiérrez Castorena E.V. 410p. Recuperado de:
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

- Taboada, M. y Muccci F.G. (2006). *Fertilidad física de los suelos*. Buenos Aires: Ed. AACCS
- Tschapek M.W. (1959) El agua en el suelo. Buenos Aires: INTA. 402p.
- Youngs, E. G. (1991). Hydraulic conductivity of saturated soil. En K.A Smith and C.M. Mullins (Ed). *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (pp. 161-207). New York: Ed Marcel Dekker

CAPÍTULO 5

Diagnóstico y estudio de la fertilidad edáfica

Margarita Alconada Magliano

Se presentan los aspectos generales del diagnóstico de la fertilidad del suelo teniendo como objetivo definir su aptitud de uso y posibilidades de intervención de modo de mejorar, preservar o poner en valor un paisaje. Se presenta un procedimiento de estudio que partiendo de la caracterización individual de las propiedades del suelo, permite definir limitantes, potencialidades y sus orígenes, considerando al suelo en estudio como parte de un paisaje local y regional.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO.

SUELO EN EL PAISAJE

5.1 Objetivo, importancia e integración del estudio del suelo con otras disciplinas

Objetivo de estudio del suelo_. Al estudiar los suelos se busca definir la **aptitud de uso** y la factibilidad técnica, económica y social de **intervenciones** que coadyuven para revertir **limitantes** y/o preservar o mejorar la **potencialidad** productiva. Si bien, la intensidad de estudio y los procedimientos varían con la escala de trabajo y finalidad, se parte de considerar los perfiles edáficos, tal como se presentan en las cartas de suelo, o se describen a campo en sitios seleccionados. En todos los casos, se dispondrá de una información analítica y morfológica del suelo hasta la profundidad de estudio en el momento en que se efectuó el reconocimiento, consecuentemente “una fotografía” en la fecha de estudio. Sin embargo, es posible prever el funcionamiento de dicho suelo si sus **propiedades se analizan por su posible origen**, relacionándolas con otros elementos del paisaje local y de este con lo regional. Al definirse en Porta *et al.* (1994) al suelo como un “*cuerpo natural, con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles*” (punto 1.1.1), se está indicando que el suelo no puede ser analizado por su “individualidad” sino como un subsistema que integra sistemas mayores locales y regionales, y estos se incluyen dentro de los sistemas globales (biósfera, hidrósfera, litósfera, atmósfera). Esta globalidad queda claramente explicada en lo indicado por Pla Sentis (2014) respecto a que los suelos son la base de la producción y de la preservación de ecosistemas, la *degradación de suelos, el calentamiento global y la pérdida de biodiversidad*, son 3 procesos íntimamente relacionados y de similar trascendencia, requiriéndose **enfoques hidrológi-**

cos a fin establecer **causa-efecto** de la degradaciones edáficas y como estas inciden en eventos y desastres ambientales (punto 1.1.1).

La unidad de estudio del suelo es el paisaje y la fertilidad edáfica queda definida por las condiciones de dotación (Suelo en el paisaje, Parte 1, Alconada, *et al.*, 2018) y abastecimiento (presente libro Capítulos 1 a 4).

Importancia del estudio del suelo_. Es importante reflexionar sobre el rol del Ingeniero Agrónomo y Forestal en las condiciones actuales de degradación, devastación de tierras, aguas, y asociado a esto, a otros problemas ambientales, conflictos sociales, políticos, y fundamentalmente a no resolver la pobreza creciente. Las causas son sin duda diversas y complejas, algunas pueden ser abordadas por los profesionales de las ciencias de la tierra y el ambiente, pero para ello, hay que intentar *cambiar al menos en algunas cosas, el “orden de cosas” preestablecidas* por generaciones como válidas, porque están escritas, por que así se *hacen* habitualmente, porque una *empresa* lo recomienda, o..... o porque *no se sabe* como hacerlo.

La naturaleza es compleja pero simple a la vez, compleja por la gran cantidad de variables que intervienen, y simple, porque responde en general a leyes, principios, procesos, que son conocidos, y cuando eso no sucede, con frecuencia es porque no se han realizado las suficientes o adecuadas asociaciones entre los elementos de la naturaleza y con el hombre.

El ingeniero agrónomo y forestal debe poder ser “medico clínico” del ambiente natural y antrópico. El suelo, dada la gran cantidad de variables que intervienen, es tal vez un ejemplo clave para comprender lo que se intenta indicar. El profesional debe analizar con un **pensamiento crítico, con sentido común, y rigor científico**, lo que se conoce para abordar nuevos desafíos que mejoren lo existente, buscar soluciones, evitar degradaciones, contaminaciones, etc, pero fundamentalmente tener la sensatez de recurrir a *otras disciplinas, especialistas*, que en forma conjunta permitan “*superaciones reales*” del tema objeto de trabajo. Es frecuente, especialmente en temas vinculados al suelo, que sea “*banalizada*” su intervención y su uso debido que las consecuencias, se analizan también con otras “circunstancias” a las cuales responsabilizar (el clima, la economía, las plagas, etc), y en ocasiones, algunos profesionales suponen suficiente para decidir manejos e intervenciones en el paisaje “leer” las cartas de suelo, con un sesgo que al ser con frecuencia parcial, se hacen evidentes en las consecuencias en la comunidad y el ambiente en general (Casas y Albarracín, 2015).

La transdisciplina como objetivo profesional_. Puede indicarse que al menos para muchas de las ramas de la Ingeniería Agronómica y Forestal, el objetivo final es analizar los conocimientos de todas las disciplinas que se han estudiado, comprendiéndolas para alcanzar en el ejercicio profesional la **transdisciplina**, aplicada al “objeto problema”. La transdisciplina va mas allá de la interdisciplina, generando un nuevo lenguaje y/o procedimiento creado a partir de la vinculación de algunos de los conocimientos que cada disciplina aporta para un problema determinado. Su finalidad es la comprensión del mundo presente, alcanzando la unidad del conocimiento para el abordaje de una situación dada, problema, sistema productivo, etc.

Si esto se comprende, se comprende que la “receta”, la repetición de procedimientos sólo por ser frecuentes, no son los que conducen a los cambios requeridos para que la degradación,

devastación de tierras, etc, tenga el *lugar que realmente ocupan en el resto de problemas ambientales y del hombre*. Se recomienda la consulta de Casas y Albarracin (2015) para comprender la gravedad de la degradación de tierras y ambientes en la Argentina y a Pla Sentis (2017) en otras regiones del mundo.

Específicamente para la disciplina del presente libro, se propone incorporar una visión dinámica e integral de entendimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera-manejo, promoviendo procedimiento de estudio para prever degradaciones y seleccionar prácticas de manejo sustentables según las condiciones ambientales y socio-económicas de cada región

5.2 Procedimiento de interpretación del suelo en el paisaje

Se puede abordar este punto desde dos perspectivas principales, se dispone de una carta de suelo y se tiene como objetivo entender lo allí consignado (punto 5.2.1), o efectuar estudios a campo de un área, pudiendo estos tener o no información de suelos preexistente (punto 5.2.2).

En punto 5.2.1 se enuncian las variables edáficas a considerar algunas de las cuales se consignan en las descripciones de los perfiles, y otras que pueden inferirse. Asimismo, se plantea incorporar un análisis de paisaje considerando el perfil en estudio, suelos asociados, y otros factores ambientales. En punto 5.2.2 se enuncian las etapas para efectuar estudios de suelo y agua a fin de definir aptitud de uso e intervenciones sustentables del área de estudio.

En la Figura 5.1 se presenta un esquema general de temas que incluyen la Edafología, y que son en definitiva los que en esta instancia deben ser considerados para definir la aptitud de uso y posibilidades de intervención del ambiente.

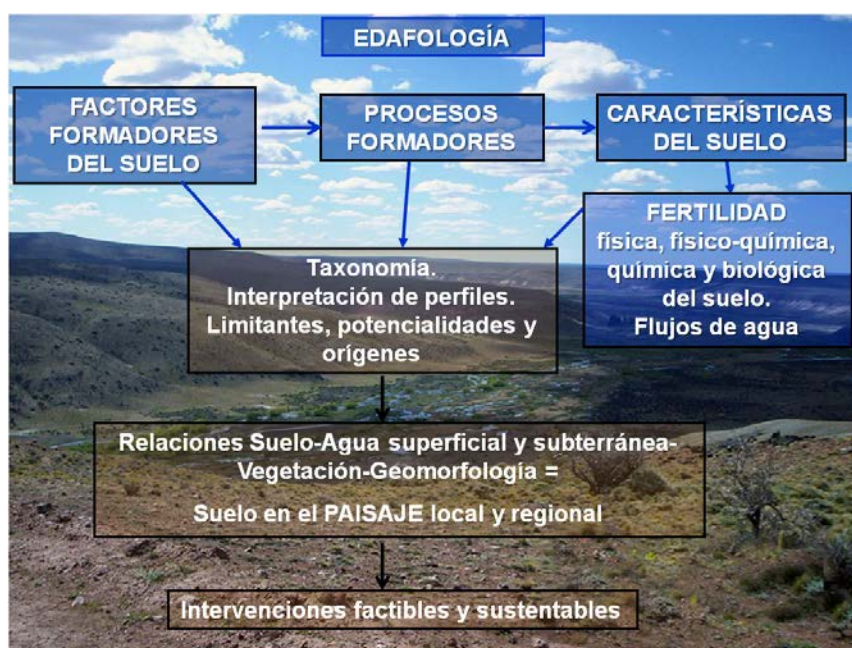


Figura 5.1 Esquema general de temas que se incluyen en el estudio del suelo (Edafología)

5.2.1 Secuencia de análisis del perfil edáfico

Los perfiles edáficos descritos en la cartografía disponible en el país, INTA, Universidades y Ministerios, describen características morfológicas y analíticas que pueden ser analizadas en sus propiedades primarias y derivadas o asociadas (puntos 5.2.1.1 y 5.2.1.2). Asimismo, pueden efectuarse inferencias del funcionamiento del suelo local en el contexto regional (punto 5.2.1.3), y de los riesgos que supone el manejo o intervención del ambiente (punto 5.1.2.5).

Etapas principales en el estudio del perfil_.

- Evaluar propiedades edáficas físicas, físicoquímicas y químicas (propiedades primarias) de todos los horizontes. Las propiedades relativas a la nutrición química sólo hasta la profundidad de desarrollo radicular.
- Asociarlas para inferir propiedades derivadas de estas(propiedades “secundarias”)
- Funcionamiento del suelo local en lo regional (influencia del agua subterránea y de escurrimiento), inferirlo analizando la variación de las propiedades físicoquímicas en el perfil.
- Establecer aptitud de uso de los suelos a partir de sus limitantes y potencialidades, indicando sus orígenes de modo de establecer la factibilidad de intervenciones.

En base al análisis efectuado se busca definir: **manejos sustentables** tendientes a obtener el objetivo de intervención: **productivo, recuperación, puesta en valor o preservación de un ambiente**. En la Figura 5.2 se presentan las principales propiedades a estudiar para definir la fertilidad edáfica.



Figura 5.2 Principales propiedades a estudiar para definir la Fertilidad edáfica

Alcance en la interpretación de un valor individual_. Previo a indicar las variables a considerar es importante recordar el alcance de la interpretación individual de una variable edáfica, y si bien, surge claramente al definir los parámetros de la fertilidad: dotación, abastecimiento y renovación, es pertinente remarcar.

Sobre los métodos de medición, es de destacar que mientras algunos métodos son de uso internacional, otros son utilizados por los laboratorios de cada región con procedimientos ajustados a las condiciones que le son propias (métodos de rutina estandarizados) (SAMLA, 2018; Normas IRAM, en Argentina, Kloster, 2017). En todos los casos, la interpretación de un valor es correcta si es que las condiciones del medio natural o productivo son semejantes a las que se utilizan en el método de análisis. 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 (inadecuada mineralización); 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 como cuando existen interacciones iónicas con deficiencias inducidas. 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. Estos aspectos fueron analizados en parte 1 de esta publicación (Alconada *et al.*, 2018), y en los Capítulos 1 a 4 del presente libro. Asimismo, se amplía en Guía de Interpretación de perfiles del Aula Virtual de Edafología (Alconada, 2017).

5.2.1.1 Propiedades físicas, físicoquímicas, químicas y biológicas del perfil edáfico

Propiedades físicas. En todo el perfil, por horizonte, analizar: *Textura, estructura, color y consistencia.*

Propiedades físicoquímicas. En todo el perfil, por horizonte, analizar: *pH, CE, CIC, Na⁺, Ca⁺², Mg⁺², K⁺*, valores absolutos y relativos (porcentaje de saturación de cada uno de ellos y relaciones entre cationes), porcentaje de saturación con bases e insaturación.

Propiedades químicas. De los horizontes superficiales (zona enraizamiento) propiedades a analizar: *C, N, 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. Otras propiedades químicas no son en general consignadas en los perfiles descriptos en la cartografía, tal como *P, S*, micronutrientes y podrán ser en algunos casos inferidos, tal como se comenta a continuación.

Propiedades biológicas. No se consigna información sobre la biología edáfica, sin embargo, esta se vincula al contenido de materia orgánica, relación C/N, y condiciones drenaje, por lo cual, en primer instancia se deben evaluar los valores absolutos y a partir de estos, inferir condiciones asociadas, principalmente de aquellos elementos vinculados muy estrechamente a la dinámica de materia orgánica y al drenaje, tal como micronutrientes y S.

Debe interpretarse cada variable enunciada en forma individual en base al procedimiento de análisis (método). En todos los casos, establecer según corresponda, potencialidad o limitante que representa la variable analizada, y origen (considerar factores originales del suelo). Las tablas de interpretación puede consultarse en Guía de Interpretación de perfiles (Alconada,

2017, en Aula Virtual de FCyFs). Asimismo, se presentan criterios de interpretación en cada uno de los temas abordados en parte 1 de este libro (Alconada *et al.*, 2018), en el presente libro Capítulos 2 y 3, y en cada una de las Guías de Trabajos Prácticos (Aula Virtual, Edafología). Cabe destacar que los criterios de interpretación de variables edáficas son de fácil consulta en un gran número de publicaciones, indicándose algunas fuentes en punto 5.1.2.4.

5.2.1.2 Propiedades asociadas a las propiedades principales, y 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 prever el *movimiento de agua y aire* del perfil (Capítulo 4). 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. Asimismo, como se comentó, a partir de la materia orgánica, relaciones C/N, drenaje, puede inferirse la *actividad biológica y nutrientes* no consignados pero que se relacionan con la dinámica de la materia orgánica. Asimismo, deben considerarse los materiales originales de los suelos y los constituyentes minerales que los caracterizan (Lanfranco *et al.*, 2014).

Respecto a degradaciones deben considerarse_. i) **Degradaciones físicas** tales como *encostramientos, compactaciones, y pérdida de estructura*. ii) **Degradaciones físicoquímica**, que incluyen *salinización, alcalinización, acidificación, degradación de la estructura y posibles pérdidas de suelo por erosión hídrica, eólica, desertificación*. iii) **Degradaciones químicas**, se asocian a *interacciones iónicas que puedan favorecer deficiencias inducidas y pérdida de materia orgánica*, y constituirse también en iv) **Degradaciones biológicas**. Respecto a esta última, muchas condiciones del medio pueden también generarlas (ejemplo CE, pH, agroquímicos, manejo, etc). En Figura 5.3 se presenta un esquema general de degradaciones, las cuales fueron también comentadas en parte 1 de esta publicación (Alconada *et al.*, 2018), tal como se aprecia todas se encuentran vinculadas, y en general no sucede ninguna de ellas en forma aislada.

Los valores de referencia y forma de estimar lo aquí consignado pueden consultarse en iguales fuentes que las comentadas en punto anterior.

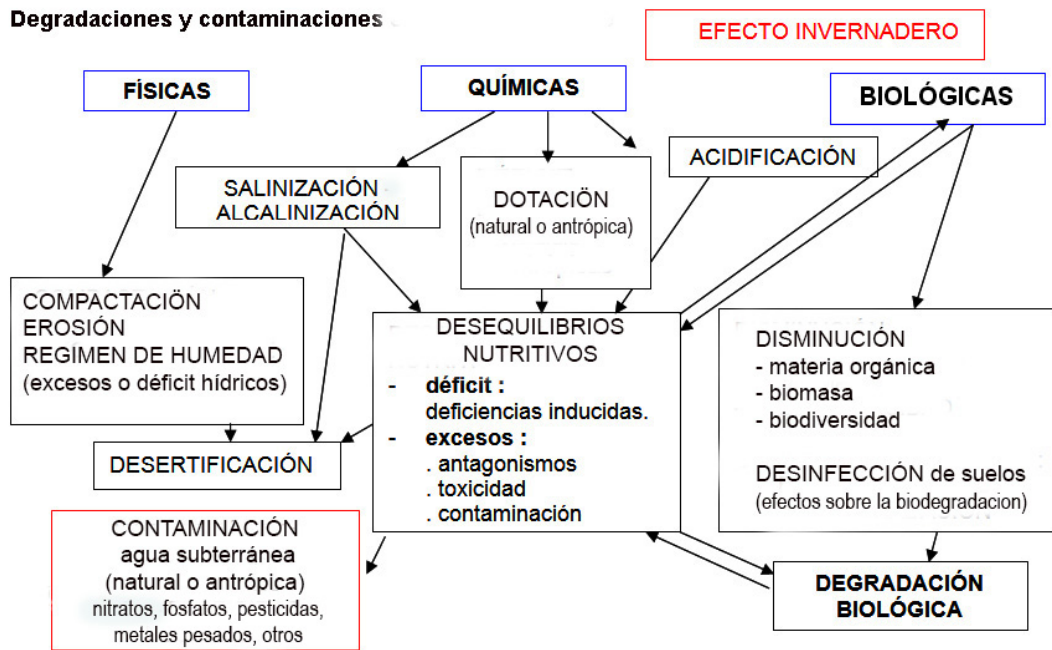


Figura 5.3 Esquema general de degradaciones

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

Este tema ha sido desarrollado en punto 3.6.3 de la presente publicación. En las Figuras 3.6 y 3.7 se presentaron los esquemas adaptados de Toth (2000) respecto al funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea.

Asimismo, en punto 3.10 de esta publicación, se presentaron ejemplos en el noroeste bonaerense de secuencias de suelos, flujos y zonas (Figura 3.15 y 3.17). En este punto, se presenta **otro ejemplo de secuencia de suelos** en el límite de la región **Pampa Deprimida** y la **Pampa Ondulada**, con clima templado húmedo, 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, tal como aquí se analiza (Figura 5.4). Esta secuencia amplia y explica con mayor detalle la presentada en parte 1 de esta publicación en la Figura 1.7 (Alconada *et al*, 2018).

Si se analiza en forma aislada el suelo, tal como se esquematiza en el extremo superior derecho de la Figura 5.4, se describe un suelo **Argialbol** y se observa el agua freática próxima a la superficie. Si no se conoce su composición o no se infiere por las propiedades edáficas, las interpretaciones que se efectúen pueden ser incorrectas o al menos incompletas. Este suelo presenta características de zona de descarga de flujos de agua subterránea, donde el flujo es ascendente, y se complementa en su funcionamiento hidrológico con su zona de recarga. A fin de inferir como se vincula este suelo con otros suelos y con la hidrología local y regional, se requiere analizar como se *distribuyen los suelos*, que *posiciones* ocupan en el paisaje local (posiciones topográficas), y en el paisaje regional, tal como se esquematiza en el cuerpo principal de la Figura 5.4. Tres de los suelos de la Figura 5.4, presentan régimen ácuico (rasgos

hidromórficos) con drenaje *imperfecto* (**Argiacuol**), pobre (**Argialbol**) y *muy pobremente drenado* (**Natracualf**).

Respecto al **Argialbol**, la presencia del horizonte E se debe a la fluctuación de una superficie freática y/o agua de escurrimiento sobre un horizonte Bt. Este último origen es el que frecuentemente la bibliografía señala, y son comúnmente conocidos en la región como “bajos dulces”. Sin embargo, en este ejemplo el **Argialbol** presenta en profundidad un ligero aumento de sodicidad (PSI 5,9%, Serie Los Hornos). Consecuentemente, no podría asociarse su composición sólo al agua de escurrimiento, siendo además, elevado el tiempo en que el agua permanece en el sitio, si es que esta respondiese sólo a las lluvias locales. A priori este suelo podría indicarse que se corresponde con una zona de **descarga de flujo local**, que podría coexistir **con otro flujo más profundo de mayor alcalinidad**. Cabe recordar que el suelo es estudiado normalmente hasta 1,5-2 m de profundidad, y consecuentemente puede corresponderse hasta la profundidad de estudio a un tipo de flujo y zona, pero más profundamente pueden circular otros flujos (punto 3.6.3). Esto es coherente con el comportamiento regional donde se reconocen también suelos **Natracualf** desarrollados sobre un mismo material sedimentario. Es factible entonces, indicar que existe continuidad hidráulica entre sitios de esta región.

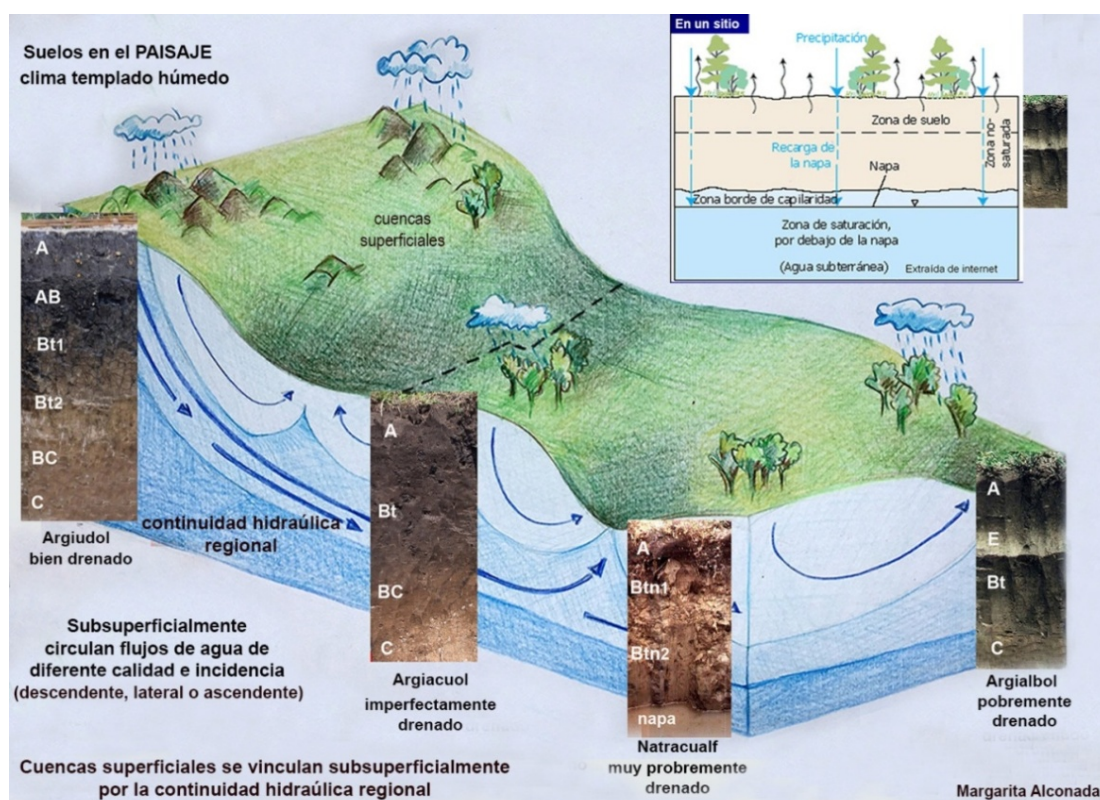


Figura 5.4 Secuencia de suelos originados de loess, en clima templado húmedo, con zonas y flujos de agua subterránea de variado origen

El suelo **Natracualf** se forma por la incidencia de flujos de agua subterráneos de largo recorrido muy alcalinos, manifestándose en el suelo con rasgos característicos de ambiente hidrohalmórficos tal como la *estructura columnar* (Figura 3.2), vegetación de *Distichlis sp* “pelo de chanco”, superficie freática con color oscuro por la presencia de materia orgánica dispersa (*humatos sódicos*), régimen de humedad *ácuico*, en ambientes con muy baja pendiente. Son conocidos en la región pampeana como “bajos alcalinos”. Estos suelos se corresponderían con *zonas de descarga de flujos intermedios o regionales*.

Respecto al suelo **Argiudol** presentado en esta secuencia, podría corresponderse con una zona de recarga, el flujo es descendente libre de sales y álcali, y ser el **Argialbol** la descarga de igual flujo. No obstante lo comentado, cabe destacar que lo indicado es muy general, dado que sólo se están efectuando inferencias con la denominación del nombre a nivel de Gran Grupo. Si se indicase a nivel de Subgrupo, por ejemplo *Argiudol ácuico*, *podría indicarse que este suelo se desarrolló en una zona de tránsito de flujos locales hasta intermedios*, dependiendo de la calidad del agua. Sobre el **Argiacuol** de la secuencia de la Figura 5.4, también podrían indicarse iguales consideraciones (zonas de tránsito). En todos los casos, se requiere **conocer la composición del agua o inferirla por la composición aniónica y catiónica del suelo a fin de prever el funcionamiento hidrológico**.

Se aprecia entonces, en este esquema general (Figura 5.4), que si bien la denominación del suelo permite indicar tendencias de funcionamiento, no es suficiente en todos los casos debido a que pueden incidir otros flujos que no quedan reflejados en el nombre con el cual se lo clasifica, y esto modificaría la interpretación y consecuentemente las decisiones en el manejo.

Procedimiento de análisis para inferir la existencia de flujos más profundos_.

Debido a la profundidad hasta la cual se estudia el suelo, y los parámetros que normalmente se utilizan para caracterizar los suelos en las clasificaciones taxonómicas y utilitarias disponibles, pasan desapercibidas algunas circunstancias que permiten inferir el funcionamiento del sistema.

A continuación se indican algunas características a considerar:

i) Analizar la **evolución de propiedades físicoquímicas en profundidad** (aumento de pH, hidromorfismo, Na⁺, PSI, e incluso Mg (punto 3.10), aún cuando se indique que la superficie freática se ubica profunda (la descripción es para el momento de observación), y los cambios en las variables consideradas son ligeros, debe considerarse que dichos cambios pueden deberse a una superficie freática que asciende en otras circunstancias climáticas locales o regionales (incluso mezcla con otros flujos).

ii) Analizar los **suelos asociados o fases**, que normalmente se consignan en las descripciones de los suelos en las cartas de suelo. Por ejemplo, se indica suelo *Hapludol éntico Serie Norumbega* ubicado en una posición de loma, aptitud agrícola, en paisaje de cordones medanosos de la Pampa Arenosa, estando asociado a la Serie Lincoln *Hapludol típico*, Serie Olascoaga *Argiabol argiácuico*, Serie Vedia *Natracualf típico*, Serie Morse *Natrabol típico*, y Serie 9 de Julio *Hapludol tapto nátrico* (GeoINTA, 2018). Asimismo, se indica sobre la Serie Norumbega que no tiene problemas de anegamientos y la superficie freática

tica es profunda. Sin embargo, se reconoce la existencia de fases por anegabilidad y en profundidad se observa un incremento de Na^+ (PSI 4,7 a 25 cm de profundidad). Estos suelos se ubican en el ambiente comentado en punto 3.6.3, en las Figuras 3.15, 3.17) desarrollados en materiales de diferente origen (discontinuidad litológica, Fm Médano Invasor sobre Fm Pampeana), reconociéndose las unidades geomorfológicas de *Médanos*, *Mantos*, *Mantos someros*, y *Depresiones intermedanosas* según el espesor del depósito de la Fm Médano Invasor, que define la distancia a la superficie freática que se encuentra a escasa profundidad en toda la Pampa Arenosa (Dillon *et al.*, 1985). Estas unidades geomorfológicas se encuentran ubicadas unas de otras a cortas distancias. En la Figura 1.1 de la primer parte de este libro (Alconada *et al.*, 2018) se presentó el desarrollo diferencial de un cultivo de trigo debido al espesor de la Fm Medano Invasor. Se aprecia con este ejemplo, la **insuficiencia del análisis del suelo individual para definir prácticas de manejo**.

Se recomienda, analizar el **patrón de distribución de suelos**, en las propias *cartas de suelo* (unidades cartográficas, suelos que las integran), y principalmente en *imágenes satelitales*, preferentemente efectuando análisis temporales donde se aprecie la evolución de las coberturas hídricas y vegetación. En la Figura 5.5 se presenta el mapa de suelos realizado para el departamento de Gral San Martín, Chaco (Ledesma y Zurita, 1988), que fue digitalizado y superpuesto sobre una imagen satelital (IICA-PROSAP, 2013). Se aprecia un intrincado patrón de distribución de suelos que alternan con amplios sectores de esteros. En el albardón del río Oro se identifican los suelos **Hapludol típico y Haplustol típico** (Ledesma y Díaz Zurita, 1988), y por **aptitud de uso** (criterio USDA por clases y subclases de uso I a IV agrícolas/ganaderas, VI a VIII ganaderas), se clasifican como **IIw a IIIw y IVws a VIws** respectivamente. Esta diferencia de clasificación utilitaria se debe a la *elevada alcalinidad* del suelo clasificado como *Haplustol típico*. Sobre este último suelo, cabe destacar que es difícil de concebir un régimen hídrico *ústico* dado que el contenido de Na^+ provendría del hidrohalmorfismo generado por la presencia de una superficie freática alcalina, por lo cual el régimen hídrico del suelo se correspondería entonces con un régimen ácuico. Asimismo, se reconocen próximos a estos, otros suelos con problemas de hidrohalmorfismo en grado variado, hasta amplios sectores con **Natracuol típico**. Toda la región presenta agua freática próxima a la superficie, variando con las condiciones climáticas locales y regionales, entre aproximadamente 1 y 5 m, siendo en general de elevada alcalinidad.

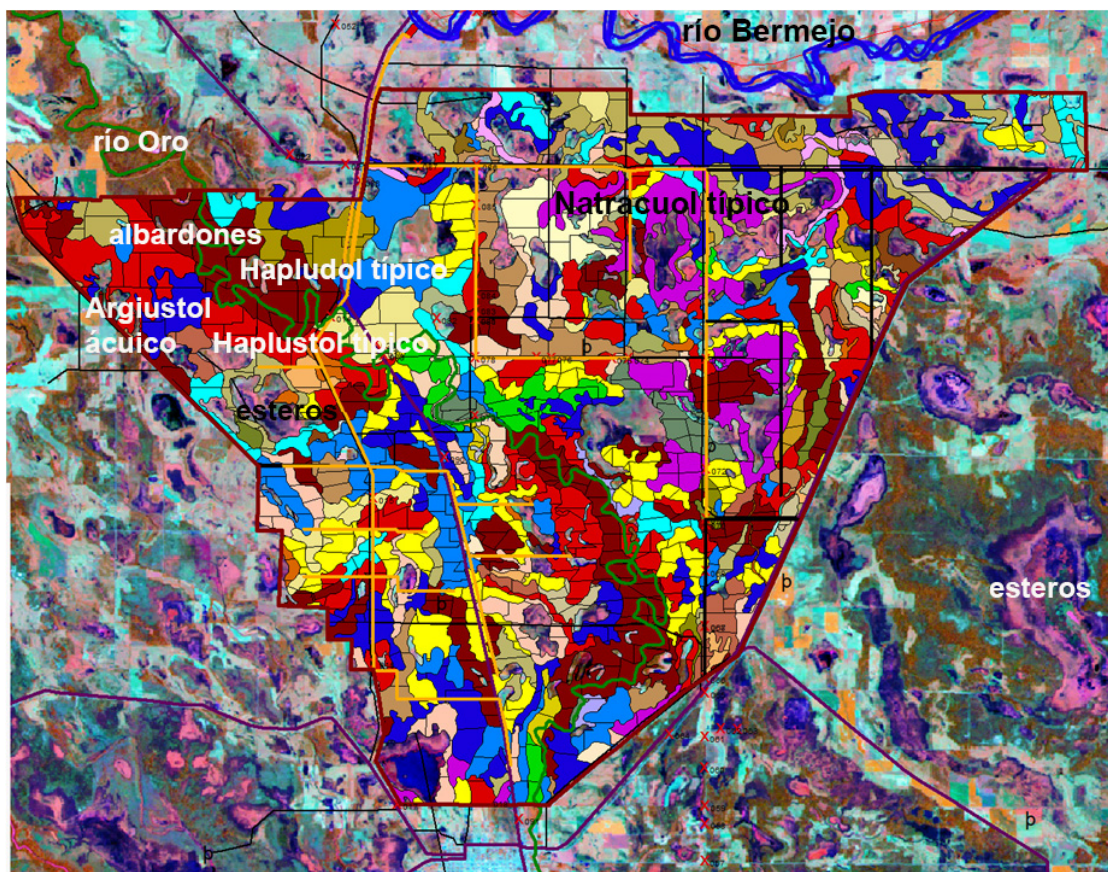


Figura 5.5 Mapa de suelos realizado para el departamento de Gral San Martín, Chaco (Ledesma y Zurita, 1988), digitalizado y superpuesto sobre una imagen satelital (IICA-PROSAP, 2013).

Este es un claro ejemplo de la influencia diferencial de los flujos de agua dependiendo del espesor de los *materiales que sobreyacen a superficies freáticas regionales*. Sobre este sitio también se comentó en el punto 3.6.2 (salinización por agua subterránea) y en punto 1.4.2. en la parte 1 del presente libro, y en Figura 1.14 y 1.15 (Alconada *et al.*, 2018) se presentó el efecto del desmonte e incorporación de la agricultura en los suelos del albardón.

iii) **Analizar la calidad de agua superficial y subterránea**, si existiese acceso a las superficies freáticas, efectuando mediciones de cationes, aniones, pH, temperatura y salinidad (CE) (Figura 3.7). Sin embargo, puede utilizarse información preexistente de otras manifestaciones: pozos, molinos, lagunas, y ríos (considerar que estos pueden ser influentes o efluentes), y junto con la distribución de suelo, patrones, geomorfología local y regional, inferir el funcionamiento hidrológico. Cabe destacar que el conocimiento de pH, CE, RAS, temperatura del agua, resultan en general una adecuada información para establecer tendencias.

Alcance de los nombres taxonómicos e interpretaciones_.

Por último respecto a los aspectos a considerar al interpretar un suelo, es en relación al nombre a nivel de Gran Grupo. Este se asigna debido a que responde a las exigencias de la taxonomía para pertenecer a dicha categoría o denominación. Sin embargo, dos puntos principales pueden indicarse:

i) *No todas las condiciones estan contempladas* (taxonomía ha sido realizada en USA y aún con adaptaciones argentinas, no todo queda considerado). En el ejemplo presentado en la Figura 5.5, para el partido de Gral San Martin en Chaco, no queda reflejado en el nombre del suelo, *Haplustol típico*, la limitante más importante del suelo que es el hidromorfismo.

ii) Como se comentó, *la descripción de un perfil es una “fotografía” de un momento*, debiendo considerarse la posible historia y origen de las propiedades que se describen. Así por ejemplo, la **Serie Ayacucho** (GeoINTA, 2018), ubicada en Pampa Deprimida, se indica que tiene aptitud agrícola-ganadera, ubicada en posición de lomas bajas o tendidos altos, y pertenece al Subgrupo **Natrudol típico** (Soil Taxonomy, 2010), habiéndose así modificado el nombre asignado en 1975 de **Natracuol típico**. En este suelo se describe la siguiente secuencia: **A – En – Btcn- Btnz – 2BCKnz – 2Ckn**, y se consigna que es salino, alcalino, y con elevado hidromorfismo. Esto se confirma en un amplio número de variables, destacándose: *formación del horizonte E a 24 cm con pH 8, y PSI 12, que aumenta a más de 9 de pH y 62 de PSI y la formación de un Btcn con estructura columnar*. Consecuentemente, calificar al suelo como de régimen údico, es porque *no se ha considerado el origen* de las propiedades (sales, alcalinidad, hidromorfismo) como así tampoco, el entorno, suelos asociados y fases. Muy posiblemente, al decidir cambiar el nombre se debió a algún cambio temporal en los suelos, sin embargo, las variaciones de la superficie freática es característico de estos suelos, e incluso podría darse la coexistencia de flujos de agua subterránea de diferente origen. En base a las características de este suelo, se corresponde con **zonas de descarga de flujos de largo recorrido** (punto 3.6.3).

5.1.2.4 Valores de referencia de propiedades edáficas primarias y asociadas

Como se indicó en punto anterior, los valores de referencia para interpretar las variables edáficas conforme al método de análisis o evaluación, pueden consultarse en Guía de Interpretación de perfiles (Alconada, 2017). Asimismo, en el desarrollo de cada tema de la primer parte del presente libro (Alconada *et al.*, 2018) se presentan criterios de interpretación, así como en los capítulos 2 y 3 de esta publicación. Adicionalmente, se comenta en puntos siguientes las fuentes originales de algunas de las variables y otras fuentes de carácter internacional.

Propiedades físicas primarias y asociadas:

Textura, se recomienda en Darronsoro (2018), pudiendo consultarse una bibliografía muy amplia Conti (2007), Porta *et al.*, (1994), FAO (2018).

CRAD, Capacidad de retención de agua disponible (Porta *et al.*, 1994), calculada a partir de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) (Lanfranco *et al.*, 2014), Si no se dispone de datos medidos en laboratorio puede estimarse a partir de las texturas la retención de agua en ambos puntos (De Boodt y Leenheer, 1954; Castañón Lion, 1991; Velasco Molina, 1983; Darwich, 2006, FAO, 2018).

Índice de encostramiento, propuesta de FAO en Bienes *et al.* (1994).

Permeabilidad e infiltración, técnica del doble anillo, ajustada por ecuación de Kostiakov (Fernández *et al.*, 1971). Puede estimarse a partir de la textura, estructura, propiedades físico-químicas (Etchevehere, 1976; Porta *et al.*, 1994, Schoeneberger *et al.*, 2000).

Densidad aparente y densidad real, Hillel (1980); Porta *et al.* (1994).

Porosidad total y de aireación, Page *et al.* (1982); Flores Delgadillo y Alcalá Martínez (2010), FAO (2018)

pH, Salinidad y Alcalinidad, Porta *et al.* (1994), Bohn *et al.* (2003), Pla Sentis (2014, 2017).

Propiedades químicas:

Gaucher (1971), Velasco Molina, (1983), Bertsch (1987), Dominguez Vivancos (1989), Porta *et al.*, (1994); Bohn *et al.* (2003), Darwich (2006), Cadahia López (2005), IPNI (2018).

Las **correcciones en nutrientes** pueden efectuarse considerando **tres criterios principales**:

- i- *Criterio de Aportación-Extracción* (Ciampitti y García, 2007, 2009).
- ii- *Criterio de Suficiencia*: materia orgánica, nitrógeno, cationes intercambiables, fósforo (según método y/o región, Guías TP Edafología en Aula virtual).
- iii- *Relación entre Cationes* para abastecimiento, y dotación (Alconada *et al.*, 2018). 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 el material escrito del curso de Edafología, comentado precedentemente (Guía Interpretación de perfiles), y en cada una de las guías de trabajos prácticos puede consultarse estos temas (Aula virtual Edafología).

Por último, cabe indicar que estas variables edáficas y otras adicionales, con diferentes criterios han sido seleccionadas para elaborar **Índices de Calidad de suelo** (punto 1.4 de parte 1 de esta publicación, Alconada *et al.*, 2018) según diferentes criterios, regiones o sistemas productivos. Wilson (2017) presenta una revisión de los avances en el desarrollo de los indicadores de calidad de suelo para las diferentes ecorregiones del país.

5.1.2.5 Origen de limitantes y potencialidades

Si bien las limitantes que un suelo presenta pueden ser diversas dependiendo no sólo del propio suelo, sino también de la actividad que se planifique realizar, y muchas de ellas han sido comentadas en el presente libro y la primer parte de este, a modo de síntesis se presenta en la Figura 5.6 con ejemplos, las propiedades que se consideran principales para la mayoría de los cultivos comunes y especies arbóreas de uso comercial.



Figura 5.6 Ejemplos de limitantes en suelos

Luego de haber analizado las condiciones de **dotación** hasta la profundidad donde las raíces principalmente desarrollan (por ejemplo, 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, zonas y flujos de agua posibles, u otros procesos o características destacables, conforme se indicó en puntos anteriores, se requiere conocer el **origen** de las propiedades observadas e interpretadas a fin de establecer pertinencia y posibles intervenciones. Asimismo, las **limitantes** deben ser ordenadas por su importancia en la productividad de los cultivos principales u objeto de estudio (otros cultivos, forestación, pasturas, etc), así como las **potencialidades** que debería ser de especial interés preservar (sistemas sustentables).

i) Para cada una de las **limitantes** que se identifican debe analizarse **su origen** tomando de base los *factores formadores de dicho suelo*: material original, clima, relieve (flujos de agua), biota y tiempo. Este último y el material original, puede establecerse considerando la historia geológica del sitio (descrito en mapas de suelo (SAGyP – INTA, 1989, 1990) y otra información disponible tal como las cartas geológicas (SEGEMAR, 2018), y un gran número de estudios científicos vinculados no sólo a la geología, sino también a los factores formadores del paisaje en general y el suelo en particular.

Por ejemplo, para la Región Pampeana, se presentaron precedentemente diversos ejemplos. Si bien el loess es el material original que prevalece (Formación Pampeana), en algunos sectores otros materiales se mezclan con estos y/o se presentan otros materiales en discontinuidad litológica, tal como se comentó para la Pampa Arenosa con la Fm Medano Invasor. Asimismo, entre otros ejemplos puede indicarse que en la Pampa Deprimida, si bien también prevalece el loess en algu-

nos sectores aparecen en discontinuidad litológica otros materiales pospampeanos tal como se presentan en las localidades de Pila, Chascomus, etc que dan origen suelos conocidos como “tapto”, (SAGyP – INTA, 1989). Asimismo, es importante conocer la historia climática de un sitio, ocurrencia de excesos, déficit, evolución de cuerpos de agua superficial, y otra información que permita prever el funcionamiento global.

ii) Establecer que *propiedades limitantes son factibles de intervenir* en términos técnicos, económicos y sociales.

Por ejemplo, en ambientes sujetos a excesos y déficit hídricos recurrentes, plantear la factibilidad de implantación de especies vegetales o arbóreas que coadjuven con dichos excesos-déficit hídricos (técnica del Biodrenaje, Heuperman, 2003, Alconada *et al.*, 2009), o la implementación de sistemas agrohidrológicos u otras prácticas agropecuarias y forestales (Bellati *et al.*, 1978; Baragallo, 1988; UNLP, 2001; Damiano, 2014).

iii) Establecer las *potencialidades* para la producción de un cultivo, pastura u objetivo de estudio, estableciendo la **aptitud de uso sustentable**.

Por ejemplo, si el suelo hasta la profundidad de estudio presenta aptitud agrícola, pero se ubica en ambientes en el cual el riego no localizado podría afectar su aptitud actual, tal como se comentó para los ambientes de albardón en la provincia de Chaco, donde el desmonte y agricultura con riego no ajustado a las condiciones del ambiente, condujo a la degradación de los suelos por ascenso de freáticas alcalinas.

iv) Establecer **riesgos de degradaciones** (Figura 5.3) considerando propiedades principales y asociadas, y como estas podrían modificarse conforme a las limitantes e intervenciones que no las consideren. Puede incluirse en este análisis el uso de indicadores de *calidad de suelo* (Wilson, 2017).

v) Establecer en base a lo indicado en puntos anteriores, las **principales acciones** a realizar a fin de preservar y/o mejorar las condiciones descriptas en el suelo estudiado.

5.2.2 Etapas de estudio del paisaje para definir aptitud de uso e intervenciones

Como se comentó al inicio del punto 5.2 sino se dispone de información de suelos cartografiada o se pretende aumentar el detalle de la existente, en este punto se indica en forma general, una enunciación de etapas para efectuar estudios de suelo y agua a fin de definir aptitud de uso e intervenciones sustentables del área de estudio.

Pueden señalarse las siguientes etapas: i) Identificar las unidades geomorfológicas (ambientes). ii) Definir sitios de estudio a campo, suelo y agua. iii) Caracterizar tipo de suelos, propiedades principales. iv) Agua, inferir funcionamiento del paisaje: sistemas de flujo, calidad del agua freática, y otras manifestaciones (cuerpos de agua superficiales, pozos, molinos). v) Establecer limitantes, potencialidades, y sus orígenes.

i) Identificar las unidades geomorfológicas, ambientes

Imágenes satelitales_. Mediante imágenes satelitales de alta resolución pueden definirse unidades geomorfológicas o más precisamente fisiográficas. Estas imágenes pueden obtenerse de internet, Google y diferentes servidores, muchos de los cuales las proveen en forma gratuita. Estas imágenes pueden ser procesadas por diferentes técnicas geomáticas a fin de resaltar el objeto de estudio. Este tipo de estudio debe realizarse con el apoyo de especialistas en el manejo de imágenes. Pueden realizarse estudios temporo-espaciales a fin de analizar la evolución de las cubiertas hídricas, vegetación, etc. estableciendo relaciones con el clima local y regional. La intensidad de estudio y procesamiento que se efectúe depende del objetivo.

Pueden realizarse en las imágenes diferentes análisis y procesos, elaborar anáglifos, superponer curvas de nivel, modelos de elevación digital, etc. y posteriormente relacionarlo con otras cartografías disponibles georreferenciadas para elaborar por ejemplo un Sistema de Información Geográfica (SIG). Es recomendable a fin de definir sectores de estudio de suelos, imprimir el sector a estudiar y efectuar la *fotolectura de imágenes ampliadas*.

A continuación se indican algunas de las direcciones donde puede descargarse en forma gratuita imágenes satelitales de diferentes satélites, software, etc (información suministrada por Facundo Carricaburu):

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>;

<https://search.earthdata.nasa.gov/search>;

<http://www.landcover.org/index.shtml>;

<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>;

<https://search.remotepixel.ca/#3/40/-70.5>;

https://bitbucket.org/sas_team/sas.planet.bin/downloads/;

<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

Fotografías Aéreas_. Hasta la difusión de las imágenes satelitales se utilizó como material de estudio para definir las unidades geomorfológicas a las fotografías aéreas, utilizando pares fotográficos para la observación del relieve (estereoscopia). Este procedimiento fue utilizado para realizar la cartografía de suelos del INTA (escala 1:50.000) en el marco del proyecto Plan Mapa de Suelos de la Región Pampeana iniciado en la década del 60 por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Actualmente pueden consultarse en GeoINTA (2018) de la provincia de Buenos Aires, y en versión papel en la Biblioteca Central del INTA (Chile, 460, CABA).

Para muchos sitios del país es posible acceder a imágenes satelitales, fotografías aéreas y otros materiales cartográficos, a diferentes escalas, del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.gob.ar>), y otras instituciones provinciales. Así por ejemplo, en la provincia de Buenos Aires, en la dirección de Geodesia, del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos, se dispone de fotos 1:20.000 que son de gran utilidad por ser previas a la década del 90 donde las imágenes satelitales eran en general de uso reservado y alto costo.

ii) Definir sitios de estudio a campo, suelo y agua

Debe considerarse el objetivo de estudio, por ejemplo, *¿Qué se necesita identificar?: Pendiente, drenaje, profundidad de la tosca, altura de la napa, calidad del agua, nivel de materia orgánica, salinidad y su origen, distribución de suelos.....?*

En todos los casos, lo obtenido en punto i) resulta el material de referencia y base, la intensidad de sitios que se seleccionen dependerá de la escala de trabajo, tipo de estudio, heterogeneidad del ambiente, recursos económicos, información preexistente (cartografía disponible y otras investigaciones), etc. Los estudios pueden involucrar grandes extensiones, estudios regionales, zonales, o ser locales hasta nivel de lote. **En todos los casos el procedimiento es igual**, las secuencias lógicas de análisis son siempre las mismas dado que el suelo nunca funciona en forma individual. Lo que varía es la intensidad con que se estudie el objeto de interés y etapas que se incluyen dentro del proceso de diagnóstico de la fertilidad edáfica, así como, las intervenciones a proponer.

iii) Definir tipo de suelos, propiedades principales

Efectuando estudios a campo en los sitios seleccionados, calicatas y pozos de observación, definir propiedades morfológicas y analíticas (Etchevehere, 1976; Schoeneberger et al., 2000), clasificarlos taxonómicamente y por aptitud de uso.

iv) Agua, inferir funcionamiento del paisaje: sistemas de flujo, calidad del agua freática, y otras manifestaciones (cuerpos de agua superficiales, pozos, molinos).

Siguiendo los criterios planteados en punto 3.6.3, y estableciendo las relaciones suelo-agua-vegetación-geomorfología comentadas previamente con ejemplos. La información preexistente tiene gran utilidad en este punto tal como, estudios previos de suelos, de aguas realizados para diferentes fines pero que permiten conocer las calidades que prevalecen, geológicos, vegetación, experiencias de manejo, distribución de rutas y caminos que interfieran en las pendientes generales, canales artificiales, obras en general, etc.

v) Establecer limitantes y potencialidades, orígenes a fin de definir manejos sustentables.

Este punto, y los dos anteriores, se analizan conforme se proponen en punto 5.2.1.

Ejemplo de aplicación del criterio de estudio del paisaje propuesto en una plantación forestal con silvopastoreo_.

En este estudio se buscó definir las condiciones de suelo en el área de estudio y como se vinculan con otros elementos del paisaje, agua superficial y subterránea, relieve, posición topográfica y estos, con la productividad de la vegetación herbácea y arbustiva de *Eucalytus globulus* spp *globulus* en silvopastoreo.

A continuación se presentan los mapas que fueron elaborados a fin de arribar al objetivo planteado, y se indican sólo algunas conclusiones principales, dado que sólo se busca ejemplificar el procedimiento de trabajo (Mapas extraídos de Alconada y Carricaburu, 2018, en prensa, en el marco del Proyecto Producción Ganadera y Forestal: Modelos de Integración Económico Ambiental Convenio INIA.FPTA.UDELAR, 2014-2016. Coordinación A. Bussoni (Universidad Nacional de La República, Uruguay).

En la Figura 5.7 se presenta a la izquierda una imagen satelital Google con los puntos de las parcelas de estudio (plantaciones forestales) en esta puede apreciarse la forma en que se distribuyen dichas parcelas en el paisaje general (fototelecturas de esta y otras fechas, principalmente previas a la plantación, no presentadas), y en la imagen derecha, la superposición sobre

imagen satelital de un mapa de suelo preexistente donde se definieron 4 unidades de suelo principales.

En la Figura 5.8, en el mapa de la izquierda se presenta el *Mapa de índice verde* (NDVI) resolución espacial 10 m, y en el de la derecha el *Mapa de curvas de nivel* equidistancia 5 m (las curvas se superponen a una imagen de mediana resolución). En el *Mapa de índice verde*, se muestra la diferente actividad fotosintética de la vegetación herbácea y arbustiva. Se aprecia color **rojo** en zonas de muy escasa cobertura vegetal y/o afloramientos rocosos, caminos internos y donde la erosión no permite el establecimiento de la vegetación. Los tonos **verde claro y amarillo**, pueden estar indicando problemas de sanidad en la cubierta vegetal y/o en la fertilidad edáfica, como así también puede asociarse a estados fenológico avanzados (desde floración a senectud). El color **verde más oscuro**, se asocia con vegetación en crecimiento vigoroso. Estos patrones son confirmados a campo. En el *Mapa de curvas de nivel*, el conjunto de líneas permite detectar claramente aquellas zonas que actúan como vías de escurrimiento, ámbitos más altos y más bajos. Esquemáticamente, las vías de drenaje principales, quedan representadas con **líneas azules**; la divisoria de aguas que cruza por las cotas máximas del predio (115 y 120 metros) se representa en **color rojo**, y tiene dirección NO/SE, los sectores más bajos se ubican a 50 m.



Figura 5.7 Ubicación de parcelas en imagen Google (izquierda), y Unidades cartográficas U1 a U4 de estudio de suelos preexistente sobre imagen satelital

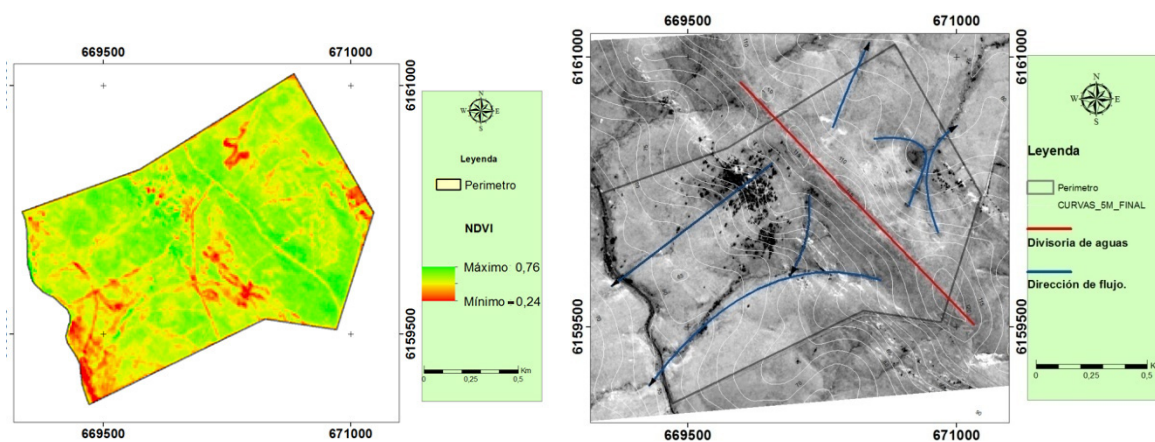


Figura 5.8 Mapa de índice verde (NDVI) resolución espacial 10 m (izquierda) y Mapa de curvas de nivel (derecha) equidistancia 5 m sobre imagen de mediana resolución.

En la Figura 5.9 se presenta el *Modelo numérico de elevación digital*. Este mapa fue elaborado a partir de datos brindados por el satélite Alos, sensor Palsar. Los valores numéricos representan alturas y son expresados mediante colores a fin de lograr una mejor percepción de alturas. La utilización del color, permite mejorar la comprensión de la topografía. A partir de los datos numéricos, operando con herramientas SIG, se obtienen las curvas de nivel. La figura presenta los mismos símbolos, presentados en las otras figuras, la divisoria de aguas en rojo y sobre sus flancos, en azul, las líneas de drenaje.

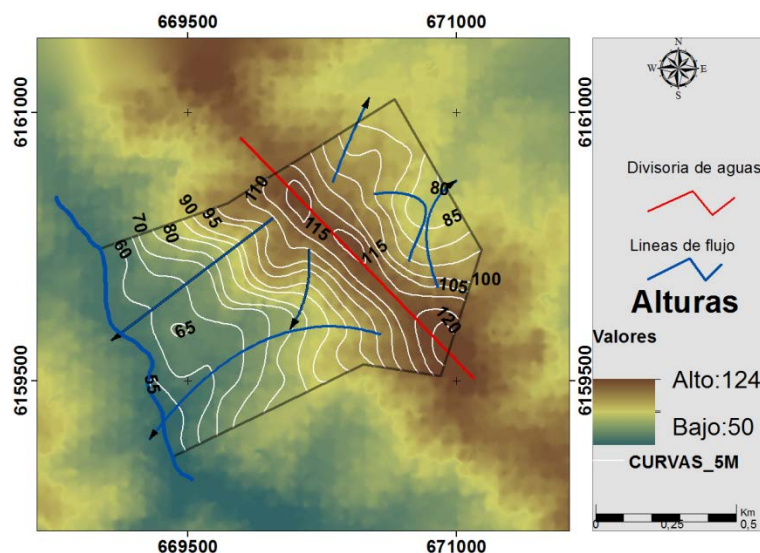


Figura 5.9 Modelo numérico de elevación digital obtenida a partir de datos brindados por el satélite Alos, sensor Palsar, 12.5 m de resolución espacial

En la Figura 5.10, en el mapa de la izquierda se presenta la *Distribución de rodales* (elaborado por Pablo Prieto). El rodal se define como una unidad forestal básica en cuya área se desarrolla un cultivo relativamente homogéneo en términos de edad, composición de especies y condición. Dichos rodales no son necesariamente unidades permanentes de gestión (Forestry Commission, 1991, com pers Pablo Prieto). En el mapa de la derecha de la Figura 5.10 se presenta el **Mapa de suelos** a escala 1/15000 a nivel de Subgrupo agrupando los suelos en 7 grupos principales (Soil Survey Staff, 2014). El mapa de suelos fue generado mediante un *proceso de síntesis de la información* que se obtuvo en las diferentes instancias de recopilación informativa en la zona de estudio: *procesamiento de imágenes satelitales, obtención de fotografías aéreas y otros medios de captura de datos mediante sensores, elaboración de mapas (tal como los presentados), descripciones y muestreos de suelo a campo y su posterior análisis en laboratorio*, generando así un entendimiento general del sistema para la realización del mapa de suelos.

Se destaca que la consideración inicial para su elaboración, son las **descripciones morfológicas y analíticas del suelo en las 31 parcelas estudiadas**, y la **calidad de agua del predio** en diferentes sitios (funcionamiento del agua superficial y subterránea), asociando esto con la superficie del terreno, tonos, texturas de las imágenes procesadas, considerando también, impedancias físicas como afloramientos rocosos.

En la Figura 5.11 se presenta la superposición del mapa de rodales y de suelos de la Figura 5.10.

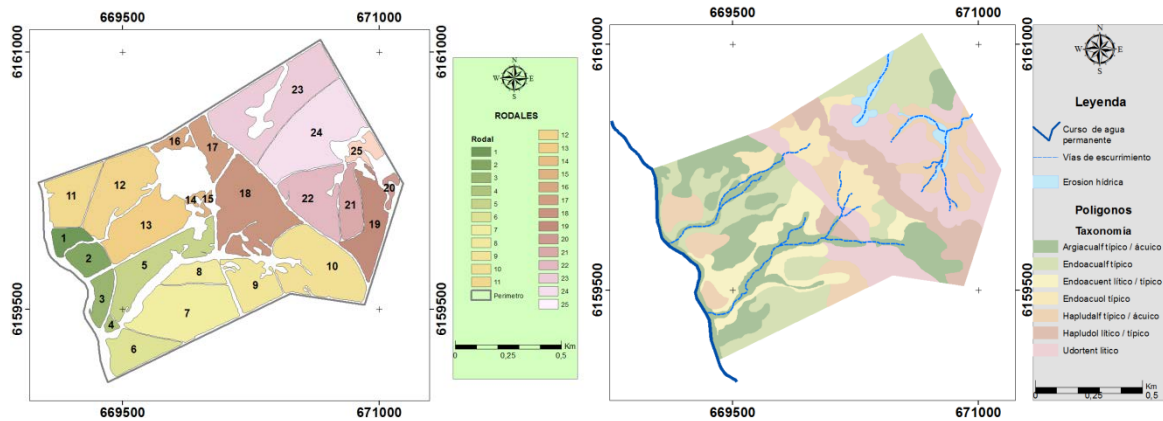


Figura 5.10 Distribución de rodales en establecimiento Doña Sara, escala de publicación 1/15000 (izquierda) y Mapa de suelos (derecha)

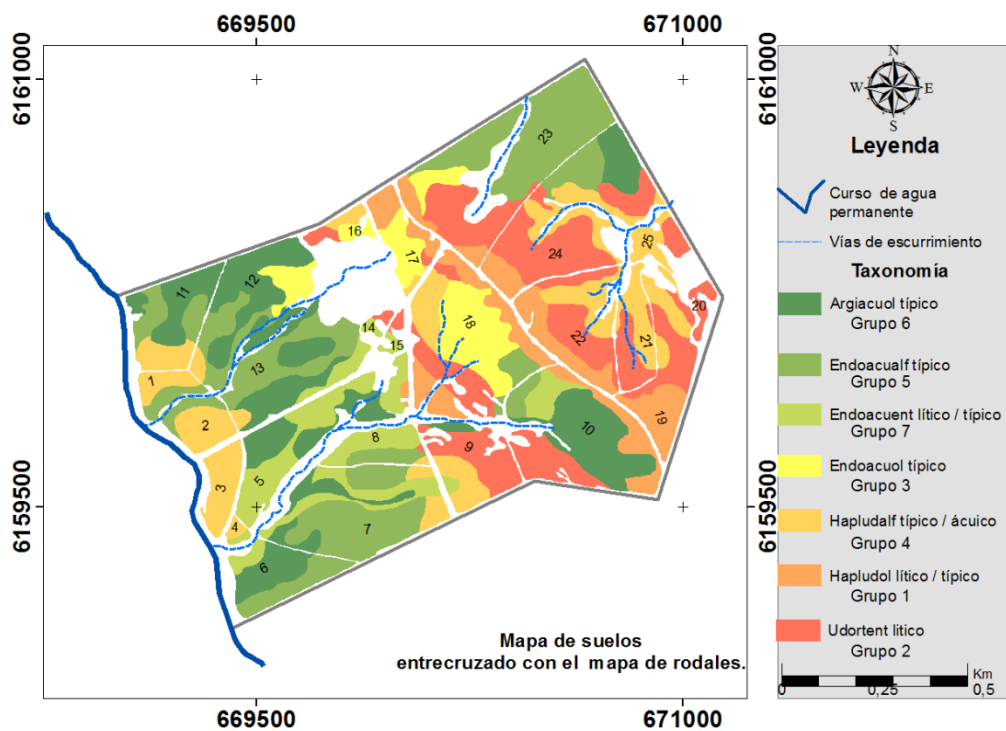


Figura 5.11 Superposición de los mapas de rodales y de suelos de la Figura 5.10

Por ultimo, se presenta la Tabla 5.1 donde se sintetiza a partir de la base de datos generada los tipos de suelo que integran cada uno de los rodales y la superficie que cada uno ocupa dentro de estos. La unidad mínima cartografiada utilizada para la representación de tipos de suelos por rodal, es de 0.1 ha (1000 m²). Superficies menores se fusionaron con los suelos inmediatamente cercanos y de mayor superficie.

Rodal	Taxonomía	Ha	Rodal	Taxonomía	Ha	Rodal	Taxonomía	Ha	Rodal	Taxonomía	Ha
1	Hapludalf típico / ácuico	1,4	8	Udortent lítico	0,1	13	Hapludalf típico / ácuico	0,4	19	Hapludol lítico / típico	3,1
	Endoacualf típico	1,1		Hapludalf típico / ácuico	0,1		Endoacualf típico	5,3		Udortent lítico	0,4
2	Hapludalf típico / ácuico	2,6	9	Endoacualf típico	1,3	14	Argiacualf típico / ácuico	0,4	20	Udortent lítico	2,8
	Endoacualf típico	1		Endoacuent lítico / típico	2,3		Argiacualf típico / ácuico	1,5		Hapludalf típico / ácuico	2,1
3	Hapludalf típico / ácuico	3,1	10	Udortent lítico	3,8	15	Argiacualf típico / ácuico	2,8	21	Udortent lítico	0,8
4	Hapludalf típico / ácuico	0,3		Hapludalf típico / ácuico	2,1		Endoacuent lítico / típico	1,2		Udortent lítico	2,1
	Endoacuent lítico / típico	0,2	11	Argiacualf típico / ácuico	0,4	16	Udortent lítico	0,2	22	Hapludalf típico / ácuico	2,4
5	Hapludol lítico / típico	0,2		Endoacuent lítico / típico	0,3		Endoacuent lítico / típico	0,3		Hapludol lítico / típico	3,1
	Argiacualf típico / ácuico	2	12	Hapludol lítico / típico	2,8	17	Udortent lítico	0,2	23	Udortent lítico	4,2
6	Argiacualf típico / ácuico	2,2		Udortent lítico	3,1		Endoacuent lítico / típico	0,3		Hapludalf típico / ácuico	2,7
	Endoacuent lítico / típico	6,4	13	Endoacualf típico	1	18	Udortent lítico	0,5	24	Hapludol lítico / típico	1,4
7	Endoacualf típico	2,6		Argiacualf típico / ácuico	7,3		Endoacualf típico	0,6		Udortent lítico	4,5
	Argiacualf típico / ácuico	3	14	Endoacuent lítico / típico	1,7		Hapludalf típico / ácuico	0,6	25	Endoacualf típico	1,2
8	Endoacuent lítico / típico	0,8		Hapludalf típico / ácuico	1,8	15	Hapludol lítico / típico	1,8		Endoacualf típico	12,7
	Hapludalf típico / ácuico	1,2	16	Endoacualf típico	1		Udortent lítico	0,1	26	Hapludol lítico / típico	1,4
9	Endoacualf típico	8,6		Endoacualf típico	1,4	16	Endoacualf típico	2,2		Udortent lítico	8,3
	Argiacualf típico / ácuico	0,9	17	Argiacualf típico / ácuico	0,4		Hapludalf típico / ácuico	0,2	27	Hapludalf típico / ácuico	3,5
10	Argiacualf típico / ácuico	1,5		Argiacualf típico / ácuico	3,2		Hapludol lítico / típico	0,8		Endoacualf típico	2,3
	Endoacuent lítico / típico	3,2	18	Endoacualf típico	1,8		Hapludol lítico / típico	0,9	28	Argiacualf típico / ácuico	2,5
11				Hapludalf típico / ácuico	0,5		Hapludol lítico / típico	2,5		Udortent lítico	0,8
			19	Endoacualf típico	2,9		Udortent lítico	3,1	29	Hapludalf típico / ácuico	1,4
12				Argiacualf típico / ácuico	7,1		Endoacualf típico	6,9			
			20				Hapludalf típico / ácuico	2,2			
13							Endoacualf típico	1,3			

Tabla 5.1 Tipos de suelo que integran cada uno de los rodales y la superficie que cada uno ocupa dentro de estos

Respecto a las conclusiones, como se indicó, sólo se destacan algunas de ellas a fin de ejemplificar la utilidad que todo el proceso presentado tuvo para la concreción del objetivo propuesto:

- Son tres las **variables que principalmente inciden en la producción vegetal**: grado de hidromorfismo, altura topográfica regional e incidencia de flujos locales de zonas más altas y/o de flujos de algo mayor recorrido en vías de escurrimientos. El **hidromorfismo** condiciona la vegetación herbácea (tipo y producción), y arbórea (número de árboles, producción de madera), y se vincula con zonas de descargas de flujos de agua. Por el contrario, los **suelos de las zonas de recarga**, aún con muy escaso desarrollo, someros, y elevada acidez, presentaron entre alta a muy alta productividad, generalmente asociado a altos contenidos de materia orgánica y elevada alteración de los materiales originales.

- Se aprecian **efectos locales y regionales** que inciden en la productividad fuertemente condicionada por el hidromorfismo, así en posiciones más elevadas podrían generarse microclimas que modifican la magnitud del efecto del hidromorfismo sobre la vegetación.

- La distribución de **grupos de suelo** en la cartografía édáfica generada, **no se asocia** en forma directa con los **rodales** definidos en el sitio de estudio. En la mayoría de los rodales se incluyen suelos con características y limitantes diferentes. La discrepancia observada puede deberse a que si bien los suelos inciden de manera directa en la productividad de las tierras, principalmente el hidromorfismo, otras **condiciones extraedáficas** también definen la aptitud productiva del área de estudio, destacándose condiciones microclimáticas (exposición, temperaturas, heladas), aspectos que deben ser mejor establecidos.

Ejemplo en un establecimiento de Santa Cruz_.

Se presenta en forma muy esquemática la elaboración del Mapa de suelos en un establecimiento de Santa Cruz (Alconada y Da Silva, 2004). En la Figura 5.12 se presenta una imagen satelital que incluye el sitio de estudio, en esta se reconocen tres grandes unidades de paisaje: **Mesetas basálticas**, **Ventanas de erosión** (denominadas así porque son ámbitos donde el basalto fue erosionado y quedan expuestos materiales geológicos más antiguos, se llama a esto “inversión del relieve”); y **Planicies de inundación, Vías de drenaje y mallines**, cuya principal curso es el río Pinturas. En la Figura 5.13 se presenta en una vista panorámica de uno de los sectores del establecimiento estudiado las unidades de paisaje indicadas en Figura 5.12 y los suelos que se identificaron en diferentes posiciones (unidades geomorfológicas menores dentro de las unidades de paisaje principales). En la Figura 5.14 el mapa de suelos, y en la Figura 5.15 la superposición del mapa de suelos en la imagen satelital. En este estudio no se efectuaron estudios del agua, sin embargo, la presencia de mallines desde dulces a salinos, tal como el presentado en la Figura 3.19, y de “guadales”, revelan ámbitos de descarga de agua subterránea.

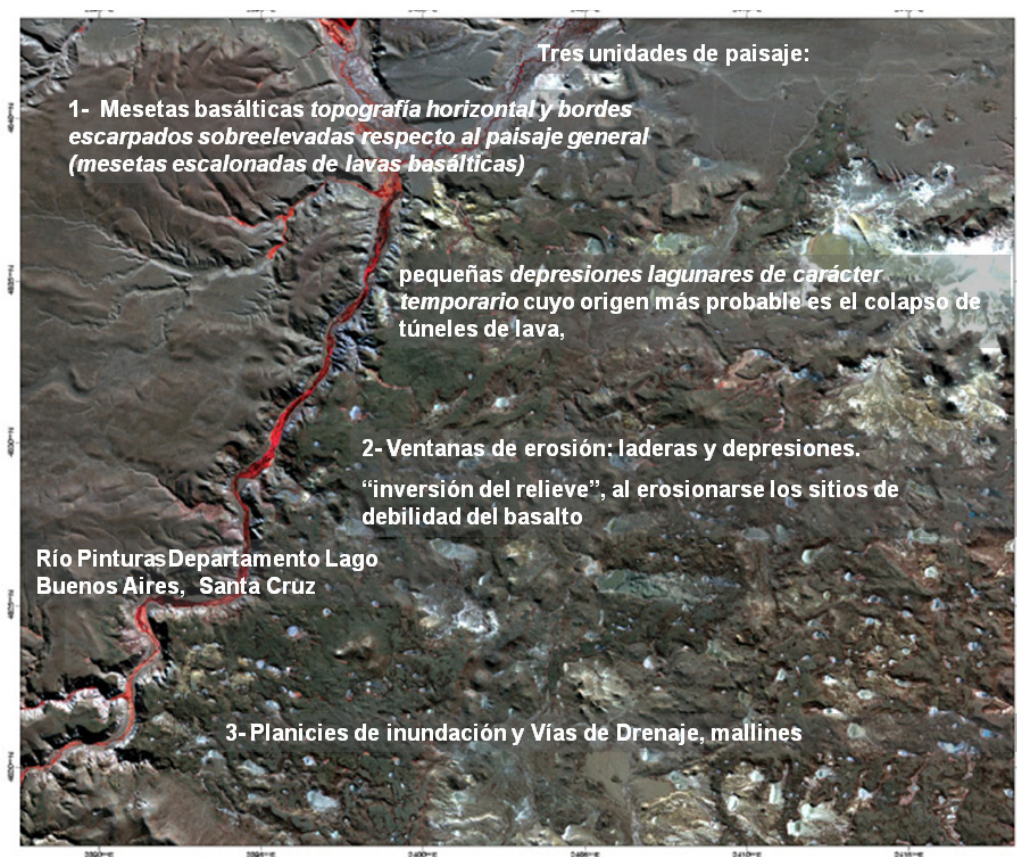


Figura 5.12 Imagen satelital que incluye el sitio de estudio con tres grandes unidades de paisaje: *Mesetas basálticas*, *Ventanas de erosión* y *Planicies de inundación, Vías de drenaje y mallines*

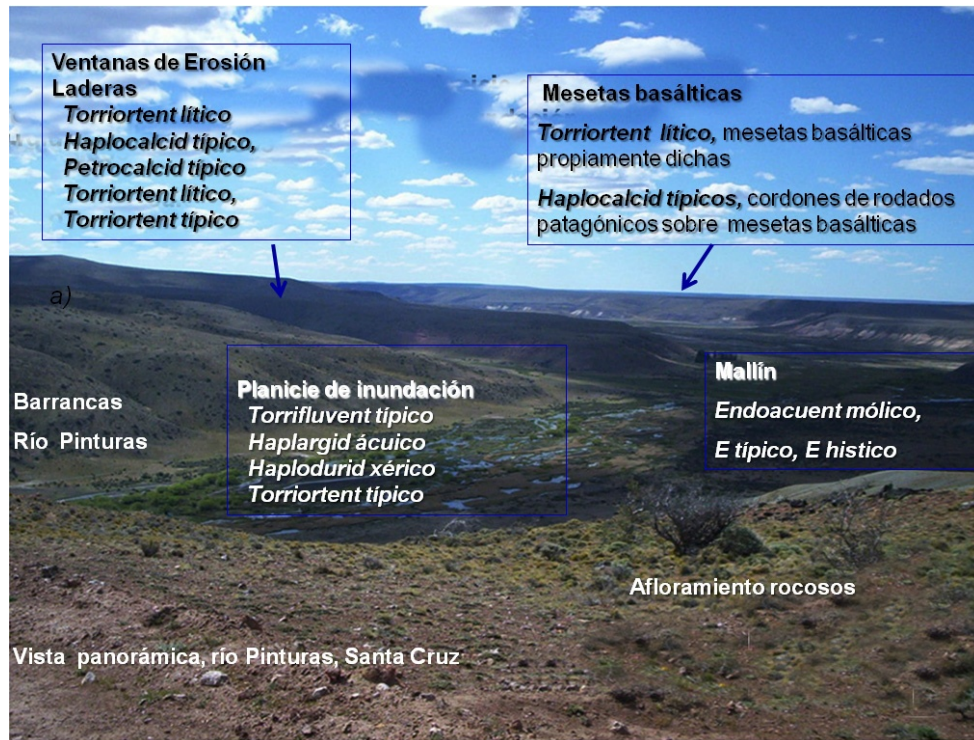


Figura 5.13 Vista panorámica de unidades de paisaje de Figura 5.11 con los suelos que prevalecen

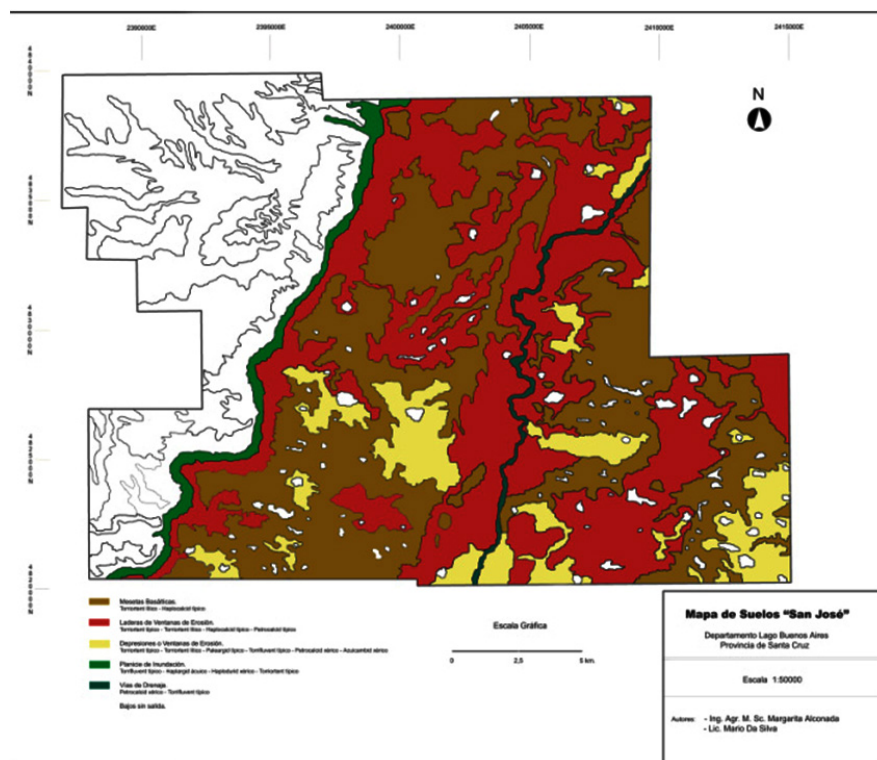


Figura 5.14 Mapa de suelos

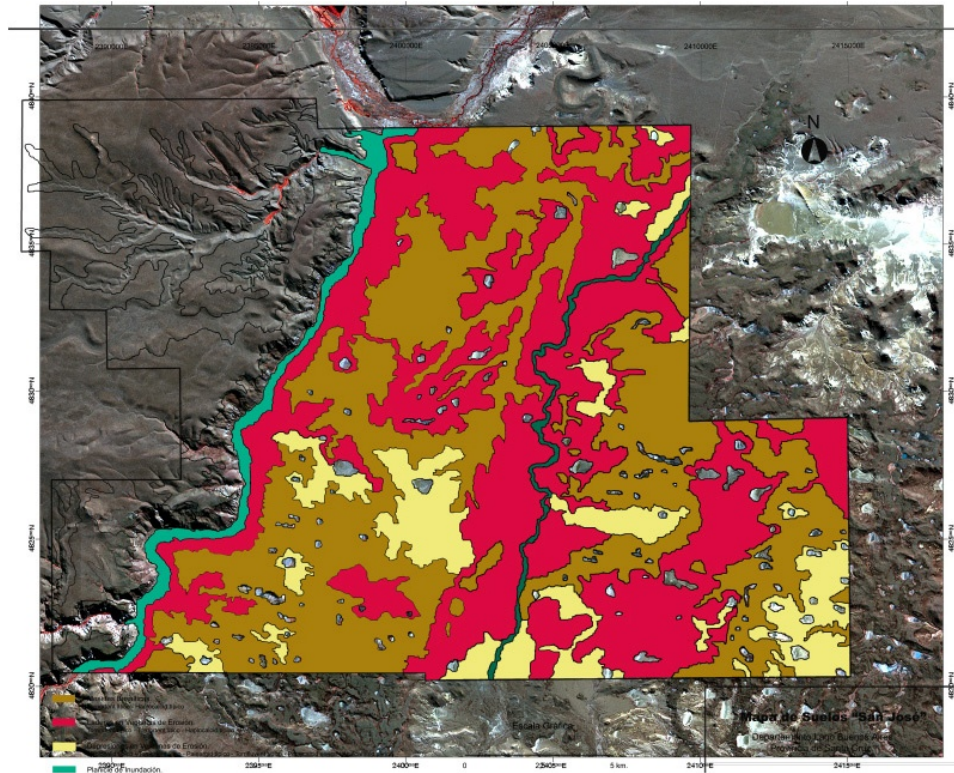


Figura 5.15 Superposición del mapa de suelos con la imagen satelital de Figura 5.12

Bibliografía

- Alconada Magliano M.M (2017). Interpretación de perfiles edáficos como parte de un paisaje a fin de definir manejos sustentables. Recuperado de:
http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35474/mod_resource/content/1/GUIA%20DE%20INTERPRETACI%C3%93N%20DE%20PERFILES.pdf
- Alconada Magliano M.M. y Carricaburu F. (en prensa). El suelo y el agua en la producción de madera de eucalytus grandis en silvopastoreo. Serie técnica INIA FPTA 70. En el marco del Proyecto Producción Ganadera y Forestal: Modelos de Integración Económico Ambiental. INIA- FPTA (Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria), Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay. Convenio INIA.FPTA.UDELAR 2014-2016, Coordinación Bussoni, A (RO del Uruguay).
- Alconada Magliano M. y Damiano F. (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, M., Giuffrè L., Huergo L. y Pascale C. (2000). Hiperfertilización con fósforo de suelos Vertisoles y Molisoles en cultivo de tomate protegido. *Avances en Ingeniería Agrícola* (pp.343–347). Editorial Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Alconada Magliano, M.M., Bussoni A., Rosa R. y Carrillo Rivera J.J. (2009). El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires. Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 68: 50-72. Recuperado de:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56912236005>.
- Alconada Magliano, M.M., Lanfranco J.W. y Pellegrini A.E. (2018). *El suelo en el paisaje. Parte 1 Condiciones de dotación*. La Plata: Edulp. Recuperado de:
<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/861/851/2836-1>
- Baragallo, J. (1988). Las áreas anegables de la Pampa Deprimida. Un planteo agro hidrológico para su solución. *Coloquio internacional sobre hidrología de grandes llanuras*, Olavarría, Argentina. 73 pp.
- Bellati, J.I., Barbagallo J.F. y. Sabella L.J. (1978). Recuperación de áreas deprimidas inundables mediante el ordenamiento y manejo racional del recurso hídrico en cuencas organizadas o módulos. *IDIA* 367-372: 100-121.
- Bertsch, F. (1987). Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José. Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica. 78 páginas

- Bienes, R., Nieves M., Rodríguez C., Moscoso J., and del Olmo A. (1994). Soil over crusting index map of the Madrid community. *XV International Congress Science of Soil*. Mexico. 5b, 58-59.
- Bohn, H.L., Mc Neal B.L. y. O'Connor G.A. (1993). *Química del suelo*. México: Ed. Limusa. 370 p.
- Cadahia López, C. (2005). *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. España: Ed, Mundi Prensa. 681p.
- Casas, R. y Albarracín G. (2015). *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. Tomo I y II. Buenos Aires: Editorial FECIC. 604p y 452p.
- Castañon Lion, G. (1991). *Riego por aspersión*. España: Ed Mundi-Prensa. 199 p.
- Ciampitti, I.A. y García F.O. (2007). Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios en cereales, oleaginosos e Industriales. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1081>
- Ciampitti, I.A. y García F.O (2009). Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios hortalizas, frutales y forrajeras
[http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/\\$FILE/AA%2012.pdf](http://lacs.ipni.net/0/0B0EE369040F863003257967004A1A41/$FILE/AA%2012.pdf)
- Conti, M. (2007). *Principios de Edafología con énfasis en suelos Argentinos*. Buenos Aires: Orientación Gráfica. 430p. Recuperado de: <http://files.bgf-info9.webnode.com/200000212-c98f3ca895/Principios%20Edafolog%C3%ADa%20M%20Conti.pdf>
- Damiano, F. (2014). Agrohidrología: una técnica eficaz para el manejo de agua en campos bajos. Recuperado de: <http://inta.gob.ar/noticias/agrohidrologia-una-tecnica-eficaz-para-el-manejo-de-agua-en-campos-bajos>
- Darronsoro, C. (noviembre 2018). Recuperado de: Universidad de Granada. <http://edafologia.ugr.es>
- Darwich, N.A. (2006). *Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes*. 3ªed. Buenos Aires: FERTILIZAR. 289p.
- De Leenher, L. and De Boodt, M. (1958). Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Inter. Sysmp. on soil structure. Medeligen. Rykskandbouwhogesechool, *Gent. Belgie*, 24: 290-300.
- Domínguez Vivancos, A. (1989). *Tratado de Fertilización*. Madrid. España: Ed. Mundi Prensa. 601p.
- FAO (1971). *El drenaje de los suelos pesados*. Riego y Drenaje 6. Roma: FAO. 114p.
- FAO (noviembre 2018). Portal de suelos de la FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Gaucher, G. (1971). El suelo y sus características agronómicas. Colección de agricultura Tratado de pedología agrícola. España: Ed.Omega. 647p.
- GeoINTA (noviembre 2018) Cartas de suelo de la República Argentina. Provincia de Buenos Aires, Recuperado de: <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>
- Guías de Trabajos Prácticos. Aula Virtual. Edafología, F Cs Ag y Fs, UNLP. Recuperado de: <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- 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. N° 29. Argentina: Ed INTA.

- Flores Delgadillo L. y Alcalá Martínez J.R. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Física de Suelos*. Dpto Edafología. UNAM. Recuperado de: <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Heuperman, A. (2003). *Bio-drainage; a situation analysis*. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture (ISIA) at Tatura, Australia, for the International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID). Recuperado de: www.wca-infonet.org/cds_upload/1058154421850_BIO_DRAINAGE.pdf.
- Hillel, D. (1980). *Environmental soil physics*. New York: Academic Press, IPNI (2018). International Plant Nutrition Institute. Recuperado de: <http://lacs.ipni.net/>
- Kloster N. (2017). Métodos de análisis e implementación de Calidad en el Laboratorio de Suelos. Normas IRAM. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_pt_106_kloster.pdf
- Lanfranco, J.W., Pellegrini A.E. y Cattani V.M. (2014). Contenidos de Edafología. Génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo. Facultad Cs Ag y Fs, UNLP. Recuperado de: Aula Virtual Edafología. 254p.
- Ledesma, L.L. y Zurita J.J. (1988). *Los Suelos del Departamento Gral San Martín*. Carta de suelos de la República Argentina, 1:50.000. Tomo I, texto 477 páginas. Tomo II, mapas. Chaco: Ed. INTA.
- Malavolta, E.; Vitti G.C. y De Oliveira S.A. (1989). *Avaliacao do estado nutricional princípios e aplicacoes*. Brasil: Editora Gráfica NAGY Ltda. 201p.
- Page, A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (1982) *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical Properties*. Second Editions. Madison, Wisconsin, USA.
- Pla Sentis, I. (2014). Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated conditions. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(4):50-63. WASWAC. China
- Pla Sentis, I. (2017). Anthropogenic and climate change factors in present and future soil and water conservation problems. (Zlatic and Kostadinov, ed.) *Soil and Water Resources Protection in the Changing Environment. Advances in GeoEcology Catena Verlag GMBH*.
- Porta, J.; López Acevedo M. y Roquero C. 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Ed. Mundi Prensa. 807pág.
- SAGyP–INTA. (1990). Atlas de Suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD Arg-85/019, Buenos Aires, Argentina. Tomo I y II, 1600 p. 39 mapas.
- SAGyP-INTA. (1989). Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Mapa de suelos, Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. 525p.
- SAMLA (octubre 2018). Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorios de Análisis de suelo Recuperado de: <http://www.suelos.org.ar/sito/sistema-de-apoyo-metodologico-a-laboratorios-de-analisis-de-suelo-samla/>
- Schoeneberger, P.J., Wysocki D.A., Benham E.C. y Broderson W.D. (2000). Field Book for Describing and Sampling Soils. National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agricultura. Lincoln, Nebraska. Traducción al español Li-

- bro de campaña para descripción y muestreo de suelos por AICET, Área de Investigaciones en Cartografía y Evaluación de Tierras, Castelar. Buenos Aires: Ed INTA.
- SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Carta Geológica de la República Argentina escala 1:2.500.000. Recuperado de: <http://www.segemar.gov.ar/igrm/cartas/>
- Töth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Tecnológico GeoMinero España, 8, 49-26.
- UNESCO (2005). Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos Tema: Hidrología de Suelos. (Documento Técnico en Hidrología del PHI, N° 71). D. Lobo Luján, D. Gabriels y G. Soto (Editores): Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Francia.
- UNLP. (2001). *Inundaciones en la región pampeana*. Editores O. Maiola, Gabellone, N. y Hernández M.. La Plata: Editorial UNLP. 266 p.
- Velasco Molina, H.A.(1983). *Uso y manejo del suelo*. México; Ed. Limusa.
- Wilson, M.G. (2017). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina Buenos Aires: INTA. Recuperado de:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/manual_ics_final.pdf

Los Autores

Margarita María Alconada Magliano

Ingeniera Agrónoma (UNLP, Argentina). Doctora en Geografía (UNAN, México). Magister Scientiae en Ciencias del Suelo (UBA, Argentina). Profesora Adjunta de Edafología, Facultad de Cs Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina.

Jorge Washington Lanfranco

Ingeniero Agrónomo (UNLP, Argentina). Ex Profesor Titular de Edafología, Facultad de Cs Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina.

Alconada Magliano, Margarita M.

Suelo en el paisaje. PARTE 2. Condiciones de abastecimiento / Margarita M. Alconada Magliano ; Jorge Washington Lanfranco. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; La Plata : EDULP, 2020.

Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-34-1880-2

1. Edafología. I. Lanfranco, Jorge Washington. II. Título.
CDD 631.4

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata

48 N.º 551-599 / La Plata B1900AMX / Buenos Aires, Argentina

+54 221 644 7150

edulp.editorial@gmail.com

www.editorial.unlp.edu.ar

EduLP integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2020

ISBN 978-950-34-1880-2

© 2020 - EduLP

n
naturales


EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA