



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CURSO MANEJO Y CONSERVACIÓN DE SUELOS

MATERIAL TEÓRICO
INGENIERÍA FORESTAL

UNIDAD DIDÁCTICA C5 (2 de 2)
Manejo de Suelos Halomórficos

2018

Revisión bibliográfica y ordenamiento didáctico

Se agradece particularmente La disposición de los Ings. Agrs. Raúl Lavado y Miguel Taboada para la utilización de su obra en la elaboración de la mayor parte de este texto

OBJETIVOS

Conocer la dinámica del proceso natural y antrópico de salinización y sodificación de los suelos y su diagnóstico, a los fines de brindar herramientas para el diseño de estrategias de prevención y manejo.

RESUMEN

Un lugar común en toda la literatura acerca de los problemas ambientales globales que abarcan a la agricultura y los suelos es la mención a los procesos de salinización y sus consecuencias. En muchas áreas del mundo estos procesos son serios y afectan la producción de alimentos y con ello la calidad de vida de sus habitantes.

Muchos de los problemas globales que la actividad humana genera sobre el ambiente tienen la característica de significar la alteración o rotura de un equilibrio interno del planeta y por ello causar consecuencias que, llegado a cierto nivel, se supone serán irreversibles. Los procesos de salinización aparentemente no poseen estos atributos: la tierra posee mecanismos que funcionan en escalas de tiempo geológico que permiten la “renovación” de los materiales terrestres. Estos mecanismos están relacionados a la deriva continental y mantiene el equilibrio en el planeta. Una prueba de ello es la constancia en la composición salina del agua de mar desde hace millones de años. Por lo tanto la actividad agrícola no aumenta el nivel salino del planeta, sino que redistribuye las sales solubles y las transfiere de sedimentos y aguas más o menos profundos a la superficie del suelo. Globalmente este proceso es insignificante, pero para la producción de alimentos en los lugares afectados, el proceso de salinización es de extrema gravedad.

Los suelos afectados por sales están distribuidos en todo el mundo, diferenciándose un proceso de salinización primaria de otro secundario. El primero ocurre en los suelos por causas naturales, ajenas a la actividad antrópica. Es el caso característicos de muchas áreas de zonas áridas, en las cuales las sales solubles están presentes en el perfil del suelo simplemente porque no se lavan por falta de suficientes lluvias. La salinización secundaria es causada por la actividad de la agricultura: irrigación, cultivos, forestación y deforestación, producción ganadera, etc. Generalmente, esta última es provocada por la rotura del equilibrio hídrico, lo que causa la removilización de las sales desde fuentes cercanas (subsuelos salinos, aguas subterráneas, etc.).

En el proceso de salinización intervienen factores de muy variada magnitud, afectados por la actividad humana. Lo más sencillo ocurre en zonas áridas, donde los flujos son más unidireccionales. La Argentina tiene una gran superficie cubierta por suelos salino-sódicos.

El origen principal de las sales y el sodio intercambiable en los suelos es el agua subterránea. Esta puede influenciar directamente, o por medio del ascenso capilar de sales hacia la superficie del suelo. El US Soil Taxonomy define a un suelo salino por conductividad del extracto de saturación superior a 4 dS m^{-1} . No obstante los cultivos difieren en su tolerancia a las sales dentro de un rango entre 2 y 8 dS m^{-1} . Del mismo modo, la definición de suelo sódico es con una relación de adsorción de sodio (RAS) superior a 13 o PSI mayor de 15. Los suelos afectados por sales pueden estar distribuidos en ambientes áridos y semiáridos (regados y no regados) y ambientes húmedos. Los suelos de cada uno de estos ambientes difieren en cuanto al origen del halomorfismo. La salinidad afecta negativamente la disponibilidad de agua para las plantas por el aumento del componente osmótico. La vinculación de la salinidad, en su más amplia acepción, con los cultivos es muy compleja: además del estrés salino, las plantas están sometidas a estrés hídrico, anóxico, térmico, toxicidades específicas, etc. La sodicidad afecta principalmente a la movilidad del agua en el suelo por la inestabilización de la estructura, el desarrollo de impedancias mecánicas por las

mismas causas, y desarrolla problemáticas de toxicidad. La calidad y aptitud de uso de estos suelos está dada principalmente por el desarrollo y propiedades (pH, porcentaje de materia orgánica) del horizonte A y la profundidad a la cual se encuentra el horizonte B nítrico, en caso de existir.

En los últimos años se observa en la Región Pampeana un crecimiento en la utilización de sistemas de riego complementario, especialmente para la producción de granos. La principal fuente de agua para riego son perforaciones que alcanzan a los acuíferos, aunque en forma limitada, también se utilizan fuentes de agua superficiales.

La degradación del suelo por el exceso de sodio intercambiable, debido al aporte de las aguas bicarbonatadas sódicas, no ha llegado a valores extremadamente altos; aparentemente se llega a un nuevo equilibrio. Este equilibrio se encuentra cerca de los valores críticos de sodicidad y podrían aparecer algunos problemas físicos. Sin embargo, la productividad de los suelos no ha sido afectada significativamente.

Una parte de los suelos actualmente afectados por sales puede ser utilizada sin inversiones económicas importantes, en cambio el resto puede ser puesto bajo cultivo sólo mediante procedimientos drásticos. La aplicabilidad de esos procedimientos depende de los aspectos económicos, más que de los tecnológicos. La actividad agrícola sobre estos suelos puede o no ser sustentable, de acuerdo con las particularidades de cada uno de estos ambientes. Existen distintas técnicas disponibles para recuperar o rehabilitar suelos salinos y sódicos. Estas técnicas difieren en cuanto a su grado de efectividad y deben ser puestas a prueba en cada situación. Las diferentes técnicas de manejo deben aplicarse según los objetivos específicos, propios de cada caso. Los principios básicos que guían a la mayoría de ellas son: *la reducción del ascenso capilar desde la capa freática; el incremento de la infiltración; la recuperación de la cobertura; la mejora de la condición física y química de los suelos.* Las técnicas difieren también en su nivel de complejidad, pues abarcan desde prácticas agronómicas relativamente más simples y de menor inversión en insumos como el manejo del pastoreo con descansos periódicos (pastoreo rotativo), el uso de coberturas o mulches, la intersiembra y el cultivo del suelo con especies adaptadas entre otras, las cuales se basan en lograr cobertura viva del suelo, provocando la interrupción del ascenso capilar de sales a la superficie, y mayor biomasa con la generación de CO₂ por respiración de microorganismos y raíces, produciendo la sustitución del Na⁺ de intercambio. La forestación es otra práctica de índole biológica con excelentes resultados, que bajo ciertas pautas de implementación, resulta como alternativa para el aumento de la productividad de pastizales salinos; su aplicación requiere un cambio drástico del uso del suelo y la estructura y manejo productivo que pueden limitar su adopción. Otro grupo de técnicas están comprendidas en las llamadas enmiendas que pueden agruparse en orgánicas (abonos orgánicos) y químicas (enyesado); ésta última consiste en el agregado de una sal abundante en Ca⁺⁺ soluble a pH alcalinos que provoca la sustitución del Na⁺ del complejo de cambio para su posterior lavado en profundidad. Estas prácticas de mayor costo están reservadas normalmente para cultivos intensivos o bajo riego. Por último, un grupo que podemos denominar de acción mecánica – labranzas - que comprende por una parte el manejo de la labranza bajo cubierta que tiene por objetivo el logro de la cobertura muerta sobre la superficie del suelo con un efecto positivo para mejorar la infiltración y disminuir la evaporación superficial. Entre ellas se destaca la siembra directa que resulta una herramienta muy útil para manejar el balance de agua del suelo y, con ello, afectar positivamente el balance de sales. Otro grupo de labranzas que podríamos denominar especiales, tiene como objetivo contrarrestar una limitación del suelo que normalmente es el drenaje interno del mismo, a los fines de favorecer el lavado del Na⁺ y las sales en profundidad. Entre ellas podemos mencionar el subsolado con o sin drenes topes. La aplicación de este tipo de labranzas requiere condiciones de suelo y topográficas específicas para lograr los fines propuestos. Como prácticas complementarias a las anteriores podemos mencionar la fertilización que debe aplicarse una vez superados o controlados los problemas de salinidad/sodicidad y anegamientos asociados, contribuye al aumento de biomasa y cobertura. El manejo agrohidrológico si bien es una práctica propia de manejo de suelos hidromórficos puede aplicarse en forma asociada a suelos sódicos/salinos en regiones húmedas.

ÍNDICE

PARTE I DEFINICIONES Y PARAMETROS.....	- 4 -
<i>SUELO SALINO</i>	<i>- 5 -</i>
<i>HORIZONTE NÁTRICO.....</i>	<i>- 5 -</i>
<i>SUELO ALCALINO</i>	<i>- 5 -</i>
<i>SUELO SALINO SÓDICO.....</i>	<i>- 5 -</i>
PARTE II DISTRIBUCION EN EL PAIS	- 7 -
<i>AMBIENTES ÁRIDOS Y SEMIÁRIDOS NO IRRIGADOS</i>	<i>- 7 -</i>
<i>ÁREAS BAJO RIEGO.....</i>	<i>- 8 -</i>
<i>AMBIENTES HÚMEDOS</i>	<i>- 12 -</i>
<i>SALINIZACIÓN POR RIEGO COMPLEMENTARIO</i>	<i>- 16 -</i>
PARTE III INFLUENCIA de SALES Y SODIO SOBRE EL SUELO EFECTOS SOBRE LOS CULTIVOS	- 16 -
<i>INFLUENCIA DE LA SALINIDAD.....</i>	<i>- 16 -</i>
<i>INFLUENCIA DE LA SODICIDAD.....</i>	<i>- 18 -</i>
PARTE IV ORIGEN DE LAS SALES Y PROCESOS ASOCIADOS	- 23 -
<i>ORIGEN DE LAS SALES Y EL PROCESO DE SALINIZACIÓN</i>	<i>- 23 -</i>
<i>PROCESOS ASOCIADOS A SALINIZACIÓN EN LA REGIÓN HÚMEDA Y SUBHÚMEDA</i>	<i>- 25 -</i>
PARTE V DINAMICA DE LA FREATICA E INFLUENCIA DE LA VEGETACION EN AREAS DE SECANO	- 30 -
<i>DINÁMICA DE LA NAPA FREÁTICA: RELACIÓN CON EL CLIMA Y EL RELIEVE</i>	<i>- 30 -</i>
<i>INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LA DINÁMICA DE LAS SALES EN EL PERFIL.....</i>	<i>- 32 -</i>
PARTE VI SALINIZACION POR RIEGO COMPLEMENTARIO.....	- 36 -
<i>UBICACIÓN DEL PROBLEMA</i>	<i>- 36 -</i>
<i>PROBLEMAS QUE SE GENERAN POR EL USO DEL AGUA</i>	<i>- 37 -</i>
<i>ANÁLISIS DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>SITUACIÓN PRESENTE, MANEJO DE SUELOS Y PROBLEMAS FUTUROS.....</i>	<i>- 43 -</i>
PARTE VII USO Y MANEJO DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS EN AREAS DE SECANO.....	- 44 -
<i>PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE USO Y MANEJO DE SUELOS Y VEGETACIÓN</i>	<i>- 44 -</i>
<i>FUNDAMENTOS PARA EL MANEJO Y RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS.....</i>	<i>- 45 -</i>
<i>FUNDAMENTOS PARA EL MANEJO Y RECUPERACIÓN DE SUELOS SÓDICOS.</i>	<i>- 47 -</i>
<i>TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS.</i>	<i>- 49 -</i>
Intersiembras	<i>- 50 -</i>
Clausuras al pastoreo	<i>- 50 -</i>
Pastoreo rotativo	<i>- 50 -</i>
Cultivo del suelo con plantas mejoradoras.....	<i>- 53 -</i>
Forestación.....	<i>- 56 -</i>
Coberturas y mulches	<i>- 66 -</i>
Revegetación de playas salinas	<i>- 66 -</i>
Transplante de especies resistentes	<i>- 66 -</i>
Enmiendas para la corrección química	<i>- 67 -</i>
Manejo de las labranzas.....	<i>- 74 -</i>
Aflojamiento superficial del suelo.....	<i>- 76 -</i>
Drenajes Localizados: Subsulado, uso de drenes topo.....	<i>- 76 -</i>
Fertilización de pasturas	<i>- 77 -</i>
Manejo agrohidrológico.....	<i>- 78 -</i>
CUESTIONARIO	- 79 -
BIBLIOGRAFÍA	- 80 -

PARTE I

DEFINICIONES Y PARAMETROS

Los suelos son fuertemente afectados cuando poseen niveles elevados de sales solubles y/o sodio intercambiable en una parte o la totalidad de su perfil. La salinidad se define como la presencia de un exceso de sales solubles en los suelos. Este exceso de sales se plantea en relación con la tolerancia normal de los cultivos. Las sales están integradas por distintos cationes y aniones. El catión que predomina universalmente es el sodio y entre los aniones, los cloruros y sulfatos predominan en los llamados *suelos salinos*, y los carbonatos y bicarbonatos, en los llamados *suelos alcalinos*. Sin embargo, los suelos alcalinos se cuantifican por la proporción de sodio intercambiable (PSI) o la relación de adsorción de Na^+ en la solución externa (RAS). Por eso, también se denominan *suelos sódicos*. Para denominar en forma global ambas problemáticas se utilizarán indistintamente los términos “suelos afectados por sales” o “suelos halomórficos”, aunque se trate de sinónimos que enfatizan características distintas.

Existe gran dificultad para abarcar en forma simple y comprensiva a este tipo de suelos. Esto se debe, entre otras cosas, a:

- su caracterización requiere la realización de varias determinaciones analíticas, para considerar a todos los tipos de suelos afectados por sales
- la afección por sales involucra efectos que poseen mayor o menor magnitud y persistencia sobre los suelos
- hay consecuencias directas e indirectas sobre las plantas, las que a su vez reaccionan en forma distinta a estos efectos
- los efectos sobre las plantas son modificados por el medio: lluvia, humedad ambiente, insolación, profundidad de la capa freática, variación o alternancia de sequías y/o inundaciones, etc
- las propiedades de los suelos afectados por sales y sodio varían en el espacio, en el tiempo y con la profundidad del suelo
- el riego y la actividad agrícola contribuyen a disminuir o aumentar la salinidad y/o la alcalinidad de los suelos y la magnitud de sus efectos
- en muchos casos la tecnología y los cultivos utilizados en otras situaciones no son aptos para estos suelos
- los aspectos económicos multiplican la complejidad de los problemas, dado que en nuestro país la producción debe hacerse necesariamente a bajo costo, para mantener la competitividad internacional
- existen suelos afectados por sales que tienen otros problemas adicionales, tales como presencia de elevados porcentajes aluminio intercambiable o presencia de ácido sulfúrico libre

La existencia de una gran variedad de suelos afectados por sales dio lugar a distintas visiones de ellos. Esas visiones tuvieron un correlato con la distribución geográfica de estos suelos y la ideología reinante hace unos años. Los casos extremos fueron: a) una visión pragmática basada en datos químicos cuantitativos; y b) otra visión genetista de suelos, basada en la descripción de los perfiles.

Otro aspecto que hace que el estudio de los suelos afectados por sales sea muy complejo, es que involucra a los suelos que son salinos y/o alcalinos más los suelos que fueron salinos, pero que actualmente retienen alguna característica causada por la salinidad. A ellos se suman los suelos potencialmente afectados por sales, tanto por razones naturales como antrópicas. Los problemas de salinidad y de sodicidad pueden aparecer en forma conjunta en los suelos, pero también es común que se encuentren separadas. Es importante saber diagnosticarlos, pues los problemas que ocasionan a los suelos y cultivos difieren entre sí. Se proveen a continuación algunas definiciones básicas, tomadas del Glosario de Términos de Ciencia del Suelo usado por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (Soil Science Society of America, 2001).

SUELO SALINO

Suelo que contiene suficiente cantidad de sales solubles para afectar adversamente el crecimiento de la mayor parte de los cultivos. El límite inferior de salinidad en estos suelos es establecido convencionalmente en una conductividad eléctrica del extracto de saturación de 4 dS m^{-1} (a 25°C)¹.

HORIZONTE NÁTRICO

Horizonte mineral del suelo que satisface los requerimientos de un horizonte argílico (ej. horizonte Bt), que suele poseer estructura prismática, columnar o en bloques, y con más de 15 % de Na intercambiable.

SUELO ALCALINO

Esta categoría no se utiliza más en la clasificación de suelos americana (US Soil Taxonomy), pero es aún usada en nuestro país. Generalmente se utiliza como sinónimo de "suelo sódico", pero debe tenerse en cuenta que aunque todos los suelos alcalinos son sódicos, no todos los suelos sódicos son alcalinos. El criterio para definir a un suelo alcalino es que posea pH muy elevado, mayor a 8,5

SUELO SALINO SÓDICO

Esta categoría no es utilizada actualmente, pero aparece en materiales de cierta antigüedad. Ocurre que un presupuesto básico para denominar "sódico" a un suelo es la presencia de altos niveles de sodio intercambiable y, dado que las sales solubles son sódicas, todos los suelos con sales tienen altos niveles de sodio intercambiable. Por ello, después de varios años de aplicar esta categoría se vio que prácticamente no se diferencia de los suelos salinos y en los últimos años se dejó de utilizar (Naidu y Rengasamy, 1993).

En síntesis se refiere a un suelo que puede contener: suficiente cantidad de sodio intercambiable y apreciables cantidades de sales solubles para interferir con el crecimiento de la mayor parte de los cultivos. El PSI es mayor a 15, la conductividad del extracto de saturación es mayor que 4 dS m^{-1} (a 25°C) y el pH del suelo saturado es usualmente 8,5 o menor. En Tabla 1 se muestra una síntesis de los umbrales de los parámetros actuales y antiguos de salinidad y sodicidad edáfica.

Tabla 1. Umbrales actuales y antiguos para definir salinidad y sodicidad en los suelos (fuente: Soil Science Society of America, 2001).

Umbral	Suelos	CE dS m^{-1} a 25°C	RAS	pH	PSI %
Actuales	salinos	> 4 (2 – 8)		$\leq 8,5$	
	sódicos		> 13		
Antiguos	alcalinos	< 4		$\geq 8,5$	> 15
	salino - sódicos	> 4		$\geq 8,5$	> 15

Considerando el enfoque agrofisiológico desarrollado por el difundido Manual 60 de Riverside (Richards et al., 1954), 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, se consideran los límites establecidos en la Tabla.2.

¹ dS m^{-1} = deciSiemen por metro, *equivalente* a la unidad antigua "mmho cm^{-1} "

Tabla 2. Características principales utilizadas para diferenciar suelos salinos y sódicos (según el criterio del manual 60 del USDA), criterio considerado en la Taxonomía de suelos, siendo de utilidad restringida en cuestiones de manejo del suelo.

Suelos	CE dS m ⁻¹ a 25° C	PSI	pH
Salino	< 15	< 15	< 8,5
Salino-sódico	> 4	> 15	< 8,5
Sódico	< 4	> 15	> 8,5

Este criterio de clasificación, si bien en algunos aspectos resulta válido para diversas condiciones climáticas, en sentido estricto, resulta apropiado para suelos de **zonas áridas y de escaso desarrollo genético**, es decir para las condiciones para las cuales fueron establecidas, a partir de las cuales se dan desviaciones muy marcadas.

Resulta de suma utilidad como electo de diagnóstico considerar a las especies vegetales indicadoras de las condiciones de salinidad y sodicidad (Tabla 3).

Tabla 3. Plantas indicadoras de suelos salinos y salino-sódicos

Especie indicadora	Condición de adaptación
<i>Atriplex confertifolia</i> (cachiyuyo)	salinidad y sodicidad
<i>Kochia scoparia</i> (morenita)	salinidad
<i>Frankenia grandifolia</i> (varetila)	salinidad
<i>Distichlis spicata</i> (pelo de chancho, pasto salado)	salinidad y sodicidad
<i>Distichlis scoparia</i> (pasto salado)	salinidad y sodicidad
<i>Sporobolus indicus</i> (pasto alambre)	salinidad y sodicidad
<i>Salicornia</i> sp. (jume)	salinidad
<i>Diplachne uninervia</i>	salinidad y sodicidad
<i>Chloris berroi</i>	salinidad y sodicidad
<i>Eryngium echinatum</i> Urban (cardo Mon)	salinidad y sodicidad
<i>Spilanthes stolonifera</i>	salinidad y sodicidad
<i>Stenotaphrum secundatum</i> (gramilla)	salinidad y sodicidad
<i>Ambrosia tenuifolia</i> Sprengel (altamisa)	salinidad y sodicidad
<i>Vulpia dertonensis</i> Gola	salinidad y sodicidad
<i>Dichondra repens</i> Ferts	salinidad y sodicidad
<i>Adesmia bicolor</i> (alverjilla babosita)	salinidad y sodicidad
<i>Tessaria absinthioides</i> (brea, suncho negro)	salinidad y sodicidad
<i>Muhlenbergia asperifolia</i>	salinidad y sodicidad
<i>Heliotropium curassavicum</i> (cola de gama, cola de zorro)	salinidad y sodicidad

PARTE II

DISTRIBUCION EN EL PAIS

La Argentina es, según FAO-UNESCO, el tercer país con mayor superficie de suelos afectados por halomorfismo en el mundo, después de Rusia y Australia. De acuerdo con Lavado (2007), en nuestro país, el panorama de los suelos afectados por sales puede generalizarse de acuerdo con los ambientes de ocurrencia y la existencia o no de riego.

AMBIENTES ÁRIDOS Y SEMIÁRIDOS NO IRRIGADOS

Se estima que los ambientes áridos ocupan un 50 % de la superficie de Argentina, mientras que los semiáridos, un 25 % de la superficie. La mayor parte de estos suelos son Aridisoles y Entisoles, mientras que en algunas áreas hay también Molisoles y Alfisoles. Una significativa proporción de estos suelos son salinos a fuertemente salinos, pues se formaron en las clásicas condiciones de ambientes donde no existe suficiente lixiviación para eliminar las sales en exceso. Estas sales fueron aportadas por el agua freática o formadas *in situ* por meteorización del material original. Muy comúnmente, se encuentran en depresiones y presentan capas freáticas salinas o muy salinas cerca de la superficie. Un ejemplo extremo son las salinas que se forman en áreas muy secas, donde la evaporación es el proceso predominante.

En la Figura 1 se presenta una fotografía tomada en las Salinas del Bebedero, en la provincia de San Luis, lugar donde las sales son explotadas comercialmente para sal de mesa. Otro ejemplo de un suelo salino se observa en la Tabla 4, donde se muestran las propiedades de un suelo ubicado en las cercanías de Santa Rosa, La Pampa.



Figura 1. Panorámica de un salinero en Salinas del Bebedero, Provincia de San Luis.

Tabla 4. Propiedades de un suelo en Santa Rosa, provincia de la Pampa (Lavado, 2007).

Horizonte	Profundidad cm	Arcilla %	CIC cmol kg ⁻¹	CO ₃ Ca %	C org. %	CE dS m ⁻¹	pH	PSI %
A1sa	0 - 12	34,5	34,4	2,8	0,8	29,1	7,6	25
2ACsa	12 - 40	29,2	23,2	vestigios	0,7	44,8	7,9	43
3Csa	40 a +	24	23,2	vestigios	0,3	49,7	7,7	42

Referencias: CIC = capacidad de intercambio catiónico; CE = conductividad eléctrica de extracto de saturación a 25° C.

En algunas de estas regiones la salinidad es extrema, como es el caso de la depresión de la laguna de Mar Chiquita, al norte de Córdoba, donde la vegetación se compone de especies resistentes como *Salicornia* (Figura 2). En regiones como ésta, la salinización actual se origina a menudo en el desmonte, que ha ocasionado el ascenso de la capa freática hacia la superficie, contactándola con el suelo superficial.



Figura 2. Aspecto del paisaje en un campo de la depresión de laguna de Mar Chiquita (norte de Córdoba).

ÁREAS BAJO RIEGO

La salinidad de los suelos irrigados se relaciona directamente con la tecnología utilizada y la calidad del agua de riego. La evaluación del agua con fines de riego tiene en cuenta: i) concentración total de sales solubles, ii) concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, iii) la concentración relativa de bicarbonatos respecto a la de calcio más magnesio y iv) la concentración de boro u otros elementos que pueden ser tóxicos. Sobre esta base se desarrollaron diferentes clasificaciones sobre calidad del agua de riego. Estas se ajustan a las características de clima árido o semiárido, con baja precipitación efectiva, suelos de textura franco arenosa o franco arcilloso, pero sin desarrollo de horizontes y con buen drenaje interno y capa freática profunda o controlada por un sistema de drenaje subsuperficial y cultivos con cierta tolerancia a las sales.

Las áreas bajo riego de Argentina (exceptuando el cultivo de arroz en áreas cálidas y húmedas) se concentran en regiones áridas y semiáridas. Estas áreas se distribuyen a lo largo del país: a) sobre la cordillera de los Andes (provincias de Salta, Jujuy, Tucumán, Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza; y b) hacia el este, siguiendo el curso de los ríos que nacen en esa cordillera (provincias de Santiago del Estero, Córdoba, La Pampa, Buenos Aires, Río Negro y Chubut). La superficie cultivada ocupa entre 1,5 y 2 millones de hectáreas. La mayor superficie corresponde a Cuyo (más del 40 %), siguiendo las provincias del NOA (35 %) y las del Comahue (16 %). Las áreas irrigadas podrían expandirse marcadamente, pero la principal limitación para su evolución son los problemas de mercado para los productos cosechables. Pueden consultarse recientes revisiones sobre los problemas de salinidad en las provincias de Mendoza (Vallone, 2007) y Santiago del Estero (Prieto et al., 2007).

Los suelos predominantes son también Entisoles y Aridisoles. En algunos casos las áreas irrigadas incluyeron sectores de suelos con salinidad preexistente, pero en general los problemas de halomorfismo se originaron por razones antrópicas, tales como aplicación de láminas de riego excesivas, carencia de suficiente drenaje, etc. Morabito y Salatino (2002) establecieron que para el año 2002 la superficie efectivamente regada en el país era de 1.355.601 ha (22% de la superficie potencial y 4,1% de la superficie cultivada) de las cuales el 71% se realizaba con riego superficial, el 21% con riego por aspersión y el 9% localizado. De los tres sistemas el menos eficiente en cuanto a la utilización del agua por los cultivos es el gravitacional o superficial (aprox.40%), razón por la cual resulta imprescindible la evacuación del excedente

a través de un sistema de canales de drenaje eficientes y con un correcto mantenimiento. Ante la falta de un sistema de drenaje adecuado, situación bastante común en muchas de nuestras áreas de riego, sumado en muchos casos a la aplicación de aguas de baja calidad, se produce como consecuencia un ascenso de la napa freática cerca de la superficie, que a través del ascenso capilar y la evaporación en superficie, produce la salinización de los suelos. Consecuentemente la dinámica de las sales para estas situaciones resulta similar a la salinización en áreas de secano cuya fuente de electrolitos proviene del agua subterránea. La diferencia es que en áreas de secano donde la napa no resulta controlable, como veremos mas adelante, las prácticas están orientadas principalmente al manejo de la cobertura vegetal, y en áreas de riego, el manejo debe orientarse, en primer lugar en el caso de riegos superficiales, a lograr un buen drenaje de los excedentes de agua aplicados a través de un buen diseño de canales de drenaje y a un correcto mantenimiento de los mismos, muchas veces no realizado por los productores por su alto costo.



Compuerta de derivación Canal El Guanaco - Canal 5.



Canal Terciario de Riego en su entrada al establecimiento.

Compuerta de derivación a canal de riego secundario

Canal Terciario de Riego en su ingreso al establecimiento.



Alcantarilla totalmente obstruida en la progresiva 40 m del Ramal I-3.

Canal de drenaje colmatado.

Figura 3. Obras relacionadas con el riego en CORFO, Bs As.

Pueden distinguirse respecto a la calidad de las aguas 2 problemáticas distintas en las áreas de riego: a) zonas donde se utilizan aguas de buena calidad, como son las provenientes del deshielo en alta montaña y que bajan de la cordillera por ríos como el Mendoza, el Tunuyán o el Atuel en la provincia de Mendoza, o los ríos Limay y Negro en las provincias de Neuquén, Río Negro y Buenos Aires. Esta agua, por su origen, posee muy baja carga salina, y los problemas que ocasiona en los suelos se deben o bien al exceso de láminas de riego usadas o la falta de drenaje adecuado; y b) zonas donde se utilizan i) aguas de ríos con concentraciones salinas apreciables o ii) aguas subterráneas extraídas por bombeo. Estas aguas poseen siempre por su origen variables contenidos de sales, por lo que el riego implica siempre aportar sales a los suelos.

La productividad se ha visto reducida en un 35,6 % del total de la superficie irrigada, por problemas de salinidad y de alcalinidad, aunque este porcentaje no se distribuye uniformemente. Tanto en un caso como en otro, suelen encontrarse, en forma paralela, problemas de hidromorfismo debidos al exceso de riego, bajas tasas de infiltración y/o conductividad hidráulica y/o ascensos de la capa freática.

La mayor parte de las áreas de riego se encuentra en zonas donde las lluvias anuales son escasas (100 a 300 mm), por lo que las sales nativas del suelo no pueden ser lixiviadas. Como resultado del riego con aguas subterráneas salinas, en muchos casos se desplaza el perfil salino de los suelos (Figura 4) volviéndose limitante la profundidad del suelo para las raíces de los cultivos.

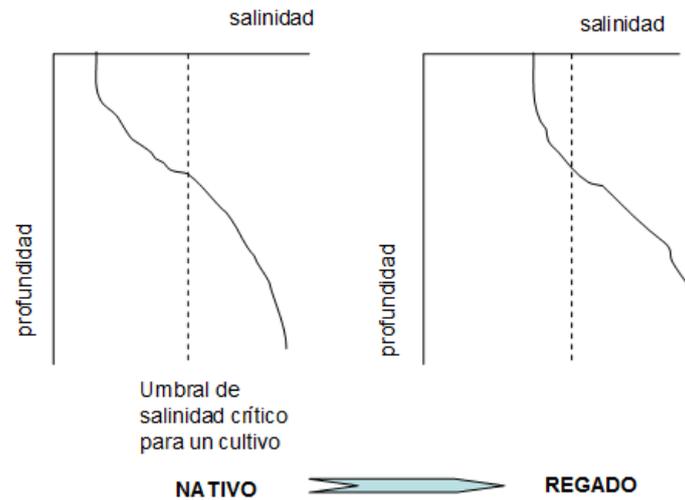


Figura 4. Perfiles de salinidad idealizados en suelos antes y después de ser puestos bajo riego.

En Tabla 5 se presentan datos analíticos de un suelo irrigado con un fuerte proceso de salinización.

Tabla 5. Propiedades de un suelo bajo riego en Viedma, provincia de Río Negro (Lavado, 2007).

Capa	Profundidad cm	Arcilla %	CIC cmol kg ⁻¹	CO ₃ Ca %	C org. %	CE dS m ⁻¹	pH	PSI %
I	0-30	-	37,6	3,4	1,1	10,7	7,4	13
II	30-60	-	32,8	4,7	-	19,4	7,3	26
III	60-90	-	30	2,5	-	24,6	7,4	24

Referencias: CIC = capacidad de intercambio catiónico; CE = conductividad eléctrica de extractos de saturación a 25° C.

Cuando las sales se acumulan en los suelos a una concentración tal que afecta los cultivos, el productor se enfrenta a un serio problema. Por ese motivo, en áreas regadas de zonas áridas, la incidencia de la calidad del agua sobre las propiedades del suelo y la reducción de producción de los cultivos ha sido estudiada por muchos años. Como consecuencia de dichos estudios, existen numerosos índices que permiten pronosticar los efectos de la salinidad y la alcalinidad. Para enfrentar los problemas de salinización de suelos irrigados, la tecnología normal consiste en aplicar una "fracción de lavado". Esto es la aplicación de riego en exceso, para "lavar" las sales acumuladas en el suelo.

No siempre el riego ocasiona salinización de suelos, sino que por el contrario puede lavar las sales de suelos con sedimentos altamente cargados en ellas. La Figura 5 muestra la diferente dinámica y valores de salinidad de un mismo suelo regado.

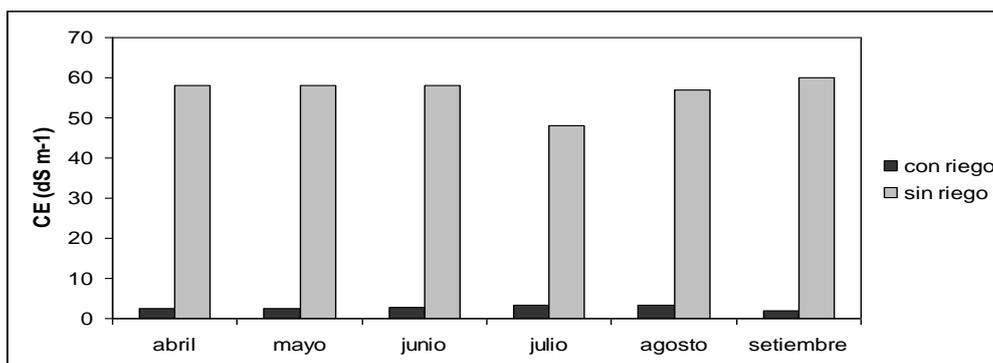


Figura 5. Salinidad superficial media por la conductividad eléctrica de extractos de saturación (CE) en suelos Haplustoles regados y no regados del valle del río Dulce, provincia de Santiago del Estero (Prieto et al., 2007).

En la Tabla 6 se indican cifras relacionadas a esta problemática para las diferentes provincias de Argentina (ha).

Tabla 6. Superficies regadas, afectadas por sales y drenaje para las diferentes provincias de Argentina (ha).

PROVINCIAS	AREAS		AREAS AFECTADAS POR PROBLEMAS DE				
	REGADAS	%	SALINIDAD	%	DRENAJE	%	
JUJUY	90.514	5.9	11.500	2.0	10.000 (CI)	1.8	
SALTA	129.000	8.4	57.791	10.0	17.584(ID)	3.2	
TUCUMAN	140.734	9.1	60.393	10.3	51.941(CI)	9.4	
SGO. DEL ESTERO	54.273	3.5	33.370	5.7	33.370(ID)	6.0	
CATAMARCA	26.884	1.7	1.517	0.3	(CI) o (ID)		
CORDOBA	55.863	3.6	3.747	0.6	(SI)		
SAN LUIS	8.797	0.6	2.436	0.4	2.250 (ID)	0.4	
LA RIOJA	13.456	0.9	1.200	0.2	700 (CI)	0.1	
MENDOZA	443.523	28.8	255.940	43.8	255.310 (xx) (ID)	46.0	
SAN JUAN	96.133	6.2	76.566	13.1	55.000 (xx)	9.9	
CHUBUT	26.404	1.7	12.646	2.2	20.969 (ID)	3.8	
SANTA CRUZ	2.000	0.1	(SI)		(SI)		
LA PAMPA	3.964	0.3	1.982	0.3	2.500 (ID)	0.5	
NEUQUEN	14.527	0.9	3.938	0.7	4.367 (ID)	0.8	
RIO NEGRO	117.106	7.6	46.423	7.9	52.975 (ID)	9.5	
BUENOS AIRES	176.500	11.6	12.500	2.1	43.750	7.9	
ENTRE RIOS	56.800	3.7	algo de alcalinidad en llanuras inundables		(SI)	(SI)	
CORRIENTES	52.310	3.4					
SANTA FE	20.500	1.3	1.600	0.3	4.000	0.7	
CHACO	4.700	0.3	500	0.1	(SI)		
FORMOSA	5.200	0.4					
TOTALES	1.539.188	100	584.048	100	554.716	100	

(x): Grado de salinidad variabl. (xx): profundidad de napa freática menos de 2 m.

(SI): sin información. CI): Carece de infraestructura

Fuente: elaboración propia con datos de la encuesta: documento básico PROGRAMA DE RIEGO Y DRENAJE – INTA.

Observación: los valores corresponden a relevamientos específicos o a estimaciones globales no indican la gravedad del problema en relación a calidad de agua, textura de suelo, clima, etc.-

AMBIENTES HÚMEDOS

Se trata de suelos desarrollados en clima templado-húmedo, con un balance hídrico positivo. La mayoría de estos suelos se desarrollaron sobre sedimentos loésicos y pertenecen principalmente a los órdenes de los Molisoles y Alfisoles. Estas áreas se encuentran en la llanura "Chaco-pampeana" donde básicamente el relieve y la presencia de capas freáticas cercanas a la superficie originaron millones de hectáreas con suelos conocidos clásicamente como del tipo solonetz y/o solod en la antigua clasificación estadounidense; actualmente conocidos como suelos con horizontes nátricos: Natracuoles, Natrudoles, Natracualfes, entre otros. Algunos de estos suelos pueden poseer horizontes superficiales neutros y aún ácidos. Son suelos con grandes dificultades para ser utilizados en agricultura, inclusive están sujetos a inundaciones, por lo que se dedican fundamentalmente a pastoreo. Pueden consultarse recientes revisiones sobre la caracterización el manejo de estos ambientes salinos (Cisneros et al., 2007; Gorgas y Bustos, 2007; Zurita, 2007; Taboada y Lavado, 2008).

Este tipo de suelos está difundido en toda la zona subhúmeda y húmeda de Argentina, pero existen regiones donde predominan sobre los suelos no halomórficos. Estas regiones son la Pampa Deprimida en la provincia de Buenos Aires, la llanura deprimida del Oeste Bonaerense, el sudeste de Córdoba y el sur de Santa Fe (Depresión de la Picasa) y los Bajos Submeridionales del sur del Chaco y norte de Santa Fe (Figura 6).

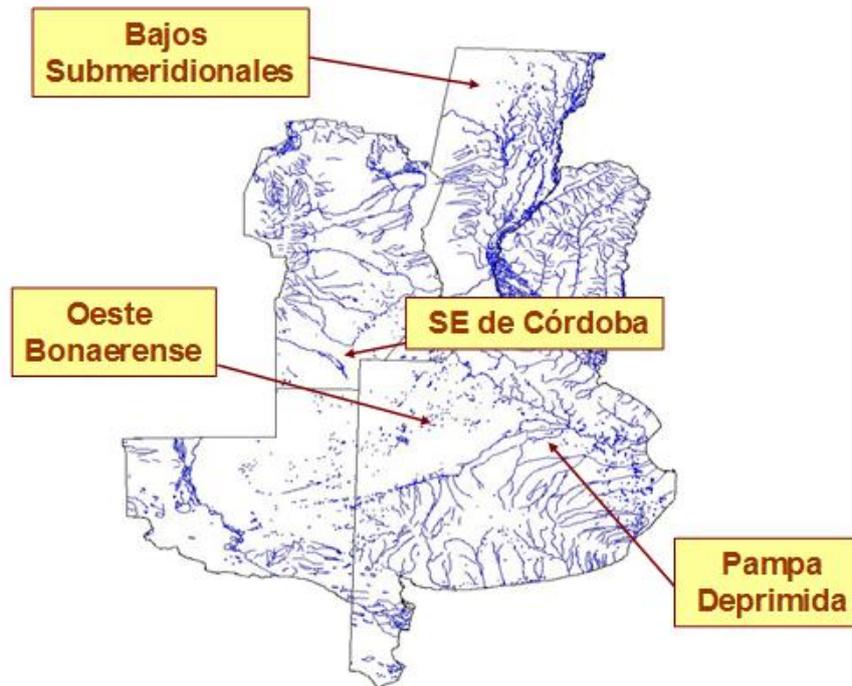


Figura 6. Red de drenaje de la Región Pampeana con las diferentes subregiones indicadas

En ninguna de las regiones mencionadas existe una red de drenaje desarrollada, con densidades de cursos de agua cercanas a 0 km km^{-2} de superficie. Por ejemplo, en la Pampa Deprimida para una superficie de unos cinco millones de hectáreas, el río Salado es el único curso de agua importante. No es casualidad, entonces, que en todas estas regiones de campos bajos los excedentes de agua sean evacuados con extrema lentitud hacia el océano, causando inundaciones y encharcamientos temporarios. Como resultado, las capas freáticas están frecuentemente cerca de la superficie, y que además, tanto ellas como los arroyos y ríos tengan las aguas con elevada concentración salina. No cabe duda que la causa de esta situación es de origen geomorfológico, ya que se relaciona con las bajas pendientes y/o cotas sobre el nivel del mar de los suelos afectados. Los suelos más importantes son complejos y asociaciones halo-hidromórficas. Los principales Grandes Grupos de Suelos (U.S. Soil Taxonomy) son Natracuoles y Natracualfes. Estos suelos no ocupan pequeños "manchones o parches" de diferente tamaño como en otras partes del mundo, sino grandes extensiones. También se encuentran presentes Natralboles, Argialboles y otros suelos ricos en sodio.

En las regiones más húmedas, la capa freática siempre estuvo conectada con la superficie, la salinidad es poco acentuada y es posible el crecimiento de comunidades de pastizal que sufren anegamientos invierno-primaverales (Figura 7). Una reciente revisión de estos problemas puede ser consultada en Jobbágy (2008).



Figura 7. Aspecto del paisaje de un suelo encharcado con agua de lluvia (partido de Ameghino, provincia de Buenos Aires).

Los ambientes húmedos se caracterizan, entonces, por la dominancia de suelos afectados por problemas combinados de halo- e hidromorfismo, por presencia de capas freáticas altas y anegamientos estacionales. Algunos de estos suelos poseen sodio intercambiable y elevado pH desde su superficie. Un ejemplo se presenta en Tabla 7 y la Figura 8. Otros suelos, en cambio, sólo presentan elevada cantidad de sodio intercambiable en el horizonte Bt nátrico, mientras que el horizonte A posee buenas características agronómicas (Tabla 8; Figura 9). Los suelos salino-sódicos se presentan con gran frecuencia en el Oeste Bonaerense (Figura 10).

Tabla 7. Propiedades de un suelo sódico (Natracualf típico) de la Pampa Deprimida.

Horizonte	Prof	Arcilla	CO ₃ Ca	C. Org.	CE	pH	PSI
	cm	%	%	%	dS m ⁻¹		%
Al	0-16	22,4	vestigios	1	vestigios	9,2	80
		52,1	4,4	0,5	vestigios	9,4	86
B31	40-65	37,7	vestigios	0,2	vestigios	8,7	72
B32	65-90	24,6	vestigios	-	0,5	8,5	48
C1	90-150	21,8	-	-	1,1	8,3	35
C2	150	21,1	-	-	3,2	8,3	33

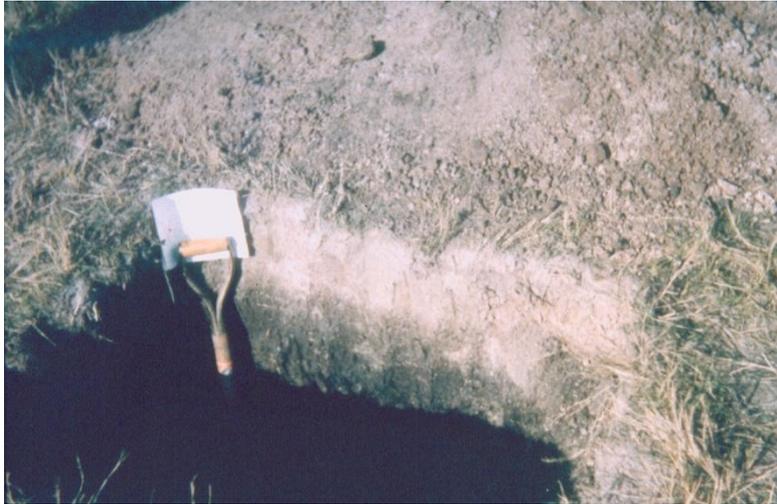


Figura 8. Perfil de un Natracualf típico del norte de la Pampa Deprimida (Verónica).
Obsérvense los horizontes superficiales pobres en materia orgánica y el horizonte nátrico subyacente.

Tabla 8. Propiedades de un suelo sódico (Natracuol típico) de la Pampa Deprimida.

Horizonte	Prof cm	Arcilla %	CO ₃ Ca %	C. Org. %	C.E. dS m ⁻¹	pH	SAR %
A	0-12	22,4		3,53	1,6	6,7	6,7
BA	Dic-21	24		1,62	2	7,6	9,7
Bt1	21-32	34		0,46	2,8	7,9	16,2
Bt2k	32-48	32	vestigios	-	3,5	8,4	23,5
BCkm	48-72	-	12,3	-	3,8	8,4	23
BCK	72-	-	9,5	-	4,5	8,4	24



Figura 9. Perfil de un Natracuol típico del sur de la Pampa Deprimida (Azul).
Obsérvese el horizonte superficial rico en materia orgánica y el horizonte nátrico subyacente, con carbonatos en la masa en profundidad



Figura 10. Perfil de un Natracualf típico del partido de Ameghino (Provincia de Buenos Aires), con eflorescencias salinas desde la superficie.

Las características de estos ambientes han limitado la difusión de la agricultura. Estas áreas se caracterizaron históricamente por ser básicamente ganaderas, basadas en el pastoreo extensivo sobre pastizales naturales, más o menos degradados, que cubren el área. Las pasturas cultivadas presentan dificultades de supervivencia, dado que las especies exóticas no se adaptan fácilmente a este ambiente tan extremo y fluctuante. Sin embargo, los altos precios de los granos, en los últimos años, favorecieron la irrupción de la agricultura. La agriculturización se inició en las lomas. Estas constituyen la parte alta del paisaje, que poseen los Molisoles (principalmente Argiudoles) dominantes de la Región Pampeana. Estos suelos de lomas son de alta calidad agrícola, pero ocupan pequeñas superficies, que poseen una distribución irregular y están inmersos en un entorno de suelos halo-hidromórficos. El crecimiento de la agricultura trajo consigo que ciertos suelos halo-hidromórficos, particularmente de las medias lomas y tendidos, también fueran cultivados. En estos casos la producción es de alto riesgo. En los suelos que no entraron en la agricultura se produjo una intensificación de la actividad ganadera.

En la Tabla 9 puede observarse la superficie afectada por salinidad para las Pcias de Bs As, Sta Fé, Córdoba y E. Ríos.

Tabla 9. Inventario de suelos afectados por salinidad según provincia y región (Atlas de Suelos de la Rep. Argentina, PNUD, INTA, SAGPyA (1990)).

Provincia	Superficie afectada (ha)	Superficie afectada en relación a la provincial (%)
Buenos Aires	10.743.107	35
Córdoba	2.305.000	16
Entre Ríos	665.751	8
Santa Fe	5.124.515	39
Región Pampeana	19.401.646	

SALINIZACIÓN POR RIEGO COMPLEMENTARIO

En zonas húmedas o subhúmedas las características del ciclo hidrológico, las relaciones agua-suelo-planta, y las particularidades ambientales son diferentes a las de las zonas áridas. El riego es complementario del régimen natural de precipitaciones. El agua utilizada para regar se origina en aguas subterráneas, las que aún cuando posean buena calidad, siempre tendrán sales disueltas en su composición. Dado que el riego es complementario, en zonas húmedas las sales depositadas en superficie por el riego pueden ser lavadas nuevamente en profundidad por las lluvias subsiguientes. Aún así, se han observado procesos de salinización superficial en suelos pampeanos luego de varios años de riego complementario.

Los pronósticos de afectación de los suelos por el riego, válidos para zonas áridas, no son aplicables directamente a las condiciones de riego complementario en zonas húmedas. Por esa razón, hasta que no se desarrolle un cuerpo de conocimiento suficiente a nivel local, no existe una forma sencilla de calificar las aguas para riego complementario en la Región Pampeana.

PARTE III

INFLUENCIA DE SALES Y SODIO SOBRE EL SUELO

EFFECTOS SOBRE LOS CULTIVOS

Los suelos salinos y los suelos sódicos no se encuentran absolutamente separados, pero en general los primeros tienden a predominar en regiones áridas y semiáridas y los segundos en las regiones húmedas. El diagrama que se presenta en la Figura 11 esquematiza la influencia del halomorfismo sobre suelos y plantas.

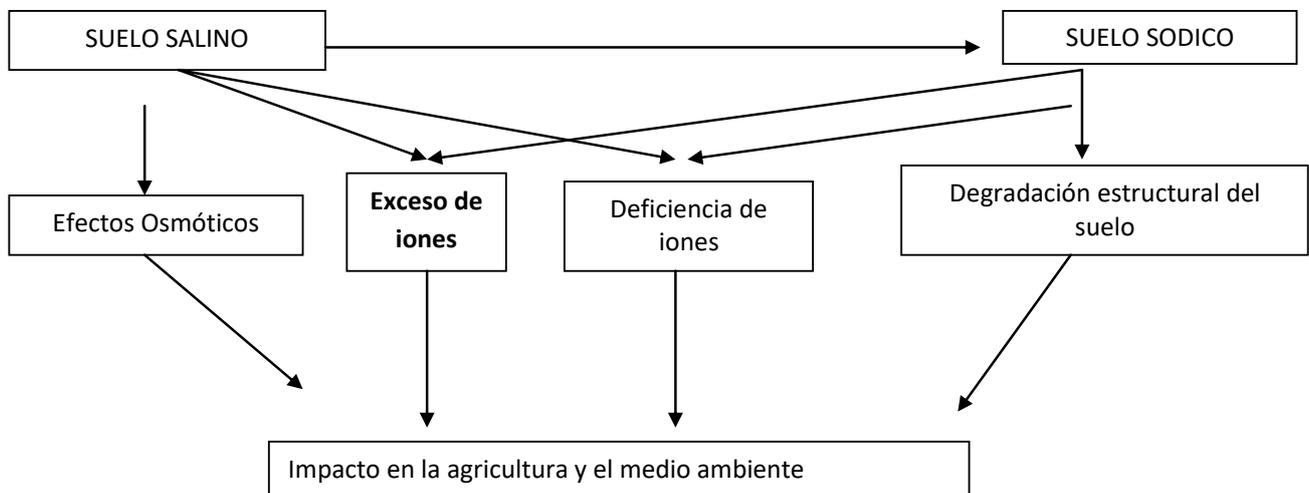


Figura 11. Efecto de las condiciones de salinidad y alcalinidad sobre el ambiente y el crecimiento y nutrición de las plantas.

INFLUENCIA DE LA SALINIDAD

La presencia de sales solubles (cloruros y sulfatos), eleva el componente osmótico en el potencial agua de los suelos. El resultado es la menor disponibilidad del agua para las plantas. La tolerancia a las sales es la capacidad que tiene una planta de mantener los principales procesos fisiológicos, especialmente el crecimiento, en un medio salino. El aumento en el contenido salino del suelo produce el retraso y la disminución de las tasas de germinación, emergencia y crecimiento, y puede provocar la muerte de las plantas.

Esto se observa en la Figura 12 para el caso de la soja. En una primera fase este efecto es no específico: depende más del estrés hídrico debido a la caída en el potencial agua causado por el aumento en la concentración total de sales solubles. En una segunda fase, aparecen efectos debido a los iones tóxicos. Por otra parte, un ambiente salino puede provocar desórdenes nutricionales, que son el resultado de la disponibilidad del nutriente, de la absorción, o de la partición dentro de la planta.

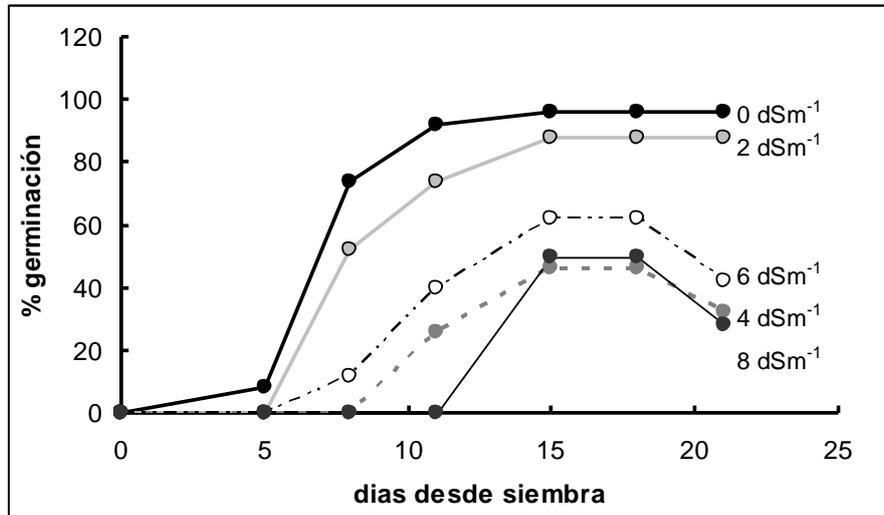


Figura 12. Evolución del % de germinación de soja bajo distintos niveles de salinidad (Bustingorri y Lavado, 2008)

La tolerancia de las plantas a la salinidad depende de la capacidad de éstas para regular la absorción selectiva y la acumulación de iones. La velocidad a la que se acumulan iones tóxicos en tallos y hojas depende principalmente de la capacidad de las raíces de excluir a las sales del flujo de transpiración y también del volumen de agua transpirado. Cualquier factor que reduzca la cantidad de agua transpirada por unidad de carbono fijado también reduce la tasa de acumulación de sales en las hojas y por lo tanto prolonga su vida. Esto puede ocurrir si la planta tiene una alta eficiencia en el uso del agua, o crece bajo condiciones de baja demanda atmosférica de agua.

La salinidad causa normalmente una caída en la producción de biomasa aérea y subterránea, afectando más a una u otra según la especie vegetal. En los cultivos causa una importante caída del rendimiento de la parte cosechable. Un ejemplo simplificado se presenta en la Figura 13.

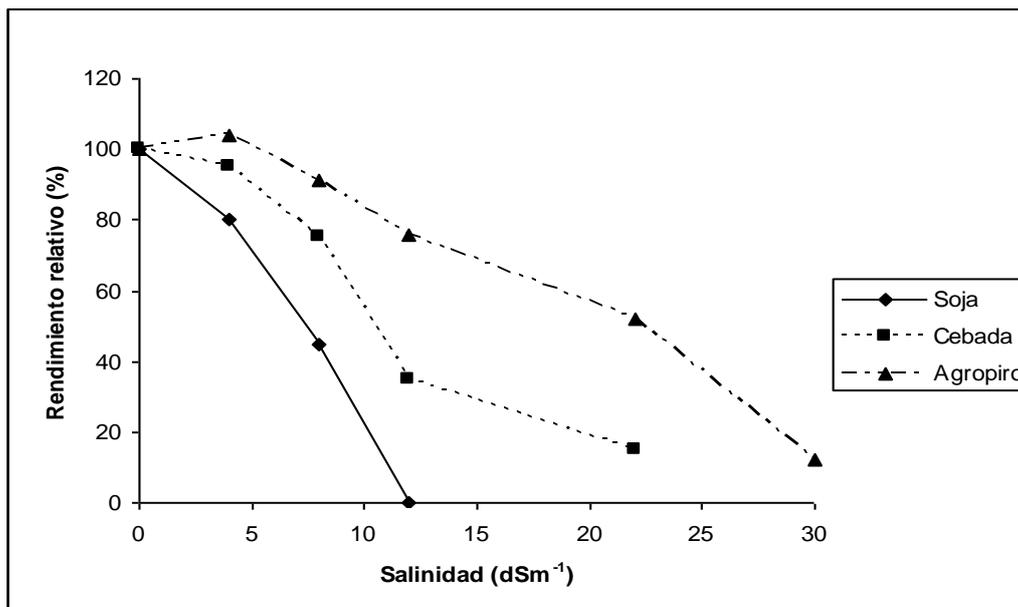


Figura 13. Disminución porcentual de los rendimientos de soja, cebada y agropiro en suelos salinos.

La dispersión temporaria no necesariamente ocurre en toda la superficie, sino en micrositios encharcados. Las arcillas dispersadas normalmente refloculan dentro de un período de horas. Se estima que concentraciones de alrededor de $3\text{-}5\text{ meq l}^{-1}$ son suficientes para prevenir la dispersión de las arcillas por floculación. Esta concentración se logra aún con la presencia de CaCO_3 en la masa del suelo, pero la concentración de la solución en la superficie del suelo depende de la concentración del agua agregada. Si ésta es agua de lluvia la concentración, es extremadamente baja. Por estas razones se produce la formación de costras superficiales en muchos suelos halomórficos (Figura 15).



Figura 15. Costra superficial desarrollada en la superficie de un suelo sódico (gentileza de Ramiro Bandera, INTA EEA General Villegas).

Estas costras se endurecen cuando el suelo se seca, y reducen marcadamente la emergencia de plántulas, como se muestra para el caso de colza (Figura 16). Otra característica distintiva de los suelos sódicos es la baja movilidad del agua. Por un lado, ello se debe a que gran parte del agua está fuertemente retenida a las arcillas y permanece prácticamente inmóvil (“agua muerta”). Por otro lado, el sistema de poros se encuentra colapsado por la inestabilidad de los agregados.

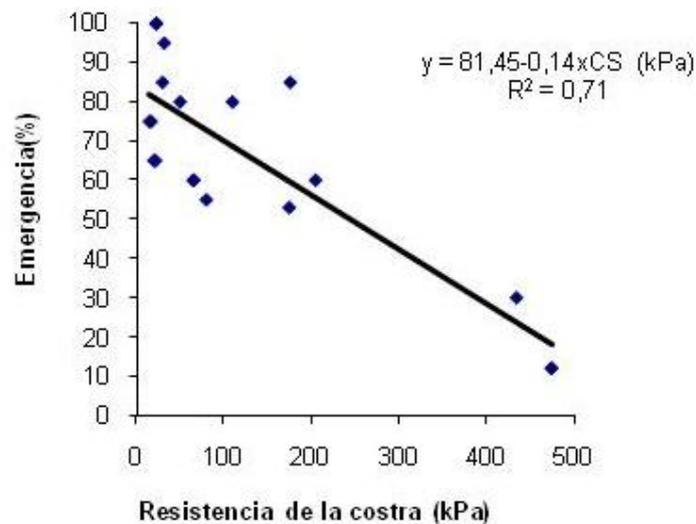
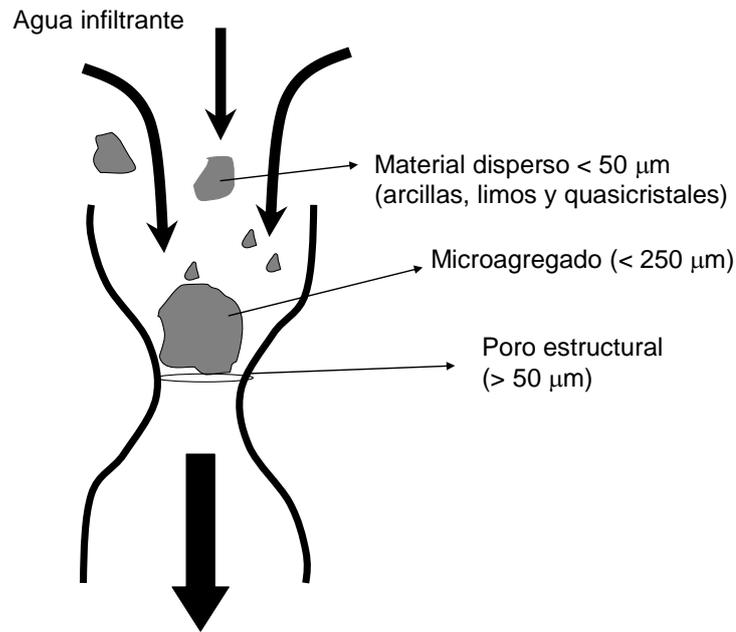


Figura 16. Efecto de la resistencia de costras superficiales sobre la emergencia de colza (Gutiérrez Boem y Lavado, 1996).

En la Figura 17 se presenta esquemáticamente cómo sucede la oclusión o taponamiento de poros por microagregados dispersos que migran. Estos microagregados ($< 0,25\text{ mm}$) quedan atrapados por poros de diámetro más pequeño que el tamaño del material disperso que migra. Esto no sucede en suelos que poseen buena estabilidad de agregados y poros.



Oclusión de poros estructurales causa pérdidas de permeabilidad

Figura 17. Esquema que muestra cómo se produce la oclusión de poros estructurales superficiales, como resultado de la migración de partículas y microagregados diámetro inferior al diámetro de poro ocluido.

Como resultado de la oclusión del sistema de poros, se produce la disminución en la tasa de infiltración (entrada de agua al suelo). Existe una relación directa e inversa entre la tasa de infiltración y el porcentaje de sodio intercambiable de un suelo (Figura 18). Del mismo modo sucede con la conductividad hidráulica saturada, que es el parámetro que caracteriza la permeabilidad o velocidad con se mueve el agua a través del suelo (Figura 19).

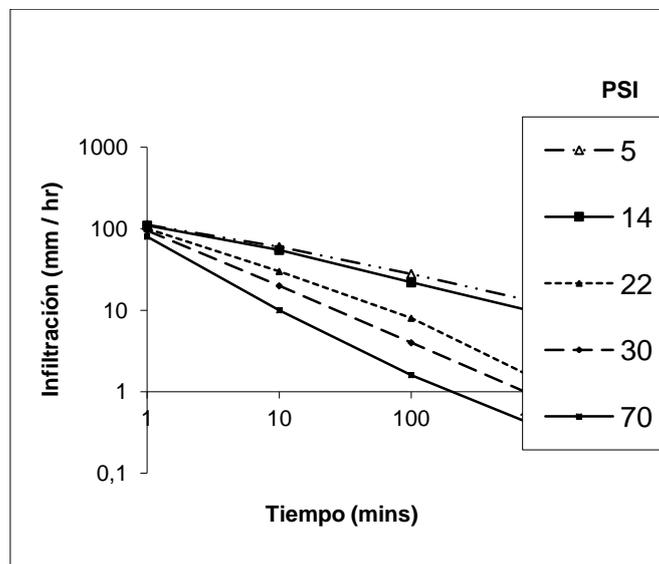


Figura 18. Caída de la tasa de infiltración con el aumento de porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (adaptado de Painuli y Abrol, 1986).

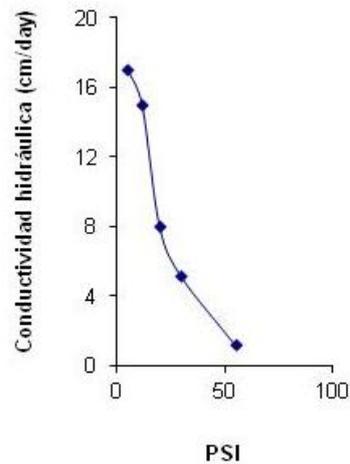


Figura 19. Relación entre porcentaje de sodio intercambiable y la conductividad hidráulica (adaptado de Emerson, 1984).

En la siguiente gráfica (Peinemann, N. 1997) puede observarse la influencia de la concentración de sales (CE) sobre la Conductividad hidráulica (K) según diferentes PSI del suelo. Por lo cual puede inferirse que la acción del Na^+ sobre los coloides (hinchamiento-dispersión) se ve contrarestanda por la presencia de sales en la solución (Suelos salino sódicos) (Figura 20).

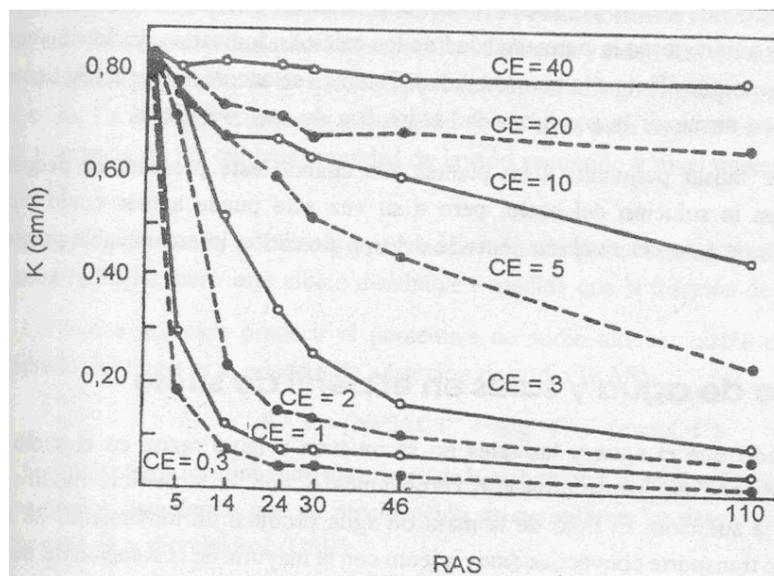


Figura 20. Efectos de la salinidad (CE) y sodicidad (RAS) sobre la conductividad hidráulica (K).

Cuando el suelo posee costras superficiales compactadas y cementadas, la infiltración es limitada y se origina un régimen de humedad extremo y en muchas oportunidades alejado de lo esperable por el clima del lugar. Las bajas tasas de infiltración resultan en anegamientos temporarios después de la lluvia, causando una zona de humedecimiento poco profunda con sobresaturación hídrica y problemas de aireación. En ese sector del perfil tienen lugar procesos reductivos que afectan a algunos nutrientes y pueden originar sustancias tóxicas. Otra consecuencia es el escurrimiento superficial y eventuales procesos erosivos. Cuando cambian las condiciones climáticas el suelo puede sufrir considerables pérdidas por evaporación.

Por lo tanto, la capacidad total de almacenamiento hídrico en los suelos sódicos se reduce, debido a la entrada restringida de agua (Figura 21). La capacidad de almacenamiento de agua de esta zona de humedecimiento poco profunda es muy baja, por lo que el suelo sólo puede satisfacer por un corto lapso los requerimientos hídricos de las plantas. Esta es la razón de las particulares características de sequía inducida que presentan los suelos alcalinos.

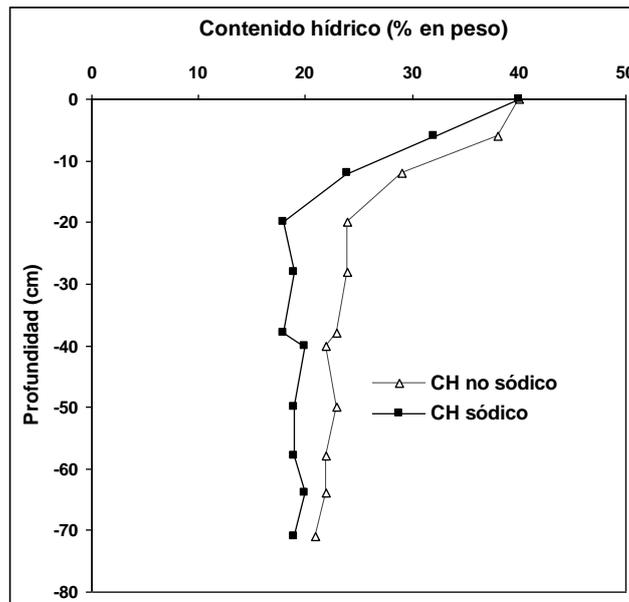


Figura 21. Almacenamiento de agua después de la lluvia, en el perfil en un suelo normal en comparación con uno sódico (adaptado de Paunuli y Abrol, 1986).

El movimiento del agua en el perfil depende fundamentalmente de la distribución de tamaños de poros y su geometría. Debido a los fenómenos de hinchazón, una parte considerable del agua del suelo se encuentra en poros finos retenida fuertemente en las partículas sódicas. El agua se presenta en estado semisólido y no puede ser removida. En casos extremos esta masa de agua llena los poros y los obtura, reduciendo adicionalmente la conductividad hidráulica. En síntesis los suelos sódicos, poseen bajas tasas de ingreso de agua al perfil y bajos niveles de conductividad hidráulica, disminuyendo la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo (Figura 21). Además, estos suelos poseen baja disponibilidad de agua para los vegetales. Esto se debe a que suelen tener altas succiones mátricas y bajos coeficientes de difusividad del agua. Como resultado, el agua presente se encuentra prácticamente inmóvil o, como a menudo se califica, como “agua muerta”.

Los movimientos del agua dentro del suelo, incluyen la redistribución de la humedad hacia las raíces. Este flujo no saturado es marcadamente reducido en estos suelos y el aporte del agua almacenada a las raíces, es restringida: el flujo hacia la raíz es, pese a los elevados gradientes de succión generados, tan lento a través de la delgada zona agotada de humedad por la raíz, que esta zona se comporta como un film seco alrededor de las mismas. Esto determina que las plantas deben gastar energía desarrollando sus raíces en forma permanente para tomar agua del suelo y, por otro lado, sufren sequía. La baja fertilidad y utilidad agrícola de estos suelos están, en la mayor parte de los casos, relacionados con esas desfavorables propiedades físicas e hídricas. Adicionalmente, en estos suelos se manifiestan problemas de deficiencias de nitrógeno (particularmente en los suelos muy salinos o muy sódicos), deficiencias de fósforo, problemas de absorción de calcio o potasio, deficiencias de algunos micronutrientes (entre otros el cinc), etc.

Por otro lado, el sodio presente en el suelo puede tener un efecto directo sobre la planta, ya que un aumento de su concentración interfiere en el metabolismo celular, interfiriendo en el transporte de otros iones y causando pérdidas excesivas de agua. Estos daños ocurren primero en las hojas más viejas, que pueden senecer debido al aumento en la concentración del ion. Estos efectos dependen de la habilidad de las distintas especies de compartimentalizar los iones en las vacuolas. A diferencia de lo que ocurre en suelos salinos, en suelos sódicos el exceso de Na va acompañado de una baja concentración de Ca, lo cual puede provocar desbalances iónicos en la planta. La relación entre los iones es más importante que la concentración individual de los mismos. En muchas especies los desordenes fisiológicos se relacionaron más con el balance de iones que con su concentración. El resultado de estos procesos es la gradual caída de los rendimientos de las plantas a medida que la alcalinizada aumenta.

Nota: se recomienda sobre este punto la consulta de la Tirada Interna SUELOS SALINOS Y SODICOS de la CATEDRA DE EDAFOLOGIA.

PARTE IV

ORIGEN DE LAS SALES Y PROCESOS ASOCIADOS

ORIGEN DE LAS SALES Y EL PROCESO DE SALINIZACIÓN

Respecto al origen de las sales y el proceso de salinización Lavado y Taboada (2009), señalan que existen diferentes vías de entrada de sales a los suelos, pudiendo distinguirse entre el acceso desde la superficie y el que ocurre desde el fondo de los perfiles (Figura 22). La salinización por la superficie puede ser importante, principalmente en casos de campos que se encuentren próximos a la costa marina, o a ríos, arroyos o lagunas con aguas cargadas en sales, pero no constituye un fenómeno que alcanza gran difusión geográfica. En la Región Pampeana se descartó que las sales presentes en los suelos posean ese origen (Lavado, 1983). Lo mismo puede decirse de la salinización profunda de origen biológico, por ejemplo de algunos suelos tropicales (suelos sulfato-ácidos). En cambio, sin lugar a dudas, el agua subterránea es la principal vía de entrada de sales al perfil del suelo.

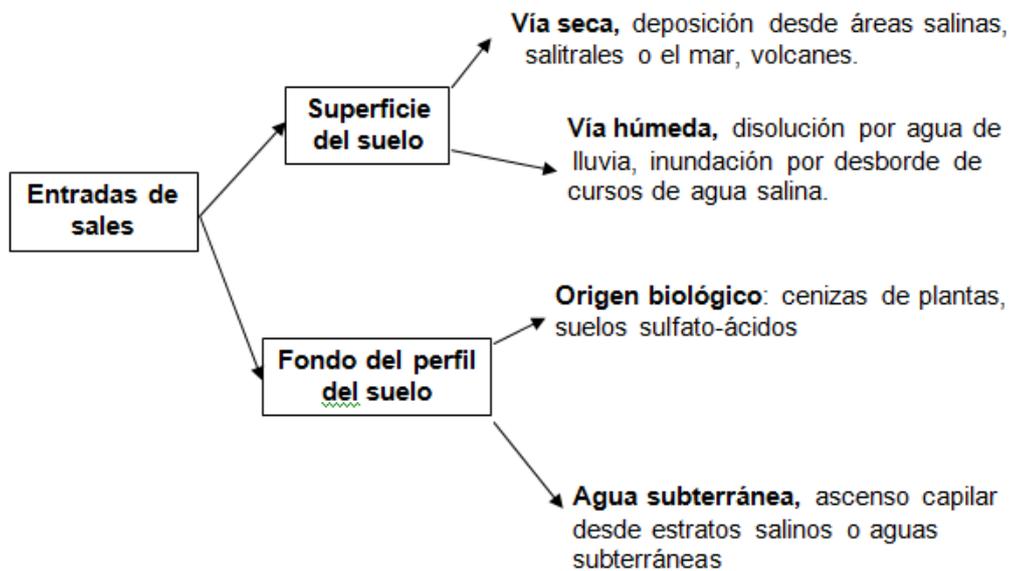


Figura 22. Principales vías de salinización de los suelos

Todas las aguas subterráneas poseen en mayor o menor medida sales disueltas en forma de cloruros, sulfatos y bicarbonatos unidos a cationes como sodio, calcio, magnesio y potasio. La presencia de estas sales en el agua subterránea obedece a que son productos de la meteorización de diferentes tipos de rocas, que luego son arrastrados disueltos con el agua que se mueve a través de los perfiles de suelos y sedimentos. Estas sales pueden ser de origen local o ser transportadas por el agua subterránea. En forma excepcional, estas sales pueden ser el remanente de intrusiones marinas sucedidas hace miles de años.

Aceptando que la principal vía de entrada de sales a los suelos es desde el fondo del perfil, a través del agua subterránea, queda claro que la superficie de los suelos sólo se saliniza cuando la capa freática se encuentra cerca de ella. La pregunta es: ¿cuán cerca? Esta profundidad mínima, llamada profundidad crítica, fue objeto de intensos estudios en el pasado, pero no se logró generar un modelo universal. Depende de las cambiantes condiciones locales. En la Región Pampeana, por ejemplo, depende principalmente de la textura de los suelos, cuando el agua freática no está sujeta a presión (aguas surgentes). Ello se debe que por encima de la capa freática se desarrolla una zona de ascenso capilar, cuya altura es tanto mayor cuanto más fina sea la textura. Así, en suelos arenosos esta zona de ascenso capilar tendrá pocos centímetros de elevación, pues estos suelos carecen de poros capilares. En cambio, en suelos arcillosos la zona de ascenso capilar puede ser de un metro o más. El conocimiento de la profundidad crítica es una variable importante cuando se realizan obras de drenaje, para mantener la capa freática alejada de la superficie.

El concepto de la profundidad freática crítica es desarrollado en la Figura 23, en la cual pueden observarse dos perfiles de suelos idealizados con capa freática cerca y con capa freática lejos de la superficie. Sólo en el primer caso las sales disueltas pueden ser transportadas por el flujo evaporativo de agua y depositarse en la superficie, salinizándola. Debido a que las sales presentes en el agua subterránea son fundamentalmente sódicas, por ejemplo el cloruro de sodio (ClNa), los procesos de salinización superficial van generalmente acompañados por los de sodificación. Cada uno de ellos causa diferente tipo de perjuicios sobre suelos y plantas.

Profundidad crítica en función de la altura freática

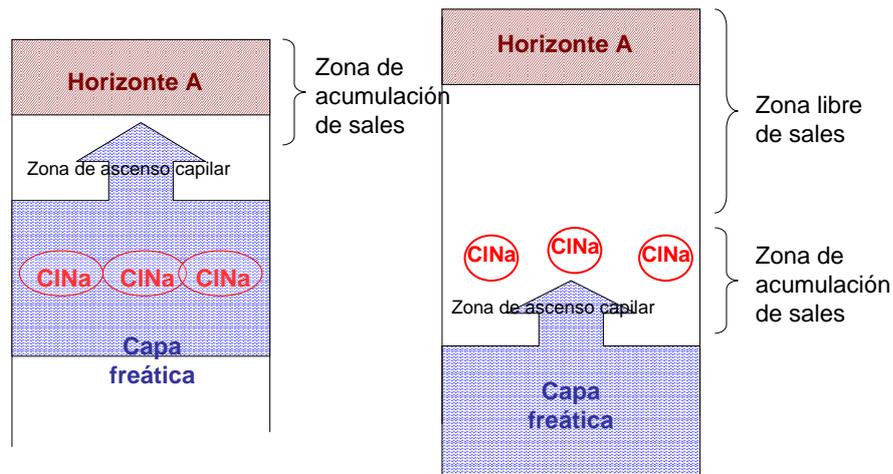


Figura 23. Movimientos ascendentes de sales idealizados: Capa freática cerca de la superficie (izquierda) y lejos de la superficie (derecha).

La Figura 24 muestra un suelo franco arenoso (Amenábar, sur de Santa fe, con capa freática cerca de la superficie, y la salinización superficial resultante de ello.



Figura 24. Suelo franco arenoso (Amenábar, sur de Santa fe) con capa freática cerca de la superficie (izquierda). Sales depositadas sobre la superficie de este mismo suelo (derecha)

Pepi et al. (1998) relacionaron el contenido salino del agua freática (CEA) con los contenidos de arcilla y limo de suelos del Noroeste Bonaerense:

$$CEA (dS m^{-1}) = 0,2 \text{ arcilla} + \text{limo}^{-1,14} \quad r^2 = 0,39 \quad P < 0,01$$

Sin embargo, a menudo los procesos de salinización son menos simples que el arriba descrito. Ello sucede típicamente en la mayor parte de los suelos de campos bajos, los cuales no poseen un perfil homogéneo como el de la Figura 24, sino uno heterogéneo, compuesto por diferentes horizontes. En particular, es importante la influencia del denominado horizonte nátrico, el cual posee elevado contenido de arcilla con alto porcentaje de sodio. Esto determina una muy baja permeabilidad en este horizonte, con lo cual se limitan los flujos ascendentes y descendentes de agua a través del perfil.

En la Figura 25 se muestra el perfil de un suelo sódico del norte de la Pampa Deprimida, con la presencia de un fuerte horizonte B con estructura columnar, típica de muchos de estos horizontes.



Figura 25. Suelo sódico del norte de la Pampa Deprimida (Uribelarrea, partido de Cañuelas) con la capa freática en el fondo del perfil (izquierda); detalle el horizonte B con estructura columnar (derecha).

Fotografía: gentileza Francisco Damiano (INTA)

PROCESOS ASOCIADOS A SALINIZACIÓN EN LA REGIÓN HÚMEDA Y SUBHÚMEDA

Coincidente con lo expresado anteriormente por Lavado y Taboada (2009), para las características y condiciones del área Pampeana Central del país, zona húmeda y subhúmeda, Cisneros y otros (2008) señalan que para la comprensión de la dinámica de las sales en ésta área se deben considerar otros procesos asociados a los ambientes salinos, también llamados hidrohalomórficos o humedales continentales salinos, por la asociación estrecha que existe entre el exceso de sales y el exceso de agua. Los procesos que interactúan en estos ecosistemas complejos son la salinización, la sodificación y la alcalinización, vinculados al **halomorfismo**, y el anegamiento, la inundación y la sedimentación relacionados al **hidromorfismo** (Figura 26).

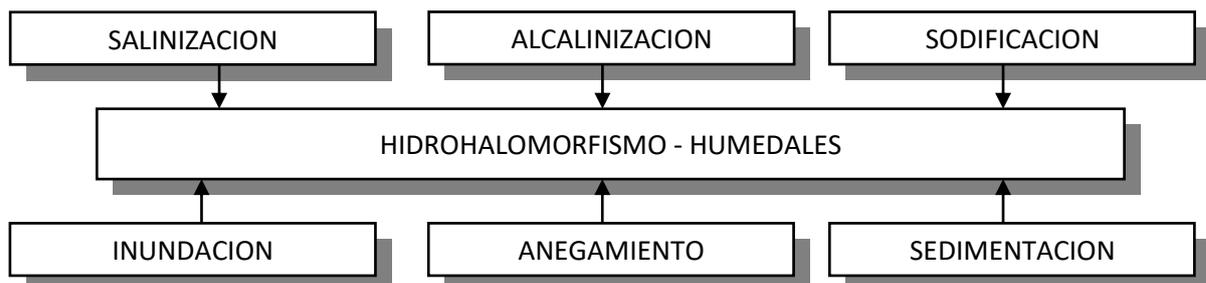
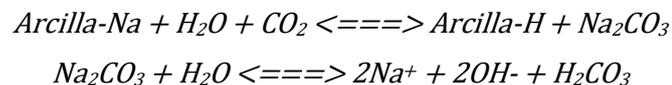


Figura 26. Procesos involucrados en los suelos con exceso de agua y sales.

La **salinización** es el proceso de acumulación de sales solubles en el suelo, el cual se da por la presencia de una fuente de sales y por condiciones que hacen que los procesos de acumulación predominen sobre los de eliminación de sales (Darab, 1981). La principal fuente de sales en estos ambientes es el **agua subterránea o napa freática (NF)**, la cual está sujeta a complejas relaciones de recarga (ascenso hacia la superficie del suelo) o descarga (descenso), y de dilución–concentración, responsables principales del proceso dinámico de acumulación de sales en el suelo. Las principales sales involucradas en este proceso son los Cl^- y SO_4^{2-} en especial de Na^+ , y en menor medida CO_3^{2-} + CO_3H^+ de Ca^{2+} y de Mg^{2+} .

La **sodificación** se inicia con un elevado contenido en Na^+ en la solución del suelo en relación con el Ca^{2+} y Mg^{2+} , dando lugar al incremento de este ión en el complejo de cambio, lo que provoca, dada su baja densidad de carga, el aumento del espesor de la doble capa difusa (hinchamiento de arcillas), repulsión entre los coloides y, con ellos, la dispersión de la arcilla y la solubilización de la materia orgánica. Es generalmente admitido que para que el sodio juegue un importante papel en la evolución del suelo, la concentración de este catión de cambio ha de superar el valor crítico del 15%, o sea $\text{Na} / \text{S} > 15\%$ (S = suma de otros cationes adsorbidos)

La **alcalinización** del suelo es un proceso que está asociado al exceso de Na^+ , de cambio. Las arcillas saturadas en sodio en presencia de agua de lluvia y CO_2 disuelto, hidrolizan liberando Na^+ y OH^- a la solución del suelo incrementando el pH del suelo a valores superiores a 8.



Dentro del hidromorfismo, el **anegamiento** es el proceso de saturación con agua del perfil por efecto del ascenso del nivel freático, generando además de salinización-sodificación, condiciones de falta de oxígeno para las raíces, y de falta de estabilidad para el tránsito (falta de piso). Es un proceso de recarga rápida de la freática, en especial por precipitaciones, y es el principal problema en términos económicos, ya que puede afectar tierras de alta productividad.

La **inundación**, ocurre cuando ingresa agua por escurrimiento superficial a un área provenientes de otras zonas y se reconocen en general tres tipos: la inundación torrencial o súbita y la de tipo aluvial o lenta (producida principalmente por desbordes de ríos y arroyos y asociado a lluvia intensas) y la inundación tipo encharcamiento también produce el anegamiento del perfil por saturación. Este proceso requiere, para su comprensión, una visión amplia de la **cuenca hidrográfica** y de su red de drenaje, a los fines de identificar las zonas con riesgo de sufrir este tipo de fenómeno. El agua de inundación puede ser además una importante fuente de sales, y responsable, junto con la freática, del proceso de salinización del suelo.

La **sedimentación** es un proceso que opera en los ambientes de humedales sujetos a inundación, y consiste en la depositación de materiales de suelo que vienen junto con el escurrimiento superficial. Este es un proceso de alto impacto en el funcionamiento de humedales de la Región Pampeana, ya que incrementa y traslada los sitios de inundación, inutilizando los canales y provocando alteraciones en la cuenca baja.

En la Figura 27 se esquematizan los diferentes tipos de flujos de agua y sales que operan en un ambiente hidrohalmórfico típico (modificado de Varallyay, 1981).

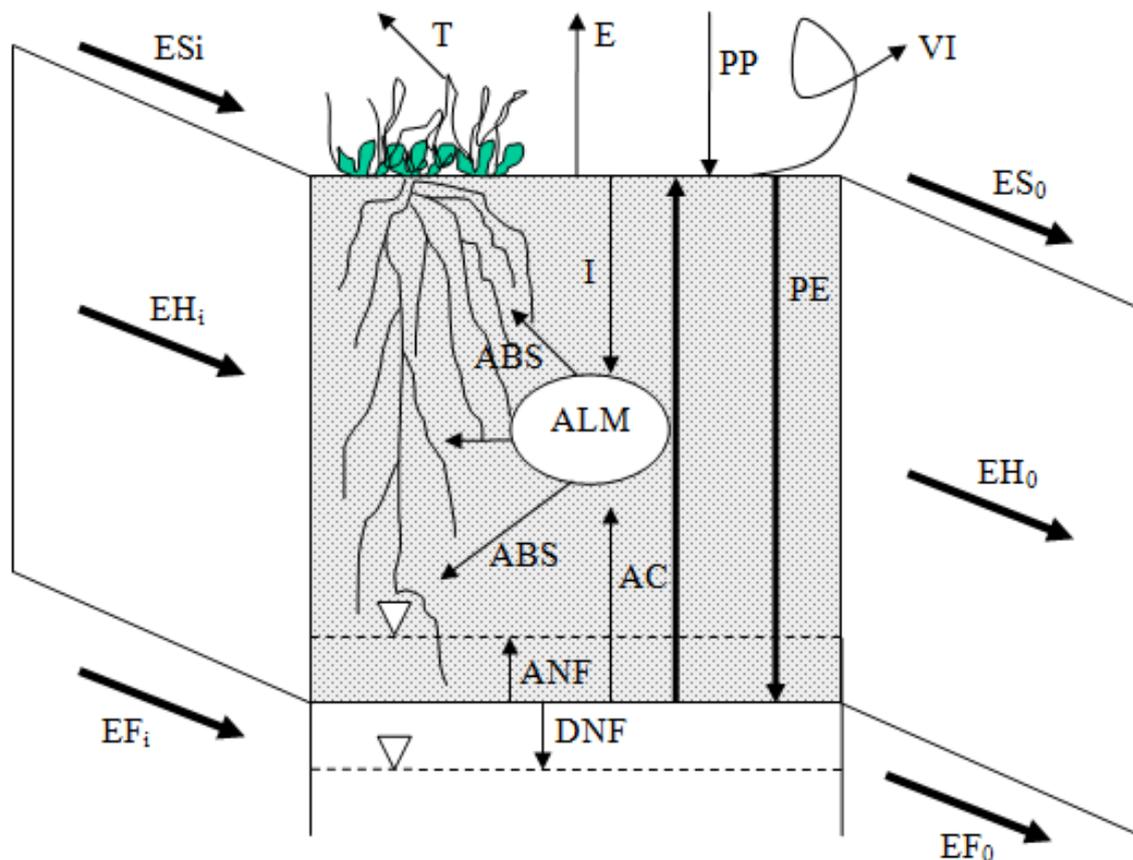


Figura 27. Factores y procesos que afectan el régimen de agua y sales de un suelo salino; ALM = almacenaje de agua en el suelo; PP = precipitación; VI = remoción de sales por viento, ESi = escurrimiento superficial que ingresa; ESo = escurrimiento que sale del área; EHi = ingreso de agua de la zona no saturada (escurrimiento hipodérmico); EHo = agua que sale de la zona no saturada; EFi = flujo freático que ingresa; EFo = flujo freático que sale del área; E = evaporación; T = transpiración, I = infiltración-lavado de sales, PE = percolación (infiltración que llega a la freática), AC = ascenso capilar de agua y sales desde la freática, ABS = absorción de agua por las raíces, ANF, DNF = ascenso y descenso del nivel freático

El análisis de este complejo sistema de flujos de agua y sales permite establecer balances de estos elementos, tanto a nivel de un suelo individual, como a nivel de pequeñas cuencas o áreas relacionadas. Del equilibrio entre los procesos que aportan sales al suelo (ESi, EHi, EFi, y en especial AC) y los que las eliminan ((ESo, EHo, EFo, y en especial I y PE) resultará en la mayor o menor tasa de acumulación de sales en el perfil del suelo y los sitios preferenciales de esa acumulación.

En este sentido estos fenómenos pueden ser percibidos a diferentes escalas, cada una de ellas ejerciendo una relación jerárquica con la inferior, y determinando a su vez, niveles de acción o decisión que afectan el funcionamiento del conjunto y que permiten un adecuado ordenamiento territorial (Montico y Pouey, 2001). Sintéticamente se describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Niveles de percepción en el análisis de la salinización de los suelos

Nivel	Escala espacial (has)	Escala temporal	Ejemplos en la Región Pampeana
Macroregión	106 - 107	Decenas de años (ciclos climáticos)	Bajos submeridionales (SF) Pampa Deprimida (BA) Noroeste bonaerense (BA, LP) Sureste de Córdoba (CBA, SF)
Cuencas hidrográficas	105 – 106	Decenas, años secos y húmedos, eventos anuales	Cuenca La Picasa (SF) Cuenca del Salado (BA) Cuenca Quemú Quemú (LP) Cuenca Tigre Muerto (CBA)
Microcuencas	103 – 105	Ciclos anuales, eventos puntuales	Rufino (SF) Cuenca G. Villegas (BA) Aporte a V. Mackenna (CBA)
Áreas homogéneas	10 - 102	Ciclos anuales, estacionales y eventos	Loma bien drenada, bajo salino-sódico, bajo dulce, laguna (sitios de pastoreo)
Manchones y microrelieves	0, 1 – 1	eventos	Sectores cubiertos, sectores desnudos (peladales),

A la escala de macroregión y cuenca hidrográfica se perciben los grandes ambientes argentinos de climas húmedos y los procesos hidrológicos regionales de inundación-anegamiento. Esta escala permite entender el funcionamiento de las regiones y sus vinculaciones principales, desde cuencas emisoras, áreas de circulación y zonas de recepción, en especial en lo que se denominan ciclos continentales de acumulación de sales. En las regiones que responden a este tipo de ciclo las sales son liberadas de los minerales, luego son transportadas y finalmente se depositan en los sectores deprimidos, o zonas de recepción, tanto de escurrimientos como de solutos.

Ejemplos en la Región Pampeana de cuencas que responden a estos ciclos son las del río Quinto, de los arroyos menores del Sudeste de Córdoba (A. Santa Catalina, del Gato, Ají), la depresión de Mar Chiquita, los derrames del sistema Cuarto-Saladillo, entre otras. Todas estas cuencas responden a la categoría de sistemas hidrológicos típicos (INA, 2000) ya que tienen una red de drenaje definida, con circulación permanente, y en las cuales la transferencia de agua y solutos entre regiones es más rápida, existiendo en ellas procesos de inundación y anegamiento.

Existe otra tipología de cuencas, denominadas sistemas hidrológicos no típicos, que no cuentan con una red de drenaje definida, siendo la circulación del agua lenta y en forma de manto, con presencia de pequeñas cuencas cerradas de funcionamiento más o menos independiente una de otra. El proceso hidrológico predominante es el anegamiento (por inundación y/o ascenso de la freática), al recibir escurrimientos superficiales en mucha menor proporción, y por efecto de desborde. Ejemplos de este funcionamiento es la cuenca La Picasa en el sur de Santa Fe, la depresión de Quemú-Quemú en La Pampa, la cuenca de la laguna El Siete en Córdoba, entre otras.

En las imágenes de satélite presentadas en la Figura 28 pueden observarse ambos tipos de cuencas, a la izquierda se observa el área de derrame de una cuenca típica (abierta al drenaje), se observa la inundación producida por el desborde de arroyos, en la imagen de la derecha se presenta una cuenca no típica (cerrada, de flujo centrípeto), con predominio de anegamiento. Ambas imágenes son representativas de un ciclo climático muy húmedo (1997-2001)

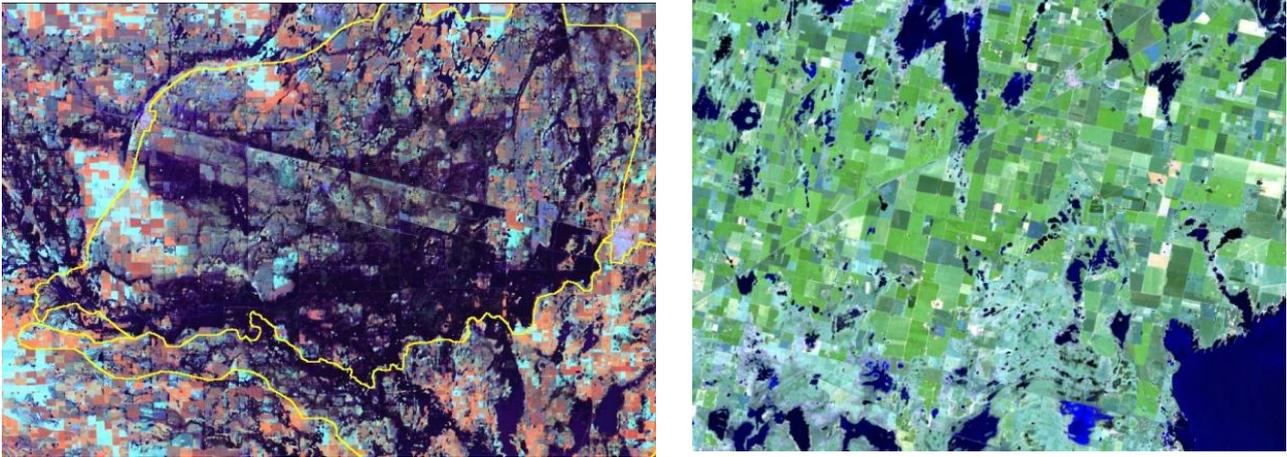


Figura 28. Imágenes satelitales de áreas afectadas por exceso de agua y sales representativas de los dos tipos de cuencas mencionadas en el texto. Izquierda: Depresión de Curapaligue (Córdoba) recibiendo aportes de 2 arroyos, se observa inundación y anegamiento. Derecha: Depresión de La Picasa (Santa Fe), con áreas anegadas (Escala aproximada 1: 700.000, imágenes LANDSAT CONAE).

En un nivel de detalle más preciso, e ilustrando los conceptos de áreas homogéneas o unidades homogéneas para el manejo, uso y pastoreo, la Figura 29 muestra una fotografía aérea en la que se han definido unidades homogéneas representativas de otras tantas comunidades vegetales susceptibles de diferentes tipos de uso. En la Figura 29 también se aprecian sectores con microrelieve o variaciones de productividad en el máximo nivel de percepción.



Unidades homogéneas de manejo



Suelo salino

Figura 29. Izquierda: Detalle de un sector de fotograma en escala 1:20.000 mostrando unidades homogéneas de vegetación y suelo, y el patrón complejo asociado a microrelieves (campo "overo") Derecha: vista de un área salina con manchones de suelo cubierto y desnudo.

PARTE V

DINAMICA DE LA FREATICA E INFLUENCIA DE LA VEGETACION EN AREAS DE SECANO

DINÁMICA DE LA NAPA FREÁTICA: RELACIÓN CON EL CLIMA Y EL RELIEVE

La comprensión del comportamiento de la napa freática, principal fuente de sales al suelo en el área húmeda y subhúmeda de la Región Pampeana central, es esencial para definir el grado e intensidad de la afectación, proponer los mejores usos y adoptar las prácticas de manejo más adecuadas.

Las napas son cuerpos subterráneos de agua que circulan en forma lenta respondiendo a gradientes de pendiente y las variaciones de profundidad en el espacio y el tiempo es producto de las características topográficas del sitio y del equilibrio entre recargas (ascenso) y descargas (descenso). La principal fuente de recarga para es la precipitación, mientras que la descarga se produce principalmente en respuesta a las demandas de evapotranspiración de la atmósfera y secundariamente al escurrimiento subterráneo. En algunas cuencas el escurrimiento superficial es una importante fuente de recarga de la freática por inundación, en sitios localizados.

Este comportamiento se caracteriza por la existencia de ciclos estacionales, relacionado a un balance hídrico local, con períodos de recarga (ascenso) en el semestre cálido y húmedo y de descarga (descenso) en el semestre frío y seco (Figura 30). Asociado a los períodos de ascenso, el nivel freático sufre los efectos de dilución, por lo que durante estos ciclos su concentración de sales es menor, inversamente, en la medida que su nivel desciende se produce un incremento en su salinidad.

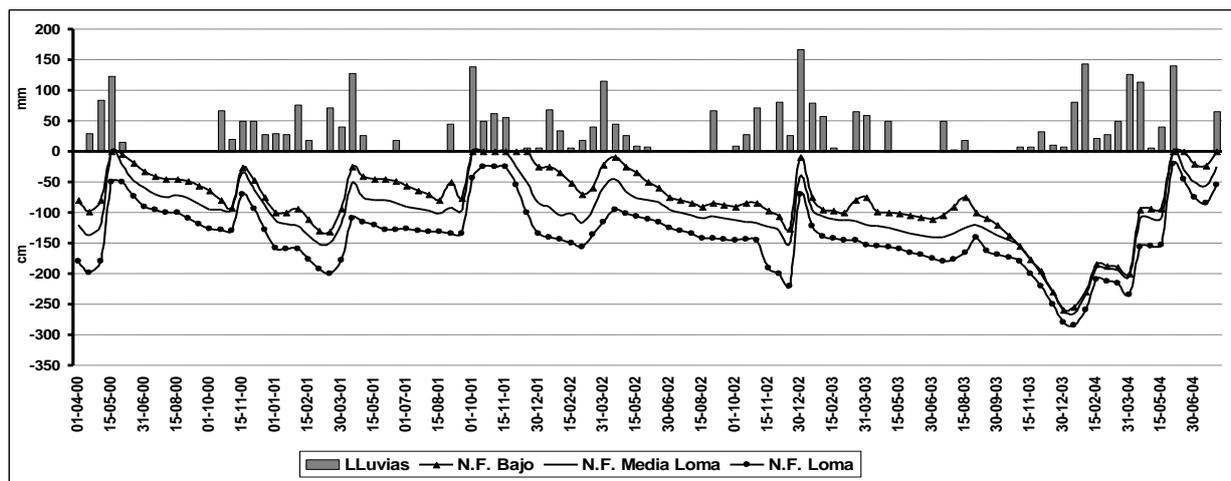


Figura 30. Relación entre la Precipitación la Evapotranspiración potencial y el – Nivel Freático en tres posiciones topográficas de un toposecuencia representativa de ambientes del Area Pampeana Central.

El conocimiento de la oscilación de la freática es uno de los parámetros esenciales para entender, predecir y ajustar los sistemas de producción a sus reales limitaciones y potencialidades, y se realiza de forma sencilla mediante pozos de observación o freatímetros, en los que se va monitoreando quincenal o mensualmente el nivel de la freática en relación a la superficie del suelo, el cual es un parámetro de síntesis del estado hídrico del campo.

Para la región del sur de Córdoba se han desarrollado modelos de tipo conceptual y paramétrico-estadísticos (Cisneros et al., 1997) y de tipo numérico (Degioanni, et al, 2005) que sirven para explicar el proceso de anegamiento-salinización y como herramientas predictivas de la oscilación del nivel freático, para estimaciones de corto plazo (menores a 18 meses). Sobre esta base, Degioanni et al. (2006) han instrumentado un Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones para el sur de Córdoba que permite predecir probables estados de anegamiento o salinización de los suelos a partir de la simulación del nivel freático. En la Figura 31 se observan los resultados de la aplicación del modelo de simulación **Freat1** para un suelo de la cuenca La Picasa.

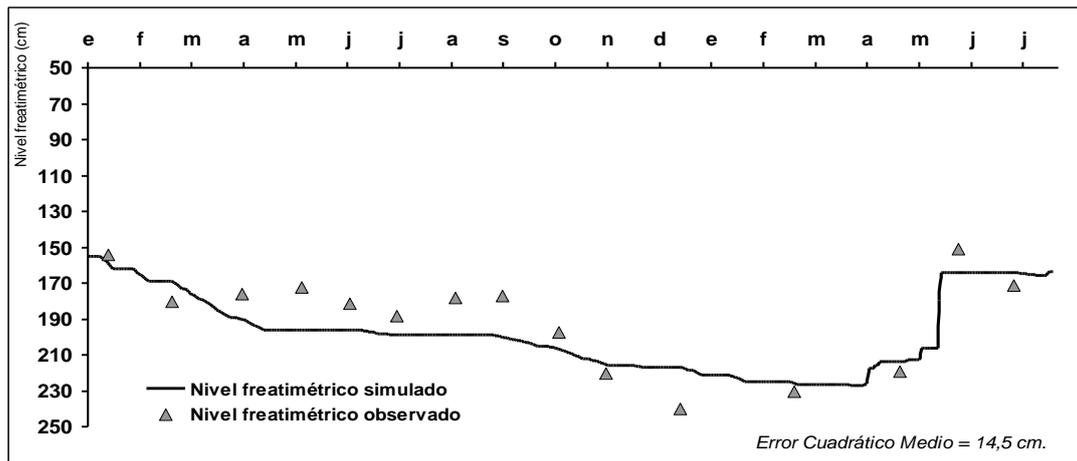


Figura 31. Niveles freáticos observados y simulados con el modelo Freat 1 para un suelo Haplustol éntico, ubicado en la cuenca alta de La Picasa.

Desde el punto de vista del diagnóstico de situaciones hidrohalmórficas, interesa introducir el concepto de *profundidad crítica de la capa freática*, como aquella a la cual el *ascenso capilar* de las sales disueltas en ella, llega hasta la superficie, con una intensidad tal que provoca su salinización. Esta profundidad crítica varía para diferentes tipos de suelo, y está relacionada íntimamente a la textura y estructura del suelo. Para los suelos del área pampeana central la profundidad crítica de la napa se encuentra entre 100 y 130 cm, para suelos arenos francos y francos respectivamente (Cisneros, 1994; Varallyay y Mironenko, 1979; Skaggs, 1980).

En función de la profundidad media de oscilación de las capas freáticas (NF) pueden distinguirse los siguientes comportamientos:

1. NF por debajo de 250 cm, asociadas a suelos bien drenados, no representan riesgos de salinización para el suelo, aunque tampoco pueden contabilizarse como un aporte hídrico suplementario para los cultivos.
2. NF entre 150 y 250, los suelos en estas condiciones se comportan como bien drenados, ya que en estas profundidades no hay aporte de sales por capilaridad a la superficie (capa freática debajo de la profundidad crítica). En estas situaciones es posible que las freáticas se comporten como un aporte adicional de agua a los cultivos, dependiendo de su contenido salino. En algunas regiones los cultivos de soja han mostrado rendimientos significativamente diferentes entre situaciones con y sin napa respectivamente, con diferencias de hasta 3000 kg/ha a favor de los suelos con napa (Martini y Baigorri, 2003). Videla et al (2006) han estimado que la freática en estas condiciones de profundidad pueden aportar más de 200 mm al balance hídrico de un cultivo de soja en suelos de texturas franco arenosa.
3. NF entre 150 y 100 cm, como se mencionó, dentro de este rango de oscilación se encuentran las profundidades críticas para la mayoría de los suelos de la región, por lo tanto se encuentran sujetos a posibles riesgos de salinización o de anegamiento en caso de años con lluvias extraordinarias.
4. NF entre 100 y 80 cm, los suelos en esta situación, en especial en contacto con napas salinas, sufren salinización hasta superficie, por estar la capa freática dentro de la profundidad crítica, lo cual define un comportamiento del suelo principalmente como halomórfico (predominio de la salinización). Los suelos se distinguen además por signos morfológicos típicos de una génesis hidrohalmórfica, como presencia de horizontes sódicos con abundantes moteados, coloraciones grisáceas y desarrollo de duripanes y fragipanes (Gorgas y Tassile, 2003). Son suelos normalmente de aptitud de uso ganadera, aunque en algunos ciclos climáticos pueden aprovecharse para cultivos ocasionales. Videla et al (2006) encontró que el cultivo de soja en suelos con algunas de estas características (ej. alcalino-sódico) las mermas de rendimiento comparadas con suelos agrícolas son debidas a la disminución en el número de plantas por metro cuadrado y el número de granos por vaina.
5. NF entre 80 y 40 cm, con períodos de anegamiento menores a 60 días por año. Ocupan posiciones subnormal-cóncavas, en las cuales puede haber emisión o acumulación de agua y solutos. Los suelos sufren intensa salinización debido a la cercanía de la freática, con un comportamiento que puede incluir ciclos de hidromorfismo (predominio de anegamiento - inundación). Son suelos netamente aptos sólo para ganadería, debiendo excluirse el uso con cultivos anuales.

6. NF por encima de 40 cm y períodos de anegamiento - inundación de más de 60 días por año. Ocupan posiciones cóncavas y son receptores de escurrimientos superficiales. Los suelos pueden sufrir una salinización variable, en función de la carga salina de la freática y de los escurrimientos que reciben, comportándose cíclicamente como halo - hidromórficos.

7. NF en superficie, con anegamiento casi permanente. Constituyen lagunas permanentes o temporarias, ubicándose en los sectores más deprimidos. Su función ecosistémica es la de mantención de la biodiversidad y de reservorio de agua freática.

En relación a las variaciones de salinidad de las freáticas, es necesario comprender la existencia de al menos dos, tipos de capas freáticas. Por un lado están las denominadas **napas regionales** (Cantero et al., 1998a; Blarasin y Cabrera, 2005) que son acuíferos que tienen gran extensión y continuidad regional, y que, por lo tanto su recarga responde a un flujo que puede tener extensiones de varios cientos de km. y por esta razón son napas que poseen alta salinidad

Por otro lado existen en la región capas freáticas que no están relacionadas hidrológicamente con las freáticas regionales, y son denominadas **napas locales** o napas suspendidas, las que, debido a la existencia de capas impermeables en el suelo, son alimentadas principalmente con recargas locales de agua de lluvia (Cisneros, 1994; Taboada, 2003). Su composición química depende, por lo tanto, de la que tengan dichas recargas, y por lo general, tienen una menor salinidad y un mayor efecto de dilución por las precipitaciones.

Las características químicas de las capas freáticas se expresan a través de la salinidad total y de la composición de sales. La conductividad eléctrica (CE) es el parámetro más utilizado para estimar el total de sales disueltas (TSD), y se expresa normalmente en dS m^{-1} (equivalente a mmohs cm^{-1} o mS cm^{-1}). La composición química se expresa a través del contenido de cationes y aniones, y la unidad normalmente utilizada es meq l^{-1} .

Los principales cationes encontrados en las capas freáticas de la región son Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} y K^+ , con un neto predominio del primero sobre el resto. En cuanto a la fracción aniónica dominan Cl^- y SO_4^{-2} sobre CO_3^{-2} y CO_3H^- .

En forma sintética se pueden diferenciar en la región dos grandes grupos de capas freáticas de acuerdo a su salinidad y composición:

1. capas freáticas con CE menor de 2 dS m^{-1} : Se caracterizan por su baja mineralización (grado de salinidad) y por una significativa correlación entre profundidad y CE, es decir por un marcado efecto de dilución por lluvias y corresponden generalmente a capas freáticas locales o recargadas por cursos de agua. Constituyen una fuente importante de agua para los cultivos (ver clasificación de niveles freáticos).
2. capas freáticas con CE entre 2 y 12 dS m^{-1} : Se caracterizan por los mayores valores de CE y por una dilución relativamente menor por lluvias. Su potencial de salinización del suelo es alto y su utilidad como fuente para los cultivos es relativa y está sujeta a posible dilución por lluvias.
3. capas freáticas con CE mayor a 12 dS m^{-1} : Corresponden a napas regionales altamente salinas, y con bajo grado de dilución por lluvias. En este tipo de napas se desarrollan una importante flora halófila compuesta por más de 300 especies (Cantero, 1993; Cantero et al. 1998b).

INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN EN LA DINÁMICA DE LAS SALES EN EL PERFIL

En otro capítulo de este trabajo se aborda el análisis de los mecanismos de tolerancia de los vegetales a la salinidad y las posibilidades de mejora genética de este carácter, estableciendo las relaciones que operan en la planta en respuesta a condiciones de salinidad del suelo.

En este apartado abordaremos la relación suelo-planta desde la perspectiva de las modificaciones que genera la vegetación (en especial halófila) en el suelo en los ambientes sujetos a la influencia de la napa. Se analizará su influencia en el movimiento interno y externo de agua y sales, en los sitios de concentración y en los ciclos de retroalimentación que ocurren entre estados de recuperación - degradación de los suelos.

En primer lugar las investigaciones analizaron las diferencias de comportamiento de un mismo suelo en "parches" de vegetación y en sectores desnudos con fuerte salinización (Figura 32), y como fueron

variando sus propiedades al ser sometidos a clausuras al pastoreo. Las propiedades del suelo evaluadas fueron la CE de extractos saturados (CE_{es}), la densidad aparente (DAP), la velocidad de infiltración (VI), el coeficiente de escurrimiento (C) y la salinidad de los escurrimientos (SE). Los resultados encontrados permitieron postular un modelo de funcionamiento de los suelos salinos, que permitió apoyar el desarrollo y la mejora de las técnicas de manejo actualmente en uso para este tipo de ambientes.

En primer lugar ocurre una diferente acumulación de sales en superficie entre los suelos desnudos y cubiertos, producto de un menor ascenso capilar, una mayor infiltración y una menor tasa de evaporación, esto es un equilibrio de flujos que tiende hacia el lavado de sales en superficie.

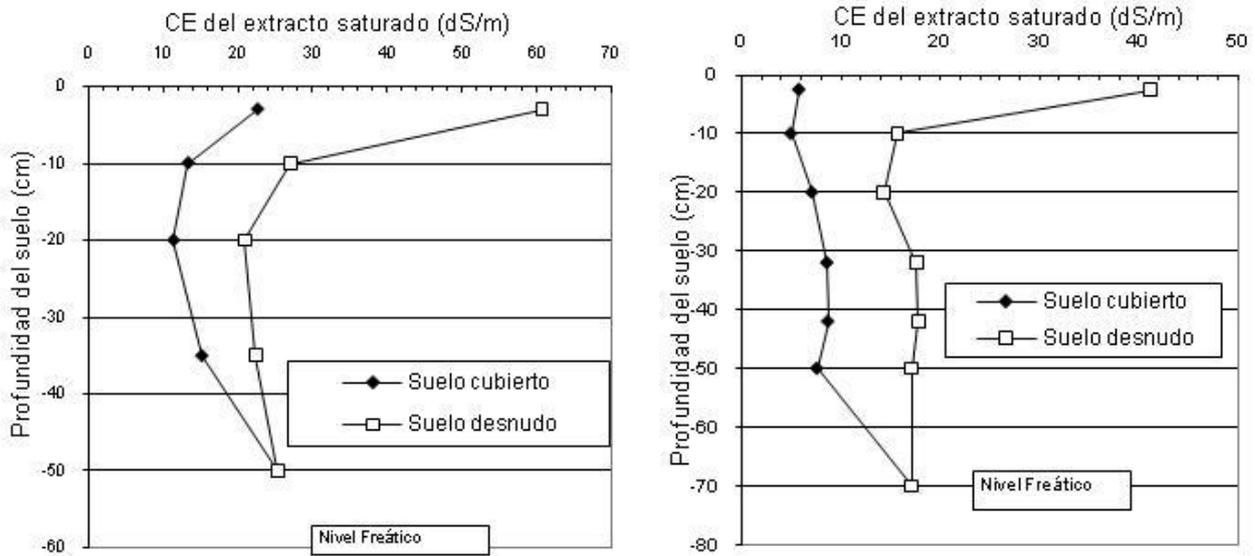


Figura 32 Perfil de concentración de sales en dos suelos representativos de la Pampa Arenosa Anegable, con diferentes niveles freáticos. Izquierda; Duracualf típico, Derecha: Fragiacul típico

La intensidad del lavado de sales está en función del tipo de pastizal, del porcentaje de cobertura del suelo y del tiempo de clausura al pastoreo, que permite la "cicatrización" con vegetación del sitio. La reducción de la concentración salina media del suelo en función del tiempo de descanso fue cuantificada, observándose una tendencia a estabilizarse en valores relativamente más bajos (Figura 33). La reducción de la salinidad global se explica principalmente por los primeros centímetros de suelo, y es menor en proximidades del nivel freático. En los suelos desnudos sometidos a pastoreo continuo, la salinidad global se encontró en valores similares a los del comienzo de la clausura.

La propiedad del suelo que mejor explicaría este comportamiento es la tasa de infiltración del agua, mediante la cual puede estimarse la proporción de la lluvia que efectivamente participa del lavado en profundidad de las sales del perfil. En este sentido las diferencias encontradas entre la condición cubierto y desnudo fueron muy significativas, indicando que la vegetación actúa modificando eficientemente el movimiento de agua y sales en el suelo y entre suelos asociados topográficamente.

En la Tabla 11 se ilustran las diferencias encontradas en 3 propiedades fundamentales: la infiltración en una hora representa la velocidad de paso de agua en el suelo en profundidad, el coeficiente de escurrimiento es la proporción de la lluvia en condiciones de escurrir, es decir de perderse como fuente de lavado de sales, como generadora de inundaciones en suelos más bajos, o como generadora de condiciones de anoxia en el propio suelo, y por último se indica la cantidad de sales que es capaz de transportar el agua escurrida, y que transfiere una importante concentración de sales a los suelos ubicados en posiciones más bajas.

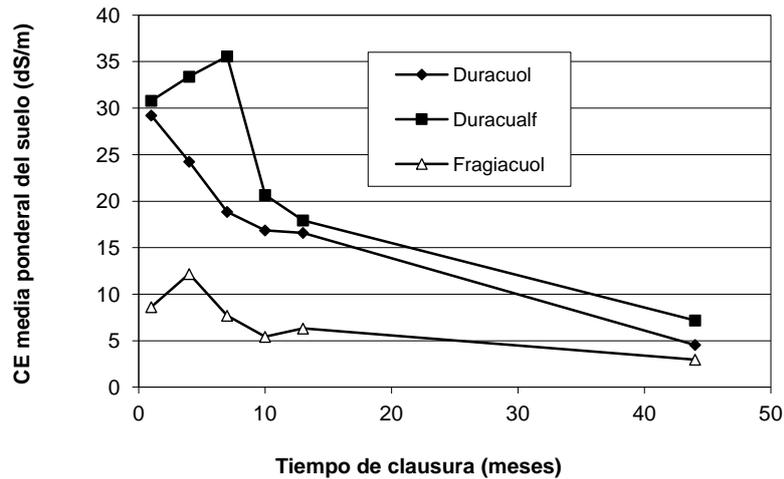


Figura 33. Variación temporal de la CE ponderal de 3 suelos representativos de la Pampa Arenosa Anegable en función del tiempo de clausura al pastoreo (Adaptado de Cisneros et al., 1998).

Tabla 11. Infiltración en una hora, coeficiente de escurrimiento y salinidad del escurrimiento generado, en 3 suelos representativos de la Pampa Arenosa Anegable, para dos condiciones de cobertura/pastoreo (Adaptado de Cisneros et al., 1998)

Tipo de suelo	Velocidad de Infiltración a 1 hora (mm h ⁻¹)		Coeficiente de Escurrecimiento (%)		Salinidad del escurrimiento ¹ (gr sal lt ⁻¹ m ⁻² 50 mm ⁻¹)	
	Cubierto	Desnudo	Cubierto	Desnudo	Cubierto	Desnudo
Duracuol	39	≈ 0	34	80	1.6	270.5
Duracualf	58	≈ 0	37	96	24.2	349.3
Fragiacuol	22	≈ 0	47	82	3.3	163.7
Promedio	39	≈ 0	42	90	9.0	184.3
Valor P	< 0.01		< 0.01		< 0.01	

¹Este valor indica la cantidad de sales transportadas por el escurrimiento por cada m² de suelo y cada 50 mm de precipitación (datos obtenidos mediante simulador de lluvias).

Estos datos estarían mostrando la existencia de dos tipos de funcionamiento de los suelos salino-sódicos con influencia de napa. En los **suelos cubiertos** habría una tendencia a la reducción de la salinidad superficial, tanto más marcada cuanto mayor es el tiempo de descanso del pastizal. La mayor infiltración explicaría las mayores tasas de lavado de sales, junto con un menor ritmo de ascenso capilar dado por menor calentamiento del suelo, mayor desecamiento en profundidad, lo cual reduce la conductividad capilar y el aporte de sales a superficie. En una escala de tiempo estos procesos se asocian en ciclos de retroalimentación positiva hacia la desalinización del suelo hasta un nuevo estado de equilibrio, con mejores posibilidades de germinación/establecimiento de nuevas especies en un ambiente más libre de sales.

En sentido contrario los **suelos desnudos** tienden a concentrar mayor cantidad de sales en superficie, con lo cual también aumentan los procesos de sodificación – dispersión de arcillas, reflejada en tasas de infiltración cercanas a cero. En estas condiciones el lavado de sales es prácticamente nulo, y la tendencia es hacia una pérdida de agua y sales por escurrimiento, y a un aumento en el ascenso capilar de sales hacia superficie, en un ciclo de retroalimentación que tiende a mantener una concentración máxima de sales en superficie. En estas condiciones de suelo/pastoreo se hace poco viable el establecimiento de nuevas especies, de no mediar alguna técnica que permita recuperar la cobertura y entrar en el otro ciclo de retroalimentación.

En la Figura 34 se esquematizan los dos modelos de funcionamiento, indicando en cada uno de ellos los principales flujos de agua y sales. El grosor de las flechas indica su magnitud, en líneas punteadas se indican los principales flujos geoquímicos del suelo, y las flechas blancas expresan el carácter dinámico y reversible entre un estado y otro en función del manejo aplicado.

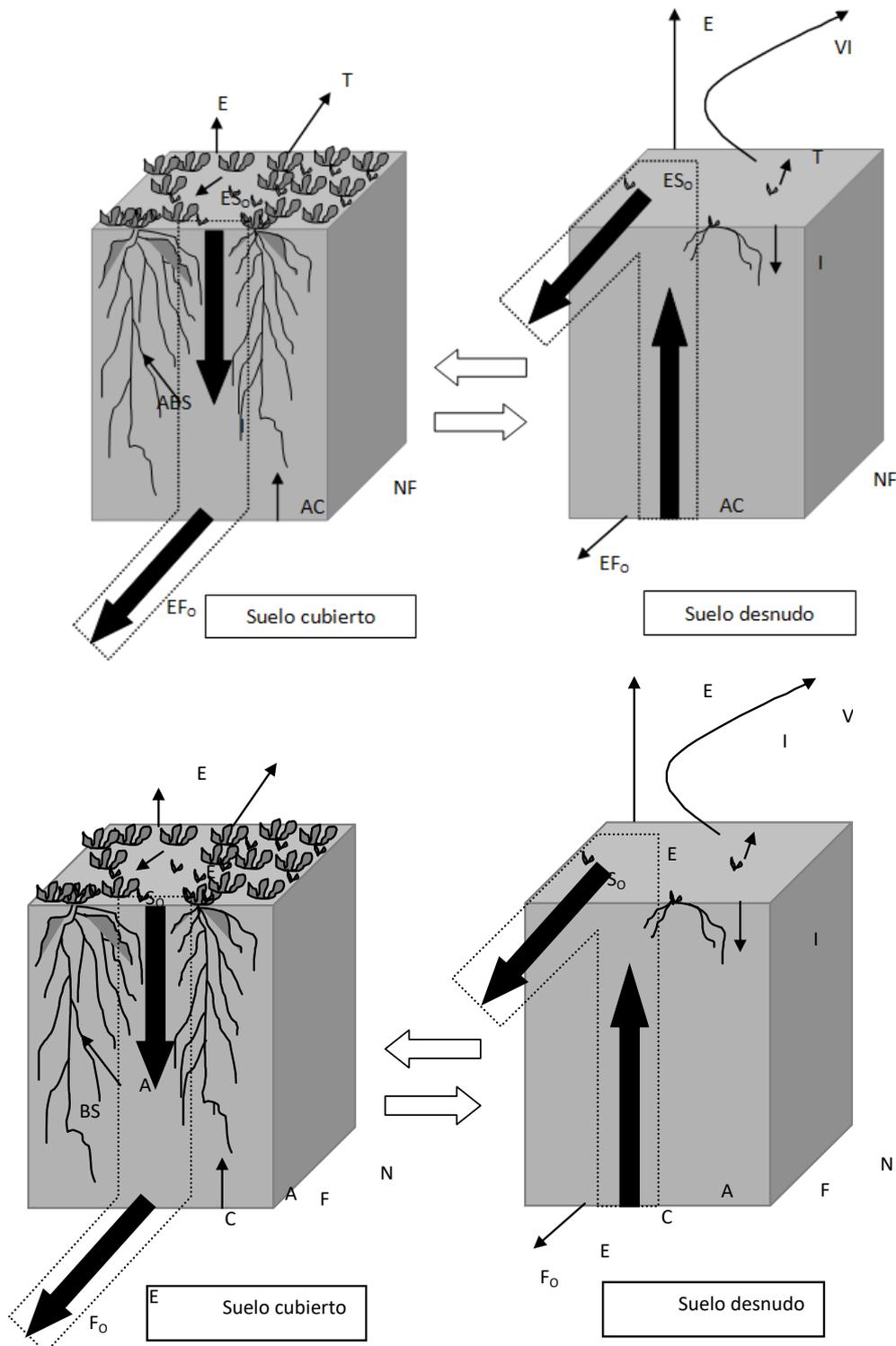


Figura 34. Representación diagramática de los principales tipos de funcionamiento de los suelos salinos en áreas húmedas del centro argentino. Referencias EF₀ = escurrimiento superficial, E = evaporación, ES₀ = escurrimiento subterráneo; ABS = absorción de agua por las raíces; AC = ascenso capilar desde la napa I = infiltración; VI = remoción de sales por viento; NF = nivel freático; T = transpiración.

PARTE VI

SALINIZACION POR RIEGO COMPLEMENTARIO.

UBICACIÓN DEL PROBLEMA

En la Región Pampeana se registra en los últimos años un desarrollo creciente en la utilización de sistemas de riego complementario para la producción de granos y forrajeras, tal como lo indica el aumento de la superficie regada y la evolución en la venta de equipos de riego. Esta difusión del riego complementario puede ocupar un rol clave en el proceso de intensificación de la producción de granos de la Región Pampeada, liberándola de los vaivenes climáticos.

A través de la incorporación de riego suplementario, aplicado con equipos de aspersion, se busca mejorar y estabilizar los rendimientos. El equipo de riego se compone básicamente de un grupo de bombeo que toma agua subterránea y la impulsa a presión, un sistema de tuberías principales y secundarias para la distribución y el sistema de aplicación del agua, generalmente aspersores (Figura 35). De esta forma se practica la irrigación en los cultivos y, simultáneamente, también se puede aplicar fertilizantes solubles (fertirrigación).



Figura 35. Ejemplo de un sistema de riego

La principal fuente de agua para riego son las perforaciones realizadas en los acuíferos, aunque en algunos casos se utilizan fuentes superficiales. Los estudios hidrogeológicos han definido las formaciones que pueden proporcionar agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de riego. Por ejemplo, en la Pampa Ondulada se explota la formación Puelche, cuya profundidad normal de extracción de agua es entre 50 a 80 m, registrándose valores hasta 120 m. El acuífero abastece con agua subterránea con caudales de explotación entre 50 y 150 m³ hora⁻¹.

Pese a su potencialidad productiva, para establecer la sustentabilidad de los agrosistemas irrigados es esencial la identificación de los eventuales impactos negativos que esta tecnología puede ejercer sobre las propiedades del suelo. Los problemas más importantes que emergieron por el uso de esta práctica están asociados con la calidad del agua de riego y sus consecuencias son la salinización y, especialmente, la sodificación del suelo. Ambos procesos ocurren por el aporte de sales por parte del agua de riego y el aumento de la concentración salina de la solución del suelo, cuando el agua es absorbida por el cultivo o se evapora desde la superficie. Es frecuente hallar consecuencias negativas sobre las entradas de agua al suelo, por disminuciones en la tasa de infiltración. Como resultado se produce encharcamiento superficial (Figura 36).



Figura 36. Encharcamiento superficial en un lote regado.

Hay que notar que en estas zonas húmedas el riego no constituye el 100 del aporte de agua. Por el contrario, el agua de riego aplicada constituye generalmente entre el 10 y el 30% del total de agua recibida por el cultivo, siendo obviamente la mayor parte proveniente del agua de lluvia. Pese a esa baja proporción del agua de riego que reciben los suelos regados, existe el riesgo de un impacto ambiental en el mediano a largo plazo.

La tecnología del riego complementario no se ha desarrollado hasta el presente en forma plena en la Región Pampeana, siendo su elevado costo el principal factor limitante de su difusión. No obstante, existe una clara tendencia de aumento en la superficie regada y, excepto en momentos de crisis, se registra un incremento en la venta de equipos de riego. La expansión de la agricultura a regiones semiáridas, siguiendo el aumento de las lluvias en los últimos años, ha abierto nuevas áreas a la irrigación complementaria. Además, otro factor potencial de incremento del área irrigada lo constituyen los proyectos de construcción de acueductos que liberarán agua subterránea para riego en algunas provincias.

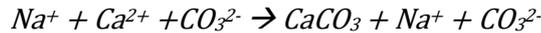
En condiciones de campo se encuentran respuestas variadas a la aplicación del riego complementario. Esto depende de las características del cultivo y su manejo (fecha de siembra, por ejemplo), de la reserva de humedad del suelo al momento de sembrar, de la magnitud del déficit hídrico en los momentos más críticos del ciclo de cada cultivo, etc. Un ejemplo de respuesta espectacular es el de un trigo, cuyos rendimientos pasaron de 4232 kg ha^{-1} en seco a 6295 kg ha^{-1} bajo riego. Inversamente, un caso de ausencia de respuesta fue el de una avena, cuyos rendimientos pasaron de 4234 kg ha^{-1} en seco a 4482 kg ha^{-1} bajo riego. Ambos cultivos fueron sembrados sobre un Argiudol típico de alta fertilidad, en el SE bonaerense (González Montaner, com. personal). Aun en años con escaso déficit hídrico, el riego complementario implicó un aumento de los rendimientos, aunque modesto. En un ejemplo, el rendimiento de maíz pasó de $10.700 \text{ kg ha}^{-1}$ a $12.190 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fontanetto y Darwich, 1995). Sin embargo, lo más importante es la estabilización de los rendimientos interanuales, ya que el riego complementario reduce los problemas de la sequía en los momentos críticos de los cultivos. Por ejemplo anthesis en maíz.

PROBLEMAS QUE SE GENERAN POR EL USO DEL AGUA

Las aguas de riego utilizadas en la Región Pampeana poseen valores de CE comprendidos entre 0.5 y 2.0 dS m^{-1} , una RAS que varía entre 1 y 20 y elevados valores de pH, entre 7.5 y 8.5. También tienen predominio de bicarbonatos sobre los cationes divalentes. Por lo tanto, prácticamente todas las aguas son ricas en sales (particularmente bicarbonato de sodio). Por ello, las aguas de la región se ubican en categorías con cierto riesgo de salinización y/o alcalinización, de acuerdo con los distintos sistemas de clasificación de aguas para riego. Con respecto al contenido de las sales, esto significa que estas aguas pueden usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lixiviación y el drenaje sea bueno. La primera condición puede asumirse que se cumple, porque se trata de riego complementario, para subsanar eventuales deficiencias hídricas estacionales dentro de una zona húmeda o subhúmeda. Las precipitaciones de los periodos más húmedos lixivian en parte los excesos de sales acumuladas. Por otro lado la aplicación de volúmenes reducidos de agua, mediante riegos ocasionales sólo causa un reducido efecto sobre la

posición del agua freática. Por ello, son mínimos los riesgos de salinización secundaria, como consecuencia de las sales aportadas por el agua aplicada.

El aspecto más delicado en estas aguas, como fue destacado en trabajos realizados en el área hace más de 30 años, es la elevada proporción de sodio en relación a los cationes divalentes. Por esta razón, su aplicación sobre suelos con componentes dispersables, arcillas y sustancias húmicas hace prever un deterioro de las propiedades físicas. El elevado contenido de bicarbonatos de estas aguas supera al de los cationes divalentes, por lo cual precipita carbonato de calcio y queda en la solución del suelo carbonato de sodio, denominado residual. La precipitación del calcio, al causar el predominio del sodio, aumenta la porcentaje de sodio intercambiable del suelo, lo que produce dispersión de los coloides.



ANÁLISIS DE ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS

Hasta el presente se han desarrollado numerosas investigaciones en distintos puntos de la Región Pampeana (principalmente Buenos Aires, pero también Santa Fe, Córdoba, La Pampa). Muchos trabajos se llevaron a cabo en condiciones controladas, columnas por ejemplo, sobre suelos de distintas propiedades. En estos casos se intentó utilizar cambios en las concentraciones o mayores volúmenes de agua, para "simular" la aplicación de riego por varios años. Los ensayos a campo cubren el norte el oeste y el sur de la Región Pampeana y en general toman áreas regadas por cierto número de años.

Entre los estudios en condiciones controladas se destaca el de Peinemann et al., (1998). En este caso se aplicaron 150 mm de agua de riego subterránea a distintos suelos. Se observó que la conductividad hidráulica disminuyó y hubo aumentos en el pH y el PSI de los estudiados (Figura 37). A medida que aumentó la concentración de sodio en las aguas de riego, fue más pronunciada la disminución de la conductividad hidráulica (Figura 38), hecho que es explicado por un mayor intercambio de otros cationes (Ca por ej.) por sodio. Ello contribuyó a desestabilizar la estructura y movilizar los coloides. Por otro lado se encontró una relación significativa entre los contenidos de arcilla+limo y la disminución de conductividad hidráulica (Figura 39). Esto es una evidencia directa de la influencia que tienen los coloides del suelo sobre esta propiedad. La relación inversa entre la conductividad hidráulica y los contenidos de arcilla+limo indica que los suelos son más sensibles cuanto mayor es el contenido de partículas finas: Probablemente se alcanza más rápido un mayor grado de saturación con sodio y, con ello, un efecto más marcado sobre procesos de hinchamiento de los agregados y dispersión de las partículas, con lo que se facilita la obstrucción de poros conductores de agua.

Los resultados de estos ensayos son bastante drásticos, pero afortunadamente no se repiten tan nítidamente en condiciones naturales, porque a campo interactúan otras variables que atemperan los efectos aquí medidos. Un factor muy importante es la lixiviación que puede tener lugar por efecto de la lluvia. De esta forma se desplaza, al menos en parte, el sodio incorporado.

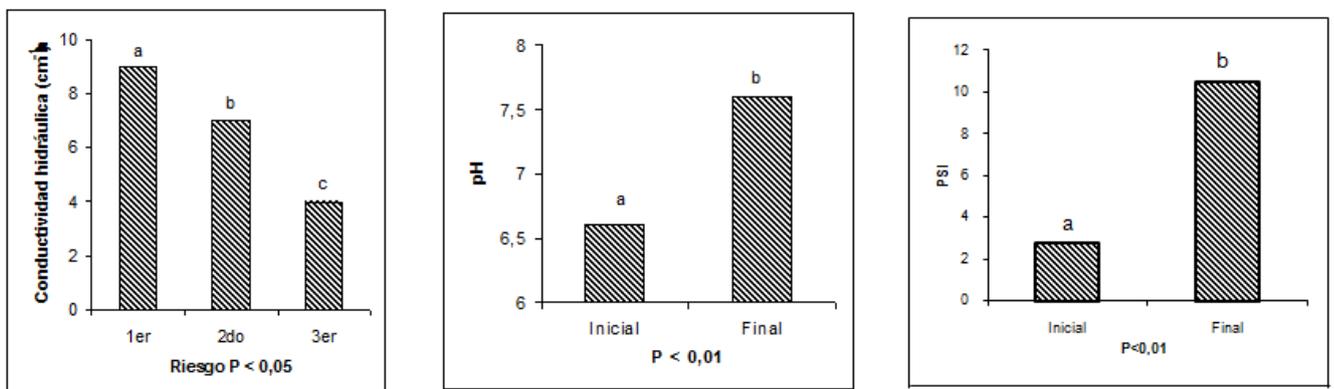


Figura 37. Variaciones de conductividad hidráulica (a), pH (b) y PSI (c) al cabo de las experiencias de riego simuladas. Letras indican diferencias significativas (adaptado de Peinemann et al. 1996).

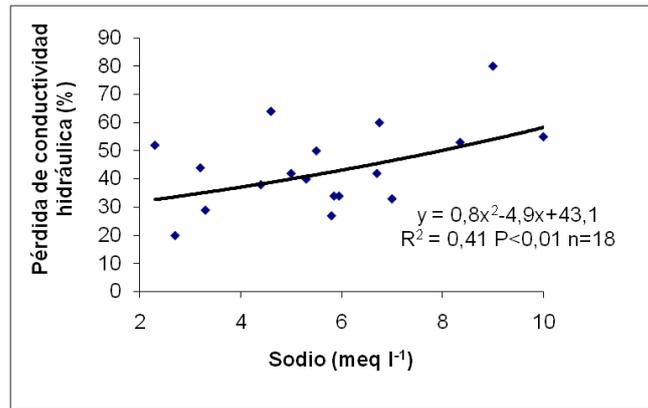


Figura 38. Relación entre la pérdida de conductividad hidráulica y la concentración de sodio en las aguas (adaptado de Peinemann et al. 1996).

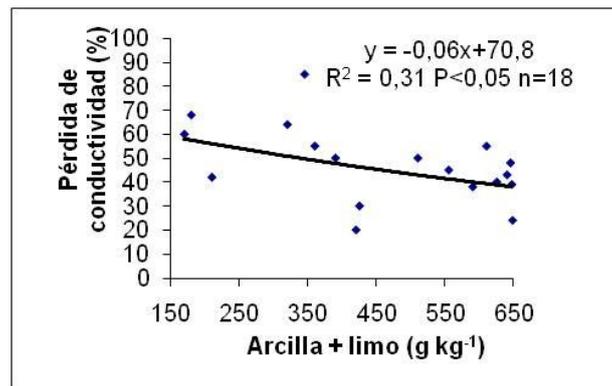


Figura 39. Relación entre la pérdida de conductividad hidráulica y el contenido de arcilla + limo de los suelos (adaptado de Peinemann et al. 1996).

Un segundo estudio a considerar es el de Vázquez et al. (2008). En este caso se trabajó en macetas y se aplicó a un suelo arenoso el equivalente a 300 mm de agua de riego por año. Mediante la aplicación de dosis crecientes de agua se “simuló” la aplicación del riego por 1, 10, 15 y 20 años. Se encontró que las variables más afectadas fueron pH, Na^+ , CO_3H^- y valor RAS. Estas variables se incrementaron fuertemente al cabo de los primeros 10 años de riego, para luego sufrir ligeras variaciones. Al cabo de los 10 años de riego el Na^+ y el valor RAS aumentaron más de 10 veces respecto del valor original. La salinidad evaluada a través de la CE, si bien mostraría un ligero incremento después de 10 años de riego, se mantendría a partir de allí, en cifras semejantes a las originales. Los autores concluyen que, con las láminas de riego y condiciones utilizadas en esta experiencia, los umbrales alcanzados por el Na^+ , CO_3H^- y RAS permitirían afirmar la no sustentabilidad del riego complementario, en planteos de largo plazo. La Figura 40 sintetiza la información obtenida.

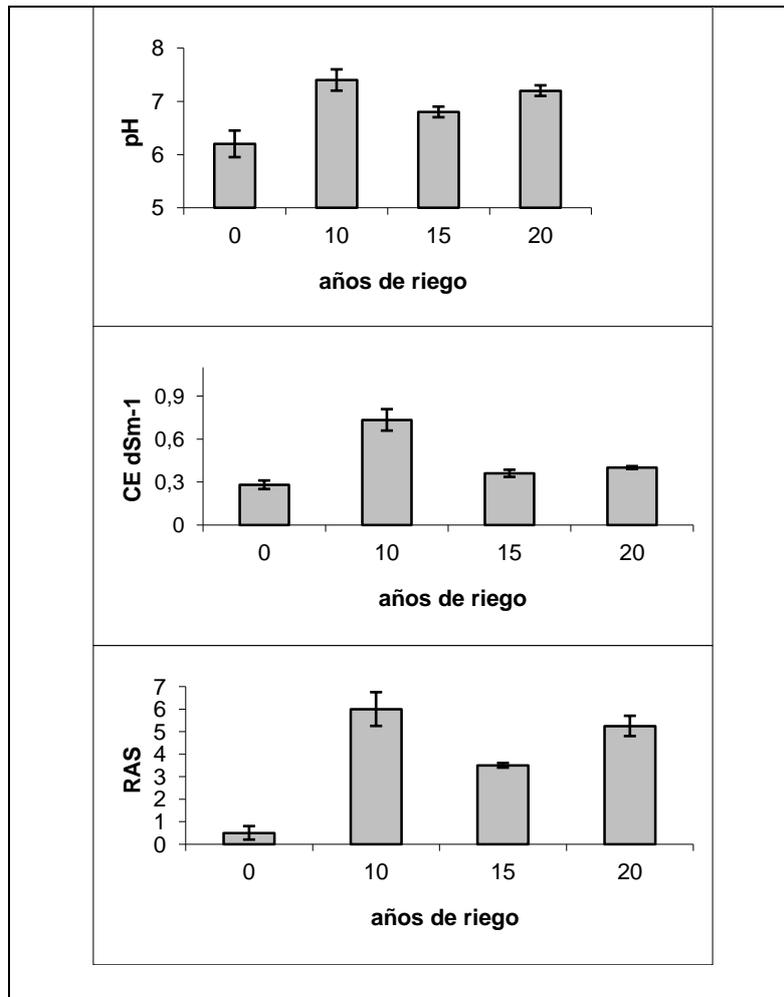


Figura 40 Valores simulados de pH, CE y valor RAS a lo largo de 20 años (adaptado de Vázquez et al. (2008)).

Entre estudios a campo, Lavado (1976/77) evaluó el efecto del riego complementario por varios años, en condiciones de semiaridez en Haplustoles enticos de la Provincia de La Pampa. Entre los cambios encontrados en el suelo, se destaca la reducción de la conductividad hidráulica (Tabla 12). Debido a que la textura con horizonte superficial, y del suelo en su conjunto, fue franco arenosa, no se llegó a impermeabilizar el suelo. No obstante se observa la caída de la permeabilidad en forma clara.

Tabla 12. Valores de porcentaje de sodio intercambiable y conductividad hidráulica (cm/h) en dos Hapludoles énticos.

Situación	Lote A		Lote B		
	No regado	Regado	No regado	Regado	Regado más estiércol
PSI	0,1	11,6	0,2	14,5	11,8
Cond. Hidráulica	8,5	1,6	8,7	3,5	7,8

Tal como fuera encontrado en muchos otros experimentos, el aporte de materia orgánica, en este caso la aplicación de estiércol, no afecta el enriquecimiento en sodio del suelo, pero contribuye al mantenimiento de la permeabilidad del mismo.

Andriulo et al. (1998) por su parte estudiaron el efecto acumulado de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades de un Argiudol típico serie Pergamino. Se encontró que esta práctica produjo cambios notables en varias propiedades del suelo. El contenido de sodio intercambiable pasó de 0,4 a 2,5 cmol_c kg⁻¹, o sea el PSI se sextuplico bajo riego; la CE prácticamente se duplico y el pH del suelo aumentó en una unidad. El impacto producido por el agua de riego se manifestó a partir de la superficie del suelo. El pH fue la propiedad edáfica que mostró dicha tendencia (Figura 41). La variación del

pH con la profundidad estuvo relacionada con el aumento del contenido de sodio intercambiable en los primeros centímetros de suelo.

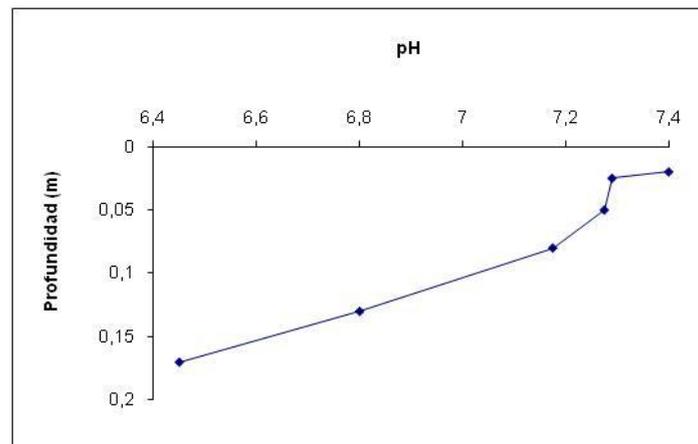


Figura 41. Variación del pH en relación a seis profundidades de muestreo luego de once años de riego complementario (adaptado de Andriulo et. al. 1998).

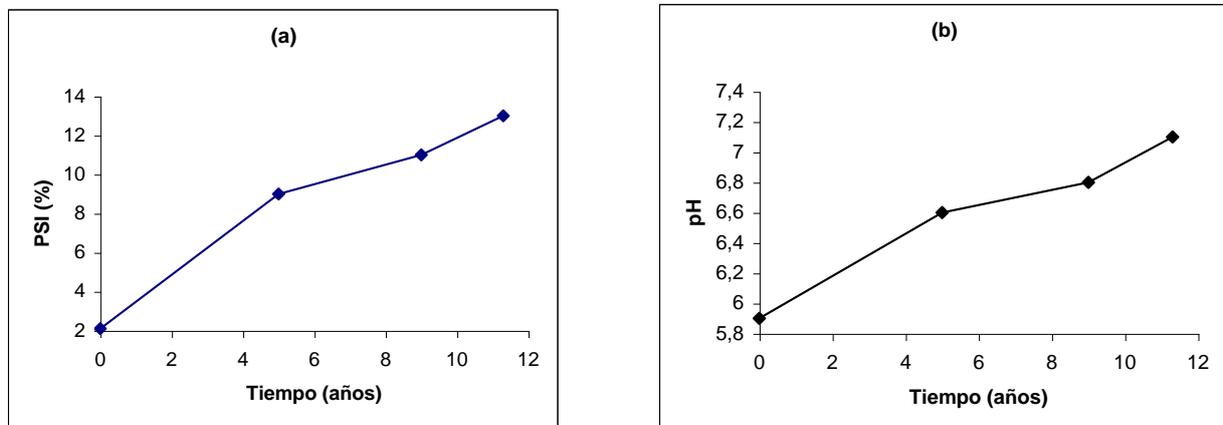


Figura 42. (a) Evolución del porcentaje de sodio intercambiable y (b) del pH en el horizonte Ap a lo largo de once años de riego complementario (Adaptado de Andriulo et. al. 1998).

En la Figura 42 se presenta la evolución de los valores medios de pH y PSI del horizonte Ap al cabo de 0; 5; 9 y 11 años de riego. Los valores medios de pH y PSI aumentaron con los años de riego y aparentemente todavía no se llegó al equilibrio. La relación entre pH y PSI fue:

$$PSI = 9,05 \text{ pH} - 50,99 \quad (P < 0,001 \quad (r^2 = 0,99))$$

Génova (2005) desarrolló numerosos experimentos de campo en Argiúdoles típicos ubicados en Elortondo, provincia de Santa Fe y en Balcarce, Carmen de Areco, Coronel Suárez y Salto, en la provincia de Buenos Aires. En sus experimentos utilizó tres aguas de diferentes calidades. Las CE fueron muy similares, 0,958 dS/m; 0,84 dS/m y 0,95 dS/m, los valores RAS fueron, en cambio, 3,6; 9,8 y 19,5. En base a la CE y la RAS, fueron clasificadas, utilizando la escala del US Salinity Laboratory, en las clases C3S1, C3S2 y C3S3. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 43, 44 y 45.

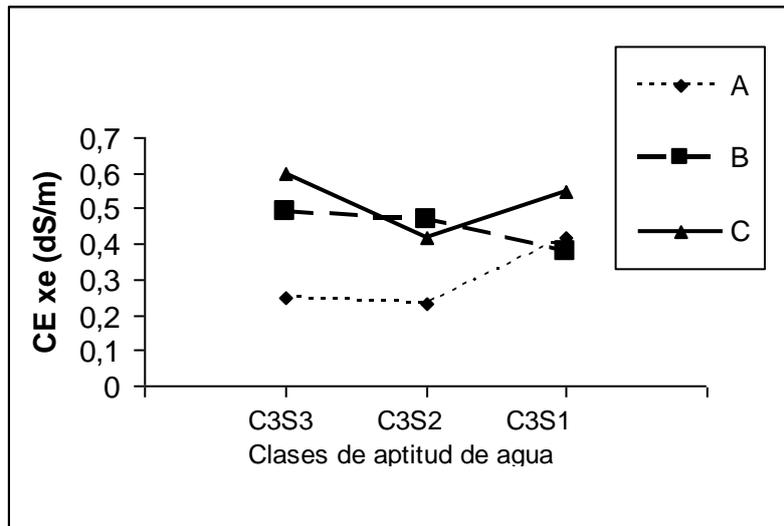


Figura 43. Evolución de la salinidad de los suelos. A: sin riego, B: en equilibrio y C: inmediatamente después de regados (Adaptado de Génova (2005)).

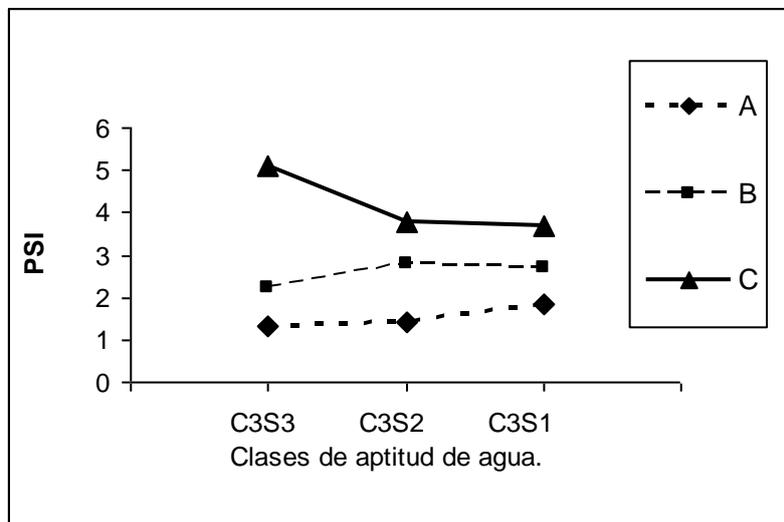


Figura 44. Evolución del PSI de los suelos. A: sin riego, B: en equilibrio y C: inmediatamente después de regados (Adaptado de Génova (2005)).

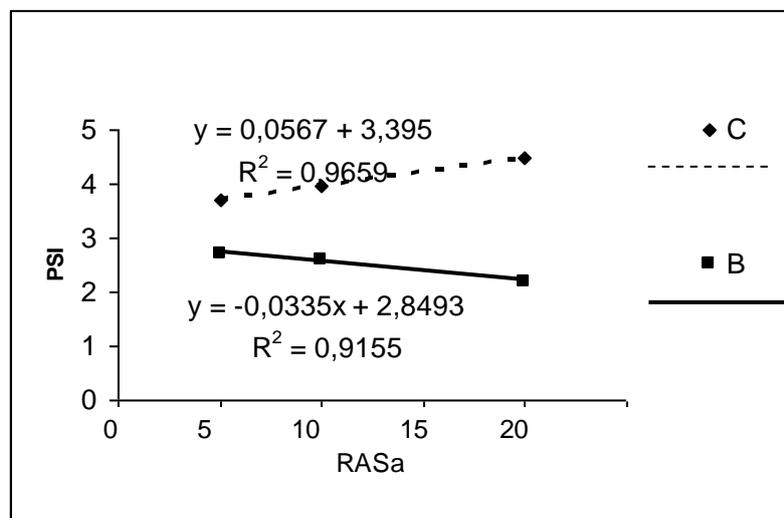


Figura 45. Relación entre el PSI de los suelos regados con aguas de distinta RAS. A, B y C: muestras tomadas antes y después de cada temporada de riego, respectivamente (Adaptado de Génova 2005).

Si se aplica el clásico criterio de calidad de aguas del laboratorio de salinidad de los EE.UU., para los valores RAS de las aguas utilizadas se generarían en el suelo valores de PSI de 3,4; 11,6 y 22,3. En cambio, los PSI medidos fueron de 3,6; 4,0 y 4,5. Esto indica que los indicadores de salinidad y sodicidad no registraron valores que determinen degradación irreversible de la calidad del suelo. No obstante, el riego complementario produjo incrementos del PSI y pH respecto de la condición inicial y esto coincide con los otros antecedentes locales.

El sudeste bonaerense también fue objeto de numerosos estudios, que en el presente se sintetizarán en el análisis de la revisión sobre el efecto del riego complementario efectuada por Báez (1999). En esta subregión se suelen aplicar unos 150 a 250 mm de riego por año, pero existe normalmente un exceso de lluvia de 100 a 200 mm anual. Esto determina un importante lavado de las sales, por lo que es posible utilizar aguas con salinidad relativamente más alta que en otros sectores de la Región Pampeana. Suelos regados con aguas con CE menor a 2 dS m^{-1} no mostraron acumulación salina en el suelo ni reducción de rendimientos y sólo se registraron reducciones en el rendimiento de la papa y el maíz cuando la CE del suelo fue mayor de 2 dS m^{-1} . Inclusive, un lote con papa donde se aplicaron 300 mm de agua de riego de CE de 4 dS m^{-1} , presentó síntomas de exceso de sales, solamente durante los primeros estadios del cultivo.

En experimentos con riego por dos años con aguas de una CE de 1,3; 1,6 y $2,8 \text{ dS m}^{-1}$, la CE en la superficie del suelo fue de 0,8; 1,3 y 2 dS m^{-1} . Los valores de RAS fueron 15, 17 y 19 y determinaron que el valor del RAS del horizonte superficial fuera de 2,5; 6 y 14, respectivamente. Sólo con el máximo RAS registrado, se determinaron reducciones en la densidad aparente, la lámina de agua infiltrada y la conductividad hidráulica.

Otros problemas: además de la alcalinización de los suelos, otro problema lo constituye el del aporte de algunos elementos tóxicos que se encuentran en las aguas subterráneas en algunas regiones. Estos elementos pueden pasar al suelo con el riego y afectar a los cultivos. Esto se ha encontrado en áreas bajo riego complementario en la Región Semiárida Pampeana con elementos disueltos en las aguas subterráneas como arsénico y fluor. Troiani et al. (1987) encontraron reducciones en los rendimientos de alfalfa irrigada por toxicidad de fluor, proveniente del agua y acumulado en los suelos.

SITUACIÓN PRESENTE, MANEJO DE SUELOS Y PROBLEMAS FUTUROS

El pH de los suelos de la Región Pampeana presenta un amplio rango de variación, aumentando normalmente por efecto del riego en promedio cerca de una unidad de pH. Los valores de PSI en los suelos agrícolas suelen ser muy bajos. Luego de la aplicación del agua de riego estos suelos sufren aumentos del PSI, lo que se traduce en el deterioro estructural y, consecuentemente, en importantes disminuciones en la conductividad hidráulica. Según uno de los trabajos analizados (Vázquez et al, 2008) los valores de estabilización en los suelos regados serían aproximadamente de pH 6,9 a 7,2 y RAS de 3,5 a 5,2. La salinidad de los suelos no se vería afectada. La principal duda es si ese deterioro continuará produciéndose paulatinamente y esto indicaría la no sustentabilidad de la práctica o se llega aun equilibrio. Este equilibrio se encuentra cerca de los valores críticos para considerar a estos suelos como sódicos y donde comienzan a aparecer algunos problemas físicos ligados a la alcalinidad edáfica. Sin embargo, hasta el presente la productividad de los mismos no ha disminuido. Al contrario, la respuesta de los cultivos al riego complementario es muy alta, ya que los rendimientos son más estables y elevados que en las situaciones de secano. Estos resultados generan gran interés en los productores, pero es necesario tener en cuenta que, a la luz de las investigaciones desarrolladas en la región, evidentemente existe un deterioro de los suelos.

Consecuentemente con este pronóstico, será necesario considerar medidas correctivas y entre ellas la aplicación de yeso será inevitable para reducir el sodio intercambiable a niveles no peligrosos, en los casos en que éste llegue a afectar a los suelos. Por otro lado, la práctica de la siembra directa puede ser muy positiva, debido a la existencia del *mulch* de rastrojos. Esto se debe a que el *mulch* reduce el impacto perturbante de la gotas de agua sobre la estructura del suelos, reduce las pérdidas por evaporación y ayuda considerablemente a lixiviar las sales. En agricultura convencional conviene evitar períodos de barbecho, particularmente en épocas cálidas, porque favorece la acumulación de sales en la superficie. Otras medidas de manejo a considerar incluyen evitar el deterioro estructural reduciendo el tráfico de maquinaria pesada

o sistemas de labranzas muy agresivos. No laborear profundo, y menos dejando el suelo desnudo. Si es necesario, puede usarse cincel y otros equipos de labranza vertical. Si los suelos están muy afectados se puede incrementar la densidad de siembra para compensar el menor tamaño de plantas y/o la reducción en el número de macollos. Como las sales se acumulan en las partes altas del microrelieve, puede ser necesaria una correcta nivelación del terreno. La pendiente dependerá del sistema de riego. El aporte de materia orgánica a través de abonos verdes contribuye al mantenimiento de la permeabilidad del suelo.

PARTE VII

USO Y MANEJO DE SUELOS SALINOS Y SODICOS EN AREAS DE SECANO.

PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE USO Y MANEJO DE SUELOS Y VEGETACIÓN

En este apartado se presenta una síntesis de las principales técnicas aplicadas en áreas de secano del país y en otras partes del mundo, para recuperar, mantener y potenciar la productividad de los ambientes salino-sódicos. Una parte de los suelos actualmente afectados por sales puede ser utilizada sin inversiones económicas importantes, en cambio el resto puede ser puesto bajo cultivo sólo mediante procedimientos drásticos. La aplicabilidad de esos procedimientos depende de los aspectos económicos, más que de los tecnológicos. La actividad agrícola sobre estos suelos puede o no ser sustentable, de acuerdo con las particularidades de cada uno de estos ambientes. Existen distintas técnicas disponibles para recuperar o rehabilitar suelos sódicos. Estas técnicas difieren en cuanto a su grado de efectividad y deben ser puestas a prueba en cada situación. Las diferentes técnicas de manejo deben aplicarse según los objetivos específicos, propios de cada caso. Los principios básicos que guían a la mayoría de ellas son:

- la reducción del ascenso capilar desde la capa freática;
- el incremento de la infiltración;
- la recuperación de la cobertura;
- la mejora de la condición física y química de los suelos.

Las técnicas difieren también en su nivel de complejidad, pues abarcan desde prácticas agronómicas simples como el manejo del pastoreo con descansos periódicos (pastoreo rotativo), el uso de coberturas o *mulches*, la intersembría, u otras, hasta la sistematización de tierras para mejorar el drenaje interno y el lavado de las sales y el sodio (drenes topo) o el manejo superficial de las aguas en casos de suelos sódicos y/o salinos anegables (sistematización agrohidrológica).

A menudo el grado de efectividad depende de la perdurabilidad. En este sentido, debe alertarse que el efecto de cualquier técnica será efímero y de corto plazo, sino se ejerce algún tipo de control sobre el factor causante del problema, que es el aporte de sales desde el agua subterránea. En suelos sin horizonte nátrico, el agua se mueve libremente en el perfil por lo que su recuperación pasa por realización de obras de drenaje (drenes abiertos y drenes topo), a menudo muy costosas. En ellos es posible que se produzcan encharcamientos o inundaciones por agua subterránea, a menudo muy cargada en sales.

En los suelos con horizonte nátrico poco permeable es poco factible que los ascensos freáticos lleguen a la superficie. Las sales se depositan superficialmente sólo por evaporación desde suelo desnudo, por lo que cualquier técnica que favorezca la cobertura superficial del suelo por vegetación (ej. pastoreo rotativo, siembra directa) permite controlar la salinización superficial de los suelos. En este tipo de suelos puede ser una opción interesante realizar manejo de las aguas superficiales mediante técnicas agrohidrológicas (se explica más adelante).

La estrategia de intervención deberá contemplar el contexto físico y económico-social de la región y del productor en particular, contar con un diagnóstico preciso del origen y la dinámica del proceso que se intenta mitigar, para recién luego establecer las recomendaciones de uso y manejo. Por último se debe realizar un seguimiento de las técnicas aplicadas a los fines de comprobar su efectividad y realizar de ser necesaria las correcciones del caso.

FUNDAMENTOS PARA EL MANEJO Y RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS

A los fines de describir los fundamentos y etapas de la recuperación de suelos salinos en condiciones de anegabilidad por napa freática en la región subhúmeda se consideran los conceptos realizados por Casas (2003) para el NO de Bs As los cuales explican y pueden ser aplicados a la mayoría de los problemas por salinización de suelos en país bajo las condiciones de secano y contaminación por napa. Al respecto se establece la necesidad de acelerar el proceso natural de recuperación post inundación que se produciría mas lentamente con la llegada de años normales de lluvias, a través de la aplicación de prácticas de manejo tendientes a mejorar las condiciones hidrofísicas del suelo, mantener la cobertura vegetal existente y romper la continuidad del espacio poroso del suelo a los efectos de evitar el ascenso capilar de la solución salina. Los sectores carentes de vegetación son los más críticos en cuanto a posibilidades de recuperación. En ellos es conveniente realizar la cobertura de la superficie del suelo con rastrojo o paja de cualquier naturaleza a los efectos de disminuir la incidencia de la energía evaporante y con ello el ascenso de la solución salina. Este procedimiento favorece además el lavado de sales por acción de las lluvias (Figura 46).



Figura 46. Recuperación natural del suelo

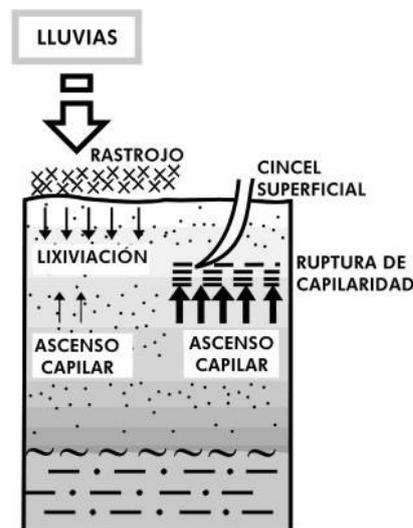


Figura 47. Recuperación del suelo mediante prácticas de manejo (primera fase: lixiviación)

Otra metodología para disminuir el ascenso de las sales consiste en la aplicación superficial de un cincel en forma repetida durante el verano a los efectos de romper la capilaridad y favorecer la lixiviación en profundidad de las sales (Figura 47). Estas operaciones se deben realizar previamente a la siembra de una pastura en el otoño (Zamolinski, Casas y Pittaluga, 1994). Otras experiencias de labranza vertical mas profunda como el subsolado han logrado cierto éxito en el lavado de sales del perfil al romper capas cementadas de origen natural o compactaciones de origen antrópico como el "piso de arado" en tanto esté acompañada de cobertura vegetal viva o muerta.

Una vez que se logra disminuir la salinidad por algunas de las prácticas enunciadas, es posible la siembra e implantación de una pastura a base de especies tolerantes (Figura 48). Para este propósito han mostrado buen comportamiento el agropiro alargado, Festuca, Lotus tenuis y Melilotus albus y officinalis (Zamolinski, 2001).

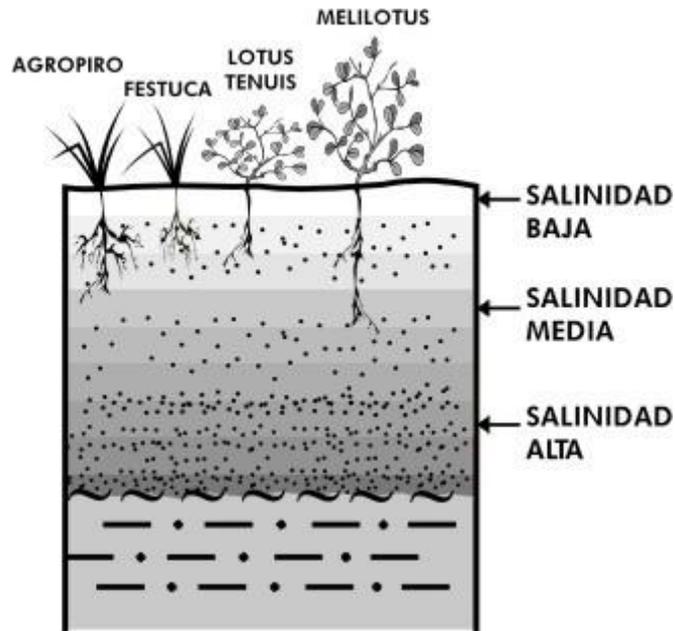


Figura 48. Recuperación del suelo mediante prácticas de manejo (segunda fase: vegetación)

La implantación de cobertura viva produce la precipitación y acumulación de las sales por debajo de la zona radicular interrumpiendo el ascenso capilar del agua y las sales a la superficie. La interrupción del ascenso capilar de agua se produce por la alta extracción de humedad del perfil por la vegetación viva y la interrupción del flujo capilar. Este efecto se lo conoce como “ruptura del lazo capilar” y se puede visualizar en la Figura 49.

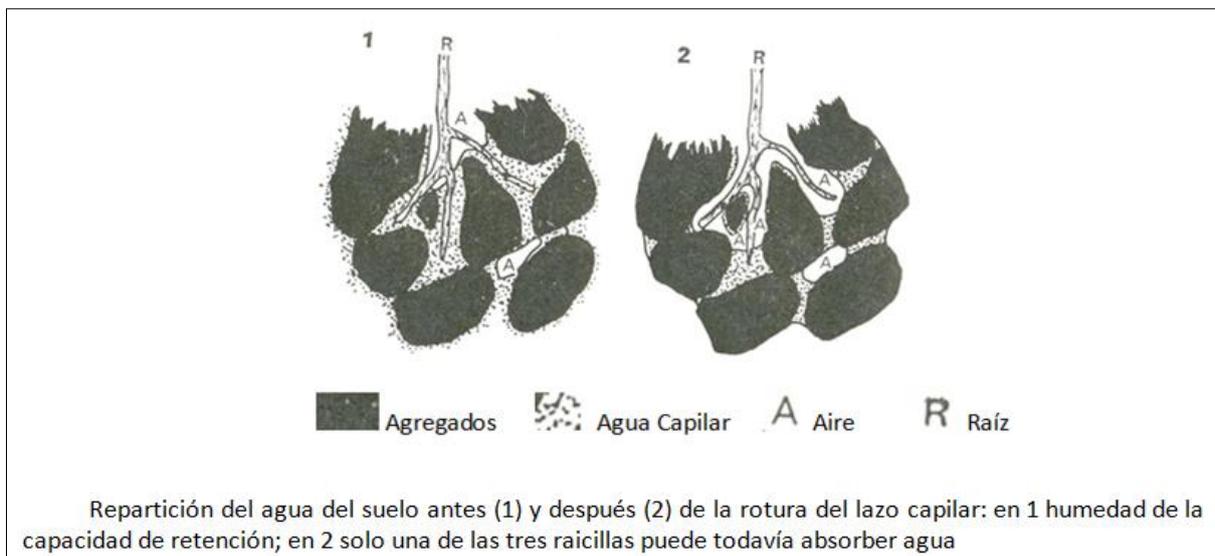


Figura 49. Efecto de la ruptura capilar provocado por la vegetación.

No resulta menor la importancia de la cobertura viva en el abatimiento de la napa freática por la mayor evapotranspiración en especial si se tratara de especies forestales.

En caso de contar con vegetación desarrollada de forma espontánea en el lote a recuperar, se podrán intersembrar especies tolerantes a salinidad tales como Agropiro, Melilotus y Lotus tenuis. La festuca es una especie con un buen comportamiento en suelos de salinidad moderada. Previo a la siembra se recomienda la aplicación de un herbicida total a los efectos de secar la vegetación natural, manteniendo la cobertura.

FUNDAMENTOS PARA EL MANEJO Y RECUPERACIÓN DE SUELOS SÓDICOS.

En principio toda técnica de recuperación de suelos sódicos comprende dos etapas:

1. Reemplazo del sodio de intercambio por otro catión.
2. Lavado del sodio de la solución del suelo a profundidad.

El catión responsable del desplazamiento del Na^+ adsorbido puede provenir de una acción biológica (implantación de especies adaptadas), del agregado de una sustancia química (enyesado) o de menor importancia por una acción mecánica (arada profunda).

En la región húmeda los suelos sódicos están asociados a posiciones en el paisaje deprimidos o bajos con limitaciones además del sodio por baja permeabilidad y anegabilidad de diferente grado cuyo origen puede ser: napa freática alta, encharcamiento superficial y retención superficial y/o desbordes de cursos de agua. Esta situación resulta de suma importancia al momento de evaluar la aplicación de la técnica para la eliminación del sodio, pues cualquier aumento de la productividad en materia seca de estos ambientes, generalmente de aptitud ganadera, puede verse afectada por la imposibilidad de la eliminación del sodio en profundidad, debido a las deficiencias de drenaje apuntadas, y/o la pérdida del tapiz vegetal, logrado por la disminución de la sodicidad, por un período posterior de anegamiento prolongado (+ de tres meses). Otro aspecto importante a considerar es la relación costo beneficio de la aplicación de la práctica de recuperación en función del contexto físico y socio económico de la región. En regiones húmedas y subhúmedas como las consideradas, la aplicación de enmiendas químicas queda prácticamente descartada pues el tipo de uso de los suelos sódicos y anegables es de carácter extensivo ganadero, estando ampliamente difundidas las prácticas de manejo de la cobertura a través de la implantación de especies forrajeras resistentes o el pastoreo rotativo. Por el contrario en áreas de riego o de cultivos de secano intensivos es mucho más adecuada la utilización de las enmiendas químicas u orgánicas.

Respecto a la acción biológica este tipo de técnicas se las agrupa en los llamados “métodos biológicos” y su fundamento se basa en que los suelos sódicos son generalmente de baja actividad biológica. Se pretende entonces aumentar dicha actividad biológica para lograr una mayor productividad de anhídrido carbónico proveniente de la respiración de los microorganismos y las plantas superiores. Este aumento de biomasa se logra a través de diferentes acciones: incorporación de residuos vegetales o abonos orgánicos, implantación de especies resistentes a las condiciones de sodicidad o manejo del pastoreo con el consiguiente aumento de la productividad de las especies nativas.

El efecto de la producción de CO_2 en un suelo sódico con presencia de CO_3Ca precipitado (situación bastante común en nuestra Región Pampeana) es el siguiente:



Si no existiera el CO_3Ca precipitado en el suelo el H^+ liberado por la hidrólisis del H_2CO_3 sustituiría al Na^+ ads. aunque con menor eficiencia que el Ca dado el mayor poder de sustitución en el complejo de este último.

Posteriormente el lavado del Na^+ de la solución en profundidad es casi imposible para suelos sódicos en regiones húmedas, dada su bajísima permeabilidad, consecuentemente la 2da etapa de la recuperación no se completaría en su totalidad. No obstante los resultados obtenidos y la difusión del método entre los productores de la región húmeda quedan evidenciados a través de la formación de una capa u horizonte superficial de unos pocos centímetros (10 a 20 cm) libres de Na^+ y con condiciones físicas muy favorables que permiten a través de los años obtener una productividad 2 a 3 veces superior a la situación original y de mejor calidad.

En estos suelos sódicos de regiones húmedas no han dado resultado las labranzas verticales profundas (y menos aún la inversión del pan de tierra) para mejorar la lixiviación del Na^+ . Ello se debe a la presencia de arcillas expansibles que hacen efímera este tipo de práctica; al alto costo; a la inutilización del lote por mucho tiempo por falta de piso y/o a la presencia de una napa cercana a la superficie. La recomendación para la implantación de especies es la siembra directa si las condiciones de anegabilidad lo

permiten o la labranza superficial con disco. La aplicación de drenes subterráneos de drenaje no resulta en la mayoría de las situaciones factible para esta región dadas las características topográficas de la misma (escasísima pendiente o inexistencia de la misma).

Respecto a la acción química conocida como “método químico” o enyesado se explica mediante la siguiente expresión:



El agregado de yeso u otra sustancia como el S o el propio CO_3Ca , debe realizarse en forma anticipada al cultivo que pretendemos (3 a 4 meses antes) realizar pues el proceso en el suelo es lento y gradual, pudiendo seguir teniendo efecto residual que se expresa varios meses después de su aplicación. La mayor efectividad del producto dependerá de su granulometría (superficie específica de reacción); mayor o menor grado de solubilidad de la enmienda a aplicar (yeso mucho más soluble que carbonato de calcio), proceso microbiológico en el suelo (azufre más lento que yeso) y el tipo de suelo (textura). Las dosis aplicadas son de varias toneladas por hectárea y el costo del producto se eleva considerablemente a través del flete según la distancia a la fuente de extracción. Otro aspecto a tener en cuenta es que el CO_3Ca no baja el pH del suelo con lo que ello significa en otras propiedades químicas y biológicas.

Como se mencionó este tipo de acción química está más difundida en áreas de riego con problemas de sodicidad o cultivos intensivos. En las regiones áridas o semiáridas el drenaje del suelo no está tan restringido como en los suelos sódicos de zonas húmedas y subhúmedas y la posibilidad de láminas adicionales de agua para el lavado (piletas de lavado) permiten, de no existir problemas de napa altas, la eliminación del sodio en profundidad.

Por último la acción mecánica también conocida como “método mecánico” o arada profunda, de muy poca difusión en nuestro país se fundamenta en poner en superficie el carbonato de calcio precipitado naturalmente a cierta profundidad en el suelo (no más de 0,60 m) y entremezclarlo con el horizonte sódico superficial de manera que el aumento de la concentración de esa sal actué como una enmienda química de baja solubilidad, siendo en definitiva el Na^+ ads. reemplazado por el Ca^{++} proveniente del bicarbonato de calcio aportado desde la profundidad. En suelos sódicos de áreas húmedas solo puede ser aplicado a aquellos con la presencia de carbonatos a la profundidad mencionada o menor, pues de estar más profundo la práctica no es operativamente viable; disponer de la maquinaria apropiada (solo existe un equipo de arado de reja y vertedera en el país de las dimensiones requeridas y un subsolador profundo); el esfuerzo de tracción obliga a utilización de tractores con orugas; el costo y oportunidad de realización de la labor; el lote por la falta de piso queda inutilizado por varios años; la distribución de la capa de tosca o tosquilla no es uniforme en profundidad por lo que en varios sectores de los lotes trabajados se observa manchones sódicos de mayor gravedad.

TÉCNICAS DE MANEJO DE SUELOS SALINOS Y SÓDICOS.

En la siguiente tabla se establece una clasificación de las prácticas de manejo en función de sus objetivos

Tabla 13. Prácticas de manejo en función de sus objetivos.

Técnica de manejo	Aumentar actividad biológica (CO ₂)	Reducir Evaporación (E)	Reducir Ascenso Cap. (AC)	Aumentar Infiltración (I)	Recuperar Cobertura	Deprimir NF	Aumentar producción del sitio
Clausuras	X	X	X	X	X		X
Pastoreo rotativo	X	X		X	X		X
Intersiembr			X	X	X		X
Cultivo del suelo con plantas mejoradoras	X	X	X	X	X	X	X
Forestación	X	X	X	X	X	X	X
Coberturas y mulches	X	X	X	X	X		X
Revegetación de playas	X	X	X	X	X		X
Transplante de especies	X				X		X
Enmiendas Químicas (enyesado)				X	X		X
Enmiendas Orgánicas (Abonos Orgánicos)	X			X	X		X
Manejo de las labranzas		X	X	X			X
Aflojamiento superficial del suelo			X	X	X		
Drenajes localizados: subsolado, drenes topo			X	X		X	
Fertilización							X

Manejo del agua superficial (agrohidrológico): práctica previa al mejoramiento de suelos salinos y sódicos bajo condiciones de anegabilidad por aguas superficiales bajo determinadas condiciones regionales (Centro-Este de Bs As: Pampa Deprimida).

A continuación se describen las principales técnicas de uso y manejo:

Intersiembras

Técnicas consistentes en la siembra de especies forrajeras en forma directa sobre un pastizal natural o cultivado, con mínima remoción de la superficie del suelo.

Se diferencia de la técnica de la siembra directa en que esta última se utiliza preferentemente eliminando la vegetación sobre la cual se realiza la operación, mientras que en la intersiembra la especie introducida debe competir o complementar a la vegetación sobre la que se instala.

Se utiliza preferentemente en situaciones con mal drenaje y peligro de salinización superficial por eliminación de la cobertura. Puede utilizarse en situaciones donde sea posible el tránsito con sembradoras, es decir pastizales bajos de pelos de chanco, gramonales, agropiros degradados. Se excluyen las comunidades de arbustales y espartillares en razón de la dificultad de las operaciones mecánicas.

Entre las especies a utilizar, para ambientes de gramonal, pueden utilizarse agropiro criollo, agropiro alargado, tréboles de olor amarillo y blanco, festuca, alfalfas (para situaciones no inundables), trébol de cuernitos (*Lotus corniculatus*). Las estrategias de intersiembra pueden ser las siguientes:

a) Intersiembra con especies nativas: es una opción aplicable a todos los ambientes. Requiere el conocimiento de los genotipos de valor forrajero, de sus formas reproductivas y de sus rangos de adaptación ecológica. Las especies más interesantes son: Poas (*P. ligularis*, *P. resinulosa*, *P. lanígera*), cebadillas (*Bromus uniolooides* y *B. auleticus*), patas de gallo (*Chloris berroi*, *C. canterae*, *C. retusa*), pasto miel (*Paspalum notatum*, *P. dilatatum*), esporobolo (*Sporobolus indicus*). Otra especie nativa, de fácil propagación a través de semillas, muy utilizada en Australia, es el cachiyuyo (*Atriplex undulata*).

b) Coexistencia de especies cultivadas y naturales: aparece como otra opción alternativa en ambientes extremos.

c) Reemplazo de la vegetación natural por competencia: es una opción posible de implementar en situaciones más favorables. Se la ha utilizado en el país, con resultados exitosos

Clausuras al pastoreo

Consiste en la exclusión de los animales al pastoreo ya sea en lotes o sectores dentro de lotes, por un período de tiempo, con el objetivo de recuperar la cobertura superficial, a través de la eliminación de la selección por pastoreo, de evitar el pisoteo y el tránsito de animales, en situaciones donde la productividad es mínima o el riesgo de deterioro del suelo es máximo. Un objetivo indirecto es el de proteger de la contaminación con agua y sales de zonas aledañas al área clausurada, para lo cual se requiere una organización de potreros en función de la diversidad de tipos de comunidades vegetales presentes (apotramiento y pastoreo diferencial por comunidad).

Se aplica en cualquier condición de suelo afectado por agua y sales-sodio, que requiera una recuperación de la cobertura de suelo. Está indicada especialmente como primera etapa en la recuperación de playas salinas en fondos de laguna, espartillares, pelos de chanco, gramonales o cachiyuyales degradados por sobrepastoreo.

El tiempo de duración de la clausura dependerá de la intensidad del proceso de degradación, y de las características del suelo y la freática. Cuanto más extremas sean esas condiciones, mayor será el tiempo de clausura necesario para una primera etapa de recuperación.

Pastoreo rotativo

Práctica consistente en la rotación de los sectores de pastoreo por la hacienda, en función de la disponibilidad de forraje, del tipo de pastizal, del momento del año y del estado de humedad del suelo. Requiere la subdivisión del lote en parcelas de pastoreo, cuya duración está en función de la carga animal disponible, la disposición de las aguadas y la relación de tiempos de pastoreo-descanso establecidos.

Permite aprovechar los picos de disponibilidad de forraje, disminuir la selección de forraje y aumentar el tiempo de descanso de cada parcela de pastoreo (efecto clausura). Con esta técnica se logra minimizar el riesgo de deterioro de la estructura del suelo por pisoteo en mojado, y se permite la revegetación de superficies desnudas por aumento de los tiempos de descanso.

A los fines de establecer una estrategia de recuperación de suelos salino-sódicos a través de la *clausura o del pastoreo rotativo del campo natural* resulta de fundamental importancia reconocer las principales comunidades vegetales de forma de poder establecer: la asociación de las mismas a las características de relieve-suelo-napa como elemento de diagnóstico previa al manejo; su estado de degradación por sobre pastoreo (calidad y cantidad de la cobertura); y la productividad esperada a través de este tipo de intervenciones.

No obstante las innumerables combinaciones posibles de hallar, es posible caracterizar las siguientes comunidades vegetales representativas de otras tantas unidades de paisaje en la Región Pampeana central (Cantero et al., 1998b, Gorgas y Lovera, 2003, Cisneros, 1994) (Tabla 14).

Tabla 14. Comunidades vegetales representativas de suelos halomórficos de la Región Pampeana central (Extraído de Cantero et al., 1998b, Gorgas y Lovera, 2003, Cisneros, 1994)

Comunidad	Condición topográfica y edáfica donde se localiza
Flechillar (<i>Stipa trichotoma</i> - <i>Stipa tenuissima</i> - <i>Stipa papposa</i>).	Salinidad sólo por debajo de 1,5 m, capa freática por debajo de los 200 cm con salinidades superiores variables entre 3 a más de 10 dS m^{-1} , suelos Hapludoles/ustoles y Argiudoles/ustoles.
Pastizal de pata de gallo (<i>Chloris canterai</i>)	Relieves planos en suelos moderadamente bien drenados, sin peligro de anegamiento, levemente salinos en superficie, incrementando en profundidad por efecto de la capa freática que fluctúa por encima de 80 cm. Suelos son Natracuoles y Natralboles.
Gramonal (<i>Cynodon dactylon</i> y <i>Hordeum stenostachys</i>).	Planicies intermedias, poco inundables que pueden sufrir cortos períodos de encharcamiento en los microrelieves, capa freática fluctúa alrededor de los 80 cm. Los suelos son Natracuoles, Fragiacuoles, Fragiacualfes.
Monte de chañar y matorro negro (<i>Geoffroea decorticans</i> y <i>Grabowskia duplicata</i>).	Posiciones bajas o intermedias, con freáticas de alta salinidad, oscila entre 40 y 100 cm, suelos son Fragiacuoles, Duracuoles y Duracualfes (presencia de duripanes).
Pajonal de pasto rueda (<i>Pappophorum caespitosum</i> - <i>Muhlenbergia asperifolia</i>)	Posiciones intermedias del relieve, con la capa freática oscila entre los 40-55 cm. de profundidad y alta concentración salina ($33-36 \text{ dS m}^{-1}$). Los suelos son moderadamente bien drenados y no tienen rasgos de anegamiento, y pertenecen al subgrupo Natracuol.
Peladal de pelo de chancho de hoja fina (<i>Distichlis scoparia</i>).	Posiciones de media loma, en pendientes de hasta 1,5 %, sin peligro de inundación. La capa freática afecta permanentemente el suelo con un nivel de oscilación medio de 100 cm. Los suelos son Hapludoles thapto nítricos, Fragiacuoles y Natracuoles.
Arbustal de cachiyuyo y palo azul (<i>Atriplex undulata</i> y <i>Cyclolepis genistoides</i>)	Áreas planas, alargadas, de escasa o nula infiltración en los suelos. Es un área poco inundable, aunque sufre encharcamientos de corta duración. La capa freática, altamente salina fluctúa alrededor de una media de 50 cm. Los suelos son Duracualfes con desarrollo de fuertes duripanes.
Matorral de jumecillo (<i>Heterostachys ritteriana</i>)	Áreas planas más extensas y el perfil de suelo es pobremente drenado. La capa freática es altamente salina, fluctuando alrededor de los 35 cm, debido a ello los suelos tienen carácter salino sódico en todo el perfil, con altas concentraciones en superficie, y pertenecen al subgrupo Natracualf – Duracualf.
Jume (<i>Salicornia ambigua</i>)	Planicies intermedias muy afectados por salinización, desde la superficie. La capa freática generalmente oscila por debajo de los 70 cm y es altamente salina. Los suelos varían desde Natracuoles hasta Duracualfes.

Espartillar (<i>Spartina densiflora</i>)	En relieves cóncavos, ocupando posiciones de bajo. Sufre anegamientos prolongados por efecto de la capa freática cuya salinidad es muy variable, desde dulces hasta altamente salinas. Los suelos son Natracualfes, Natracuoles, Duracuoles, Duracualfes.
Comunidad del ojo de agua dulce (<i>Paspalum vaginatum</i> , <i>Cyperus corymbosus</i> y <i>Paspalum quadrifarium</i>).	Áreas cóncavas. La capa freática tiene un nivel de oscilación cercano a la superficie (0-15 cm). Presentan los máximos picos de producción de fitomasa en noviembre-enero con un descanso invernal donde se seca y muere la parte aérea de casi todas las ciperáceas y gramíneas. Desde el punto de vista forrajero son áreas de alto valor por las características de algunas de sus especies muy apetecidas por los vacunos
Pastizal de pelo de chancho de hoja ancha (<i>Distichlis spicata</i>)	En relieve subnormal, suelos pobremente drenados, inundable y anegable. La capa freática fluctúa alrededor de 45 cm, y su salinidad puede ser muy variable, al igual que los suelos que pueden variar entre Natracuoles y Duracualfes.
Juncal-total (<i>Scirpus californicus</i> , <i>Baccharis juncea</i> y <i>Typha latifolia</i>).	En cubetas y lagunas de baja salinidad, con un régimen de inundación permanente. Los suelos son Alfisoles con fuerte gleyzación y frecuentemente con horizontes cementados.
Pastizal de pasto laguna (<i>Echinochloa helodes</i>).	En cubetas receptoras de escurrimiento de baja salinidad, con períodos de inundación de entre 30 y 90 días por año. Los suelos son Natracuoles/Natracualfes.

Vecchio y otros (2012) evaluaron sobre un Natracualf típico de la Depresión del Salado los siguientes tratamientos: 1) pastoreo continuo 2) pastoreo rotativo, ambos con carga similares, 3) exclusión al pastoreo de 11 años y 4) exclusión al pastoreo de 7 años. Sobre muestras compuestas de 0-5; 5-10, 10-15 cm, se evaluaron carbono oxidable; nitrógeno total; pH actual y conductividad eléctrica. El contenido de carbono oxidable fue significativamente menor bajo pastoreo continuo respecto de pastoreo rotativo y las clausuras en las tres profundidades evaluadas. El contenido de nitrógeno total fue significativamente superior en las áreas clausuradas que en las áreas pastoreadas. El pH de los suelos bajo pastoreo continuo fueron los más elevados en todas las profundidades estudiadas, clasificados muy fuertemente alcalinos. La conductividad eléctrica fue significativamente menor en los sitios bajo pastoreo rotativo y excluido del pastoreo. Los sistemas de manejo modificaron las propiedades químicas consideradas. Los descansos propiciados por la exclusión o por el manejo del pastoreo rotativo permitieron el aumento del carbono oxidable y la disminución del pH hasta la profundidad estudiada (Figuras 50 y 51).

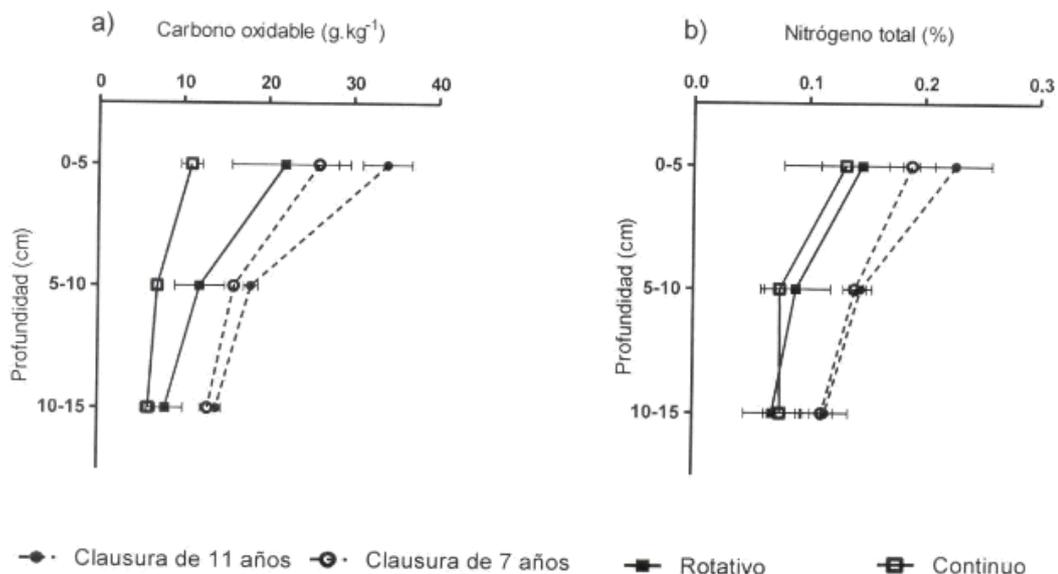


Figura 50. Variación del C oxidable y el N total en una estepa halófito de la Depresión del Salado bajo diferentes tratamientos (Vecchio, 2012).

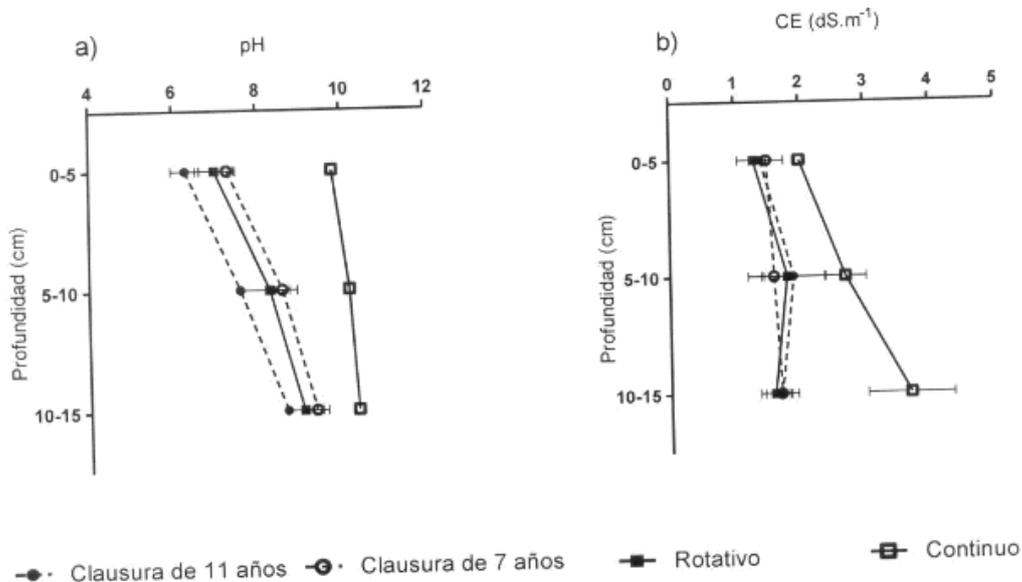


Figura 51. Variación del pH y la CE en una estepa halófila de la Depresión del Salado bajo diferentes tratamientos (Vecchio, 2012).

Cultivo del suelo con plantas mejoradoras

La idea de sembrar especies mejoradoras no es nueva. En nuestro país existieron experiencias pioneras desde hace 60 años, de mejora de suelos sódicos por medio de la siembra de maíz de Guinea (*Sorghum technicum*) (Saubarán y Molina, 1963). Se piensa que la cobertura de suelos desnudos por especies pioneras genera actividad biológica, y así producción de CO₂, que contribuye a disminuir la sodicidad. El uso de estas enmiendas orgánicas para la recuperación de dichos suelos salino-sódicos suele ser poco efectiva en el lavado del sodio en profundidad dada la limitación de drenaje de los suelos, no obstante se produce una eliminación del mismo en el horizonte superficial que permite la implantación de especies resistentes con gran producción de biomasa.

A diferencia del aumento de la cobertura a través del manejo del pastoreo sobre campo natural la siembra de especies introducidas provocan un alto impacto ambiental sobre la biodiversidad de los pastizales naturales pues requieren la aplicación de herbicidas totales (glifosato) previa a la implantación. A su vez las especies introducidas son más sensibles - tienen menos adaptación - a períodos de sequía y anegamientos extraordinarios.

El uso de plantas mejoradoras está actualmente en estudio en proyectos llevados a cabo entre investigadores de Facultad de Agronomía e INTA. Se están encontrando resultados auspiciosos con la introducción de especies megatérmicas en Natracualfes de la Depresión del Salado (J. Otondo, comunicación personal). Otros trabajos como el de Garciandia Daniel Ariel (2010) evalúa con muy buenos resultados el desarrollo de subtropicales para bajos salino sódicos en Carlos Tejedor Pcia de Bs As, concluyendo que la implantación de *Chloris gayana* (grama rhodes) y *Panicum coloratum* (mijo perenne) duplican la productividad de verano sobre estos suelos con "pelo de chancho". *Salicornia* y "gramón", que tienen muy baja productividad en esa época del año y mejoran las propiedades físico químicas del suelo, constituyendo una alternativa muy promisoría para aumentar la oferta forrajera.

En suelos de distintas regiones, tales como la Pampa Deprimida (Lavado y Taboada, 1987) y en la Pampa Arenosa (Cisneros et al., 2007) se encontraron reducciones en los tenores salinos, cuando los suelos acumulan material vivo y muerto sobre su superficie.

La especie más usada en estos ambientes es el agropiro (*Thinopyrum ponticum* o *Elytrigia elongatum*), la cual si bien crece con mayor vigor en suelos francos fértiles, soporta condiciones de suelos arcillosos mal drenados y con salinidades superiores a 4 dS m⁻¹, pH mayor a 8 y PSI mayor a 15. Esto llevó a que se sembrara en suelos de campos bajos de zona húmeda. Sin embargo, el agropiro sólo persiste varios años en algunos suelos de estos bajos, como los Natracuales típicos y los Natracualfes. Otros suelos más

anegables como los Natralboles no responden bien a la implantación de agropiro, y las matas de esta especie desaparecen pocos años (Figura 52). Es importante, entonces, distinguir a los diferentes suelos existentes antes de tomar decisiones de manejo como la implantación de agropiro.

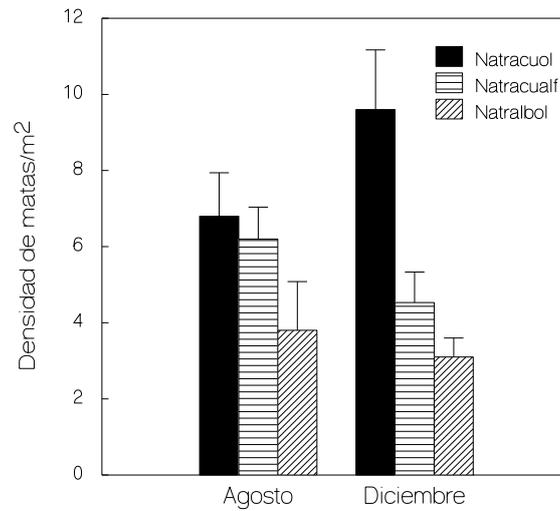


Figura 52. Densidad de matas de agropiro en tres suelos sódicos de la región de Laprida, provincia de Buenos Aires (adaptado de Taboada et al., 1998).

Casas y colaboradores (2003) en una experiencia realizada en Pasteur, Provincia de Buenos Aires, sobre un Hapludol thapto nátrico evaluó a partir del mes de setiembre la salinidad del suelo a una profundidad de 0 a 15 cm durante 18 meses consecutivos en un suelo tratado con cobertura de paja de pasto puna (a razón de 1500 kg/ha) y en otro suelo con campo natural. En el suelo tratado con cobertura se efectuó la siembra de una pradera de Agropiro en el mes de marzo. En el lote tratado con Agropiro la salinidad osciló entre 5 y 8 dS m^{-1} , mientras que en el campo natural varió entre 13 y 36 dS m^{-1} , alcanzando el valor máximo a principios de noviembre (Figura 53).

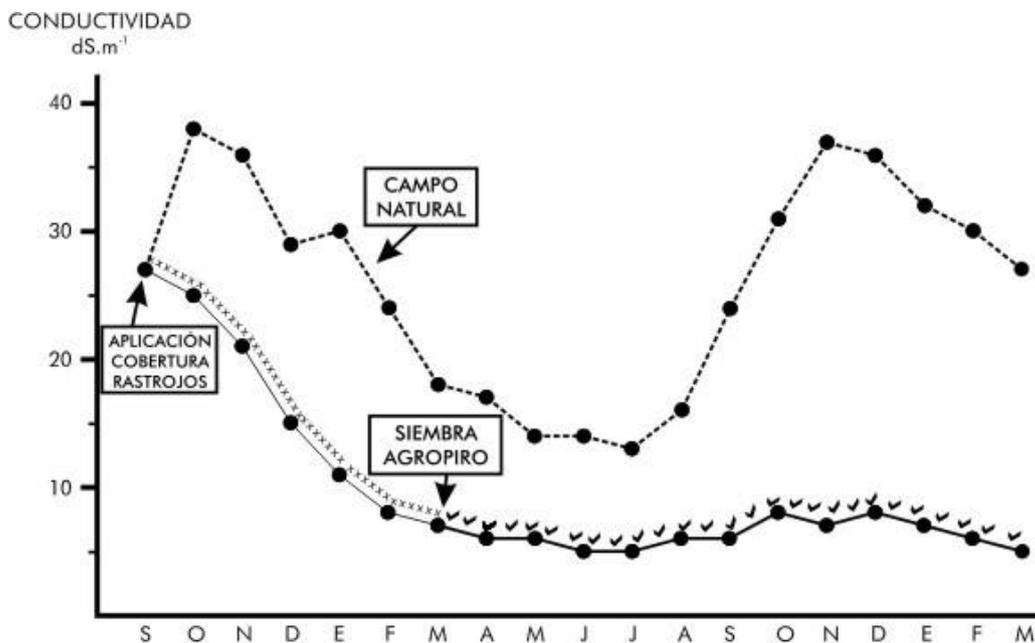


Figura 53. Evolución de la salinidad del suelo en el campo natural y en el suelo tratado con cobertura de rastrojos y siembra de agropiro

En las Figuras 54 a 57 se muestra la variación en profundidad de la salinidad, pH, porcentaje de sodio de intercambio y contenido de materia orgánica, en el suelo con Agropiro y con pastura natural. Se puede observar la mejoría significativa que se produce en los 20 a 25 cm superiores del perfil en función de la

lixiviación de sales, y la actividad radicular que contribuye significativamente al descenso del pH y posiblemente al descenso del PSI (Casas y Pittaluga, 1984).

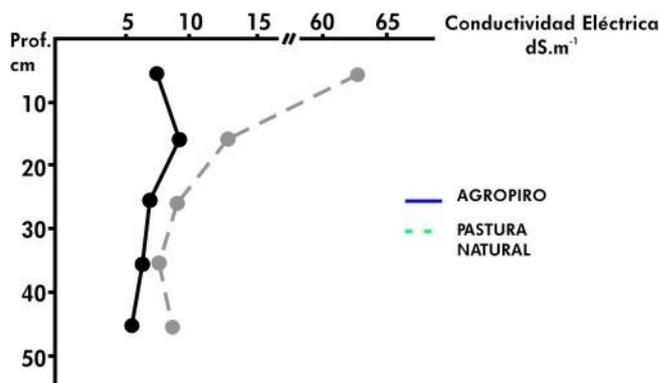


Figura 54. Variación en profundidad de la conductividad eléctrica en un suelo con agropiro en clausura y con pastura natural sobrepastoreada (Casas y Pittaluga, 1984)

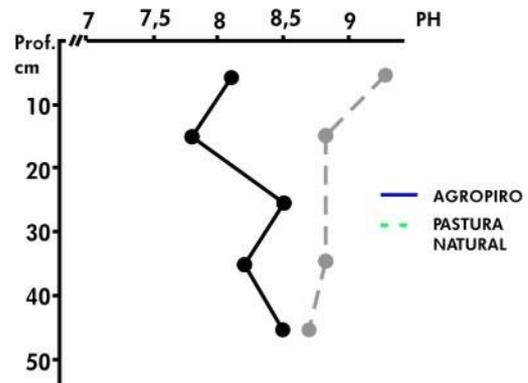


Figura 55. Variación en profundidad del pH en un suelo con agropiro en clausura y con pastura natural sobrepastoreada (Casas y Pittaluga)

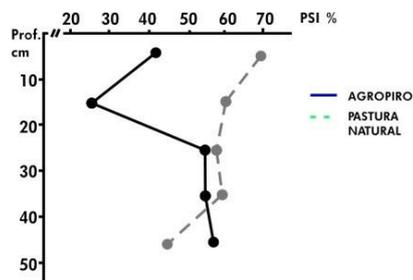


Figura 56. Variación en profundidad del porcentaje de sodio intercambiable en un suelo con agropiro en clausura y con pastura natural sobrepastoreada (Casas y Pittaluga, 1984)

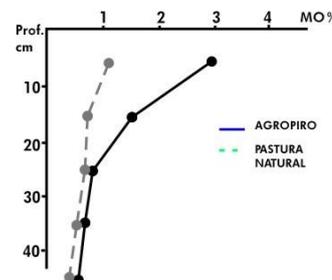


Figura 57. Variación en profundidad de la materia orgánica en un suelo con agropiro en clausura y con pastura natural sobrepastoreada (Casas y Pittaluga)

Según Musto (1981) para la Pampa Deprimida pueden implantarse las siguientes especies, de acuerdo a las características de los suelos (Tabla 15):

Tabla 15. Especies adaptadas a diferentes suelos halomórficos de la Pampa Deprimida (Extraído de Musto, 1981).

Especies	Tipo de suelo
Cereales forrajeros (cebada, centeno, avena, sorgo forrajero y maíz pastoreo)	
Agropyrum elongatum (agropiro alargado), Festuca arundinacea (festuca), Lolium perenne (raigrass perenne), Phalaris bulbosa (falaris), Melilotus officinalis (trébol de olor), Trifolium repens (trébol blanco), Trifolium fragiferum (trébol frutilla)	+ 15 % PSI (20 cm en +)
Agropyrum elongatum (agropiro alargado), Festuca arundinacea (festuca), Melilotus officinalis (trébol de olor), Trifolium repens (trébol blanco), Trifolium fragiferum (trébol frutilla), Lotus corniculatus (Lotus), Chlorys gayana (Gramma Rhodes)	15-40 % PSI (0-20 cm), generalmente presentan 5 a 15 sin sodicidad
Agropyrum elongatum (agropiro alargado), Melilotus officinalis (trébol de olor) Chlorys gayana (Gramma Rhodes)	+ 40% PSI desde la superficie, moderadamente a fuertemente salino

En la siguiente tabla se establece la tolerancia de algunos cultivos a la sodicidad y a la salinidad.

Tabla 16. Tolerancia a la sodicidad según Ayers y Wescot (1987).

Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
<i>Persea americana</i> (aguacate)	<i>Penisetum typhoides</i> (mijo perla)	<i>Medicago sativa</i> (alfalfa)
<i>Phaseolus vulgaris</i> (poroto)	<i>Daucus carota</i> (zanahoria)	<i>Hordeum vulgare</i> (cebada)
<i>Gossypium hirsutum</i> germinación (algodón)	<i>Trifolium repens</i> (trébol blanco)	<i>Oryza sativa</i> (arroz, con transplante)
<i>Zea mays</i> (maíz)	<i>Paspalum dilatatum</i> (pasto miel)	<i>Beta vulgaris</i> (remolacha azucarera)
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Festuca arundinacea</i> (<i>Festuca alta</i>)	<i>Cynodon dactylon</i> (pasto Bermuda)
<i>Pisum sativa</i> (arveja)	<i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	<i>Gossypium hirsutum</i> (algodón)
<i>Pisum saccharatum</i>	<i>Saccharum officinarum</i> (caña azúcar)	<i>Agropyrum cristatum</i>
<i>Citrus paradisi</i> (pomelo)	<i>Trifolium alexandrinum</i> (Trébol alejandrino)	<i>Agropyrum elongatum</i>
<i>Phaseolus aureus</i>	<i>Melilotus parviflorus</i> (Trébol de olor)	<i>Diplachna fusca</i>
<i>Lens culinaris</i> (lenteja)	<i>Avena sativa</i> (avena)	<i>Chloris gayana</i> (grama Rodees)
<i>Glycine max</i> (soja)	<i>Allium sativum</i> (ajo)	
<i>Cicer arietinum</i> (garbanzo)	<i>Allium cepa</i> (cebolla)	
	<i>Linum usitatissimum</i> (lino)	
	<i>Helianthus annuus</i> (girasol)	
	<i>Medicago sativa</i> (alfalfa)	
	<i>Oryza sativa</i> (arroz, con siembra directa)	
	<i>Secale cereale</i> (centeno)	
	<i>Hordeum vulgare</i> (cebada)	
	<i>Sorghum vulgare</i> (sorgo)	
	<i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	
	<i>Triticum vulgare</i> (trigo)	

Forestación

Consideraciones Generales

La forestación de pastizales naturales afectados por limitaciones tales como la salinidad y/o la sodicidad, asociadas en muchas situaciones a la anegabilidad, resulta una opción válida desde el punto de vista físico y económico para un cambio de uso del suelo y la recuperación de suelos afectados por esas limitaciones en la Región Pampeana. No obstante la introducción de especies forestales en regiones de pastizales naturales, deben contemplarse pautas de manejo y uso a los fines de mitigar los efectos ambientales negativos que pueden producirse. La oportunidad de lograr altos rendimientos de biomasa en tierras de pastizales sin posibilidades de uso agrícola ha sido sin duda otro aliciente para su expansión. Es importante destacar que la presencia de pastizales naturales remanentes en Argentina y Uruguay se asocia fundamentalmente con la existencia de distintos tipos de limitaciones que han impedido el desarrollo de cultivos (sodicidad, inundación, salinidad, presencia de sustratos muy arenosos o arcillosos constituyen algunas de estas barreras) (Leon et al. 1984, Viglizzo et al. 2001). Sin embargo, estimaciones de

productividad primaria en forestaciones sugieren tasas que duplican o triplican a las de los pastizales que rempazan (Deregibus et al., 1987; Frangi et al., 2000; Jobbágy et al., 2006; Piñeiro et al.,

2006). Ello estaría indicando que estas limitaciones no afectan en forma importante a los sistemas forestales, y han ofrecido, en cambio, la posibilidad de lograr muy buenas producciones en campos que albergaban tierras de menor valor que las agrícolas. Por otra parte, los incrementos que genera la forestación en la producción primaria podrían cobrar un valor adicional ante la posible consolidación y crecimiento de un mercado de bonos de carbono, estimulado por la entrada en vigor del protocolo de Kyoto (Wright et al. 2000). La mayor ganancia de carbono que generalmente presentan estos sistemas, acompañada por su retención más prolongada en los tejidos vegetales leñosos respecto de los herbáceos (Schlesinger, 1997), podría traducirse en una acumulación neta de carbono en las forestaciones que reemplazan pastizales de considerable valor comercial en el futuro (Nosetto et al., 2006).

Los cambios en la dinámica del agua generados por las forestaciones alteran los patrones de salinización a través de dos mecanismos. Por un lado, los árboles cambian las propiedades físicas del suelo, aumentando la infiltración y el movimiento del agua en el mismo, lo cual promueve el lavado de sales acumuladas superficialmente en tiempos pasados. Por otro lado, a través de su mayor capacidad evaporativa y profundidad radical, los árboles favorecen un proceso intenso y más profundo de acumulación de sales asociado al uso de agua freática.

Por ejemplo, el reemplazo de pastizales por forestaciones podría mejorar las condiciones físicas del suelo (mayor densidad de canales radicales, contenido de broza y actividad mesofáunica), aumentando la infiltración de agua en el mismo (Bharati et al., 2002; Eldridge y Freudenberger, 2005) y promoviendo el lavado de las sales; pero al mismo tiempo y en sentido opuesto, si la mayor evapotranspiración potencial de los sistemas dominados por árboles (Zhang et al., 2001; Farley et al., 2005) es satisfecha en parte por el agua freática, podría favorecer la concentración de sales de la misma.

Ratificando estos conceptos podemos mencionar que la alta conductancia aerodinámica que poseen los árboles les permite intercambiar agua y energía con la atmósfera a tasas hasta diez veces mayores que la alcanzada por la vegetación herbácea, generando patrones de evapotranspiración (ET) muy distintos en condiciones húmedas (Kelliher et al., 1993; Calder, 1998). En estas circunstancias, la mayor captura de energía advectiva realizada por el canopy de los árboles, se traduce en tasas de ET significativamente mayores que la de los pastos, quienes mantienen la ET más estrechamente acoplada con la disponibilidad de energía radiante. En condiciones de sequía, la cantidad de agua edáfica disponible constituye el control principal de la ET. En estas situaciones, diferencias en la capacidad de las plantas para acceder al agua, generalmente dictada por la profundidad de raíces, puede dar lugar a contrastes importantes en las tasas de ET (Calder 1998). Los árboles tienden a tener raíces más profundas que las plantas herbáceas (Canadell et al., 1996; Schenk y Jackson, 2002) lo cual les permitiría mantener mayores tasas de ET que los pastos cuando disminuye la disponibilidad hídrica en las capas superficiales del suelo (Calder et al., 1997; Sapanov, 2000).

Ampliando el análisis el mayor uso de agua realizado por las forestaciones puede dar lugar a otros cambios benéficos y perjudiciales. Mientras que el control de la erosión e inundaciones asociado a menores flujos superficiales de agua son efectos positivos (Scott y Lesch, 1997), la disminución en la recarga de los acuíferos y en los rendimientos de las cuencas son probablemente consecuencias negativas del proceso de forestación en pastizales (Bosch y Hewlett, 1982; Heuperman, 1999).

Dinámica del agua y las sales en la forestación sobre pastizales.

Los principales efectos pueden sintetizarse:

- mayor transpiración y profundidad de raíces determinan acumulación de sales en profundidad asociado en algunos casos al uso del agua freática.
- Menor evaporación del suelo por mayor canopy y broza (menor radiación solar en superficie).
- Mayor infiltración provoca lavado de sales de superficie a profundidad (drenaje profundo- biodrenaje).

Nosetto (2007) plantea dos áreas de estudio sobre la problemática. La primera de ella se corresponde con la costa argentina del Río Uruguay, la cual estaba originalmente cubierta en su mayor parte por pastizales compuestos por una mezcla de especies C3 y C4 de los géneros *Paspalum*, *Axonopus*, *Stipa*, *Bromus*, *Piptochaetium* (Landi et al. 1987). A partir de la década de 1940, cuando se establece la primera forestación comercial, los bosques implantados con *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliotti* y *Pinus taeda*, pasaron a ser uno de los usos de la tierra más importantes de la zona. A los fines de evaluar diferentes variables se seleccionaron numerosos lotes mayores a 10 ha ocupados por *E. grandis* y pastizales naturales. En la Figura 58 se representan las pérdidas evaporativas de agua y la radiación interceptada entre *Eucalyptus* y pastizales naturales para 7 fechas de muestreo. Como puede observarse tanto la EVT como el Índice de Radiación Interceptada por la vegetación fue superior en las forestaciones respecto a los pastizales, incluso las diferencias en EVT llegaron a duplicarse a favor de la forestación en la fecha en la cual el balance hídrico del suelo fue negativo (18/11/00), explicándose este fenómeno por la utilización del agua subterránea por parte de la forestación.

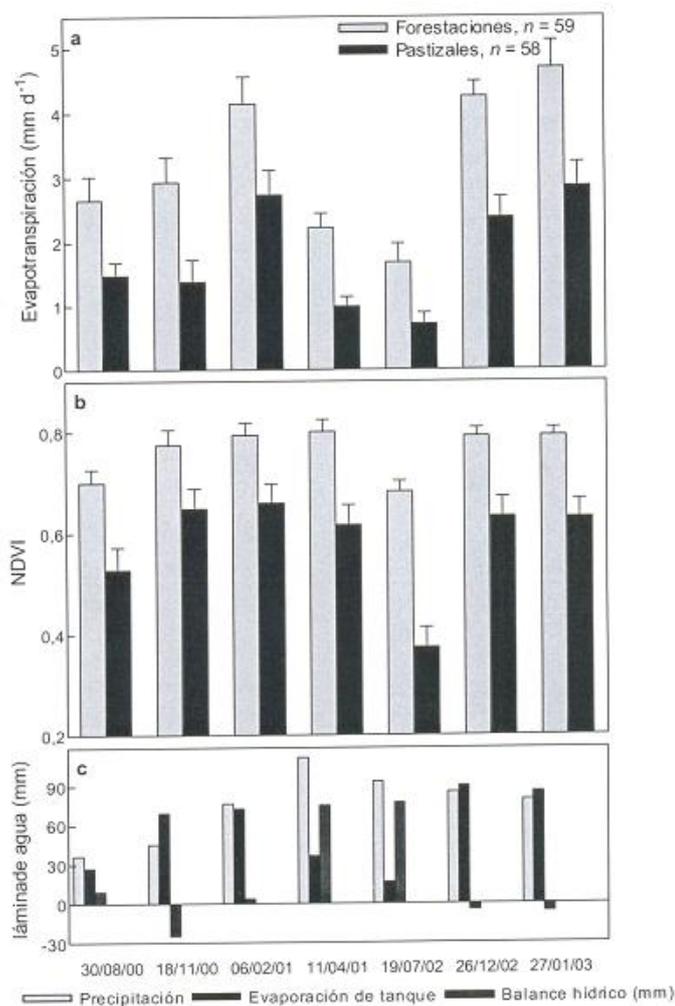


Figura 58. Pérdidas evaporativas de agua y radiación interceptada por *Eucalyptus grandis* y pastizales nativos en 7 fechas consideradas. La ET actual (a) y el NDVI (b) fueron estimadas a partir de imágenes LANDSAT. Las diferencias entre ambos tipos de vegetación fueron siempre significativas ($p < 0,01$). Barras: desvío standart. Pp: precipitación. Eta: ET del tanque. Balance hídrico (BH = Pp - Eta).

En la Figura 59 puede observarse la distribución estacional para el mismo ensayo.

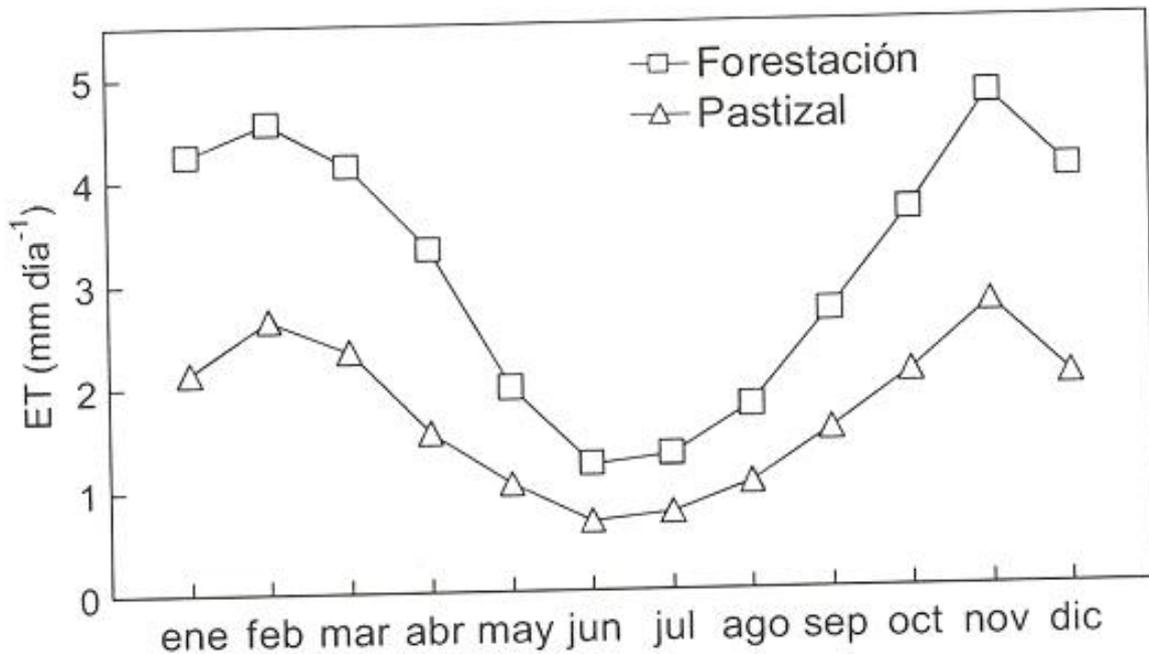


Figura 59. Patrones estacionales de ET e forestaciones de *E. grandis* y pastizales nativos

La otra región en estudio comprendió la Gran Llanura Húngara que constituye una gran planicie sedimentaria de origen eólico e hídrico bajo clima húmedo y subhúmedo de características muy similares a la Pampa Deprimida y Bajos Submeridionales de Argentina. La presencia de pastizales salinos cuya evapotranspiración no compensa las lluvias genera excedentes hídricos que se acumulan en superficie por la baja pendiente, la deficiente permeabilidad de los suelos acompañada de presencia de sales y sodio. El excedente hídrico genera comúnmente la presencia de niveles freáticos superficiales, favoreciendo la descarga localizada a través de la transpiración, evaporación directa del suelo o evaporación de charcos en las posiciones bajas del relieve, lo cual conlleva a la acumulación de sales en el perfil del suelo. Los lugares de estudio estuvieron constituidos por siete pares de forestación-pastizal (A,B,C,D,E,F,G) mediante transectas que atravesaron la forestación y los pastizales naturales. Las plantaciones forestales se corresponden con parcelas de 2 a 5 ha de Roble (*Quercus robur*) plantadas entre 1930 y 1965 y las parcelas de pastizales salinos estaban dominadas por *Alopecurus pratensis*, *Agropyron repens* y *Festuca pseudovina*. Respecto a los suelos en los diferentes sitios de muestreo no difirieron significativamente entre parcelas de pastizal y forestación, resultando de texturas en general franco limosa en las capas superficiales (0-10 cm) y arcillo limosa en los horizontes más profundos alcanzando tenores de 50% de arcilla.

En la Figura 60 pueden observarse las diferencias significativas en la C.E a nivel superficial para todos los sitios de muestreo entre pastizal y forestación, como así también la distribución de la C.E. a través de la transecta del sitio de muestreo E.

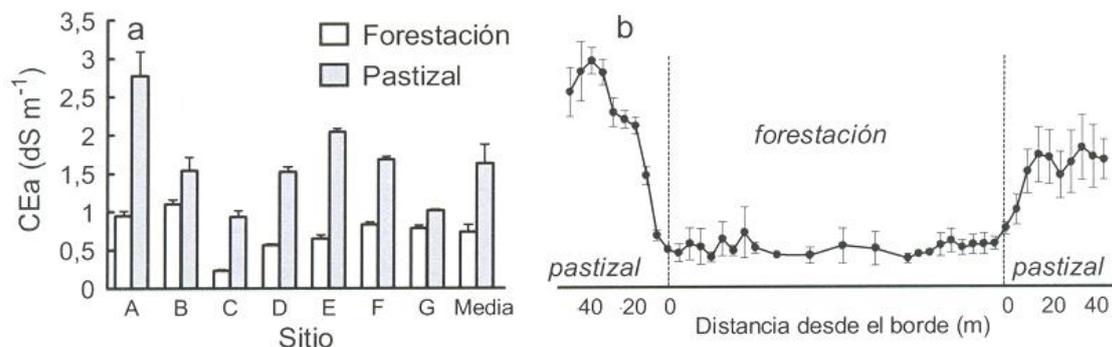


Figura 60. CE en 7 situaciones de forestación-pastizal y su promedio (a). Valor medio de la CE y su desvío standart a lo largo de transectas con puntos cada 5-10 m (b).

En referencia al nivel freático puede observarse su fluctuación para uno de los sitios de muestreo (Figura 61).

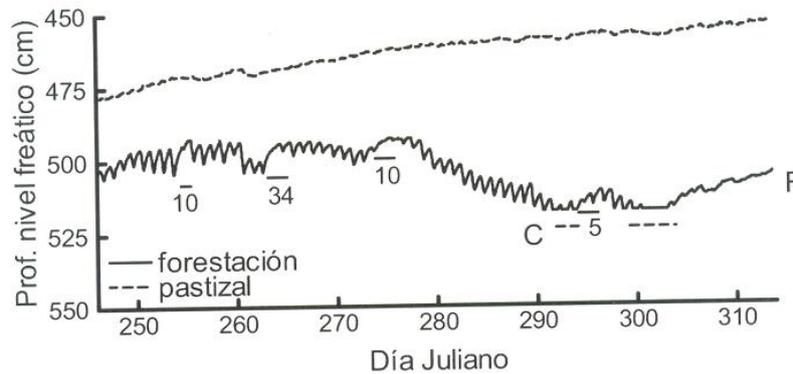


Figura 61. Dinámica de la napa freática bajo un pastizal nativo y una forestación de roble. C: comienzo y F: final del período de caída de hojas.

Respecto a la incidencia de las obras hidráulicas de drenaje y la forestación sobre pastizales salinos de la región en estudio que podrían asimilarse a nuestra Pampa Deprimida se presenta el siguiente esquema interpretativo desarrollada por el autor (Nossetto, 2007) (Figura 62).

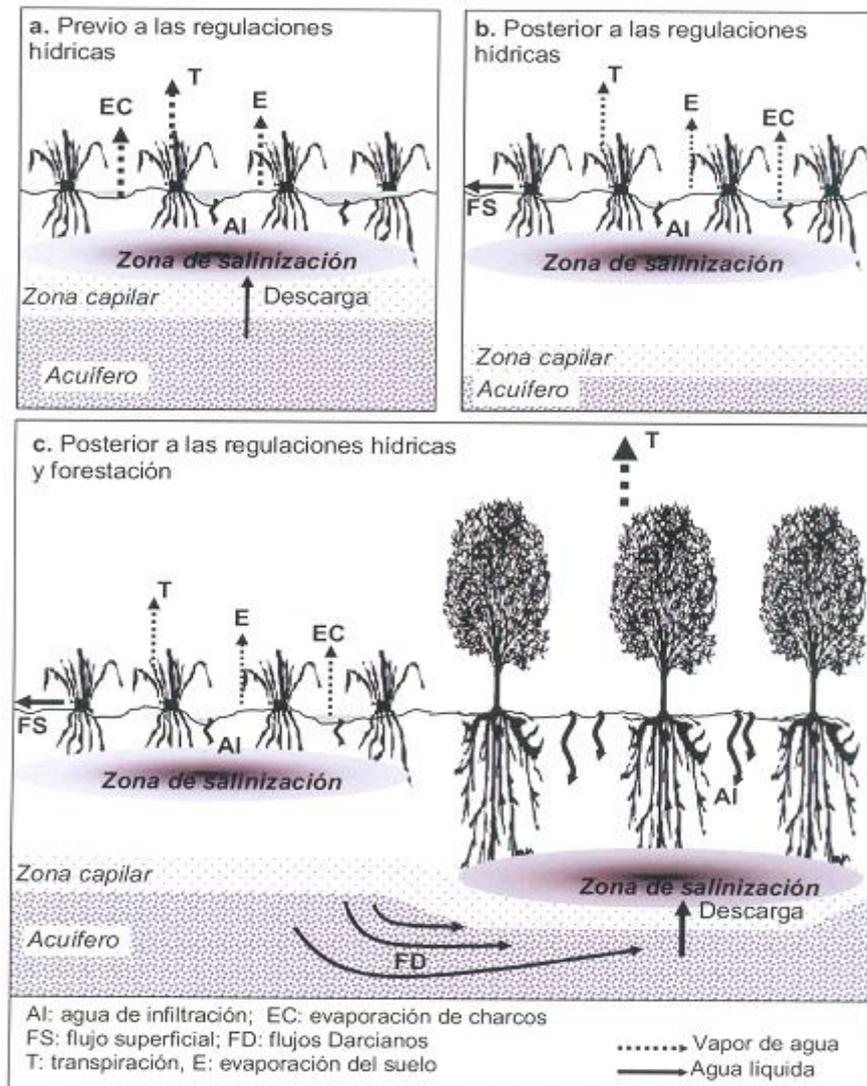


Figura 62. Mecanismos hipotéticos que originan los patrones de salinización observados en los pastizales y forestaciones de la Gran Llanura Húngara.

Como se ve en la Figura 61, previo a las regulaciones hídricas, la napa freática (NF) estaba lo suficientemente superficial como para favorecer un régimen de descarga sostenido por T y ET del suelo. Ocasionando acumulación de sales en la capa superficial del suelo (a). Luego de las regulaciones hídricas, la NF desciende y se interrumpe el régimen de descarga, pero las sales permanecen a causa de las pobres condiciones físicas del suelo que evitan su lavado (b). Con las forestaciones las sales fueron lavadas de las capas superficiales pero se restableció el régimen de descarga que condujo a una acumulación de sales más fuerte y profunda (c).

Impactos de la Forestación sobre pastizales con limitaciones por sodio-salinidad-anegabilidad

Efectos Positivos

- Aumento de la productividad primaria
- Descenso de la napa freática
- Mejora del Biodrenaje
- Acumulación de sales en profundidad
- Lavado del Na en profundidad
- Disminución de inundaciones y anegamientos
- Control de la erosión en áreas con pendiente

Efectos Negativos

- Disminución de la Recarga del acuífero (en Regiones de B. H. negativo).
- Disminución del Rendimiento Hídrico de la Cuenca (caudal de cursos de agua).
- Aumento de la salinización en el suelo y/o en el agua freática (Regiones con B.H. negativo para forestales- corresponde a un B.H. Anual de + 350 mm con cobertura de pastizal y napa freática alta – corresponde a 2,5 a 3 m de profundidad para especies forestadas).

El siguiente esquema desarrollado por Nossetto y Jabboágy (2007) nos permitirá ayudar a predecir las causas y riesgo de salinización en pastizales forestados estableciendo un orden jerárquico de factores climáticos, hidrogeológicos y biológicos. Figura 63.

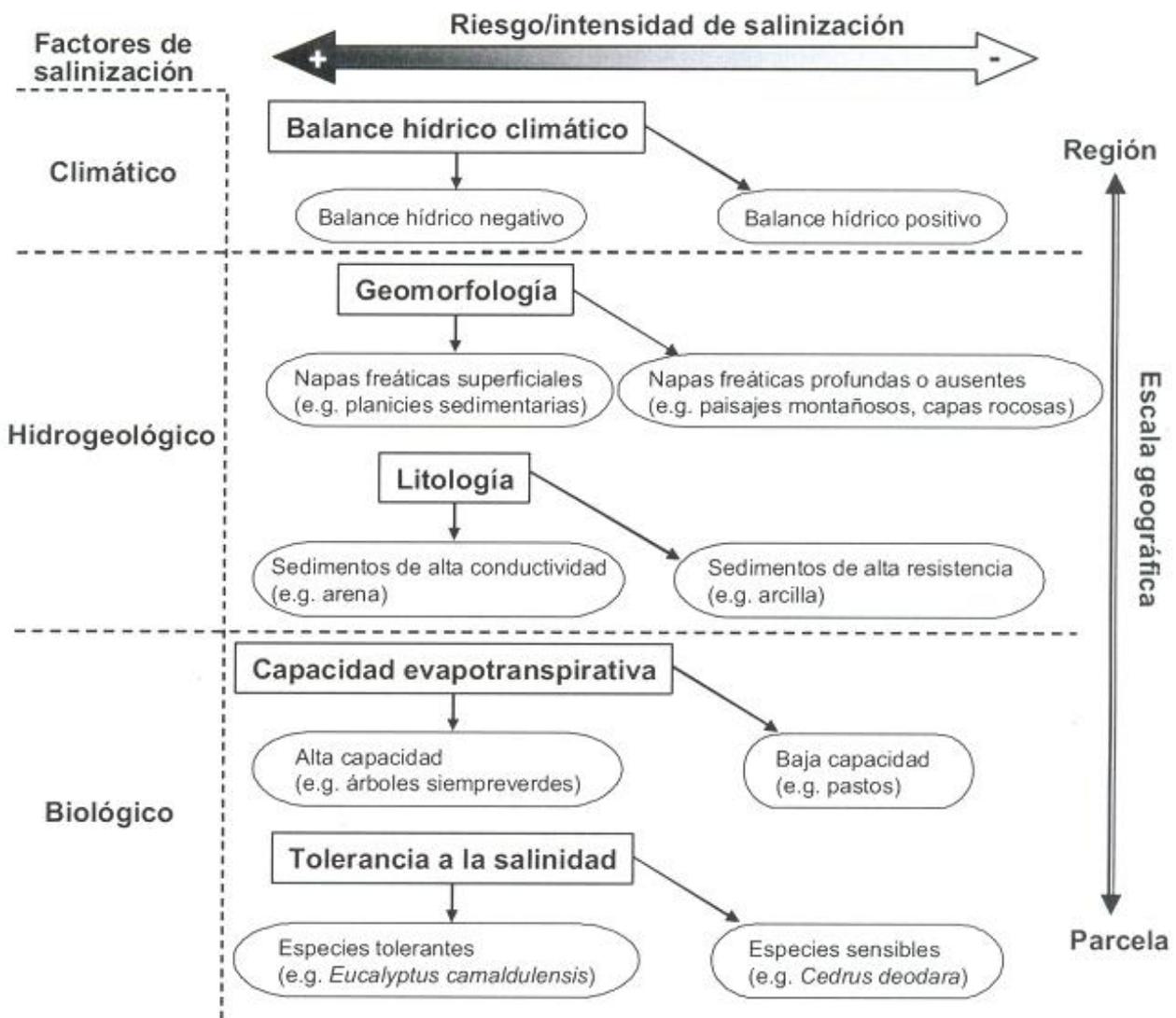


Figura 63. Modelo jerárquico para predecir la salinización luego de cambios en la vegetación.

El balance hídrico climático define la posibilidad de salinización a escala regional. Cuando la lluvia no es suficiente para abastecer las necesidades de la vegetación y el agua subterránea tiene la capacidad de suplir ese déficit, puede acontecer la salinización. Es así, que factores hidrogeológicos afectan la salinización a escala de región. Los factores biológicos regulan la intensidad de este proceso a escala de parcela a través de su ET y tolerancia a la salinidad.

Del análisis del modelo jerárquico podemos deducir que en aquellas situaciones con balance hídrico negativo para especies forestales (igual o menos de 350 mm anuales bajo condición de pastizal según los autores); napa cercana a superficie (2,5 a 3 m según los autores) y suelos arenosos o franco arenosos con especies de alta tolerancia y siempre verdes existen altos riesgos de salinización del suelo por aumento de la concentración de sales en la napa freática por debajo de la zona radicular que puede volver a contaminar el perfil del suelo. Esta situación puede darse con frecuencia en la forestación de bajos salinos y sódicos de la Región Pampeana subhúmeda (Ej: P. Arenosa, N.O de la Pcia de Bs As). No así en la Región Pampeana húmeda (Ej: Centro-Este de Pcia de Bs As, P. Deprimida) pues el B.H. Anual resulta netamente positivo y las contribuciones de agua subterránea a la evapotranspiración serán ocasionales durante cortos períodos de sequía estacional que serán contrarrestados por los mayores aportes de precipitación dado el régimen de lluvias claramente favorable.

El siguiente esquema desarrollado por los autores mencionados permite visualizar el efecto negativo de las forestaciones sobre pastizales bajo las condiciones apuntadas de: balance hídrico anual negativo, napa alta, texturas arenosas y especies resistentes siempre verdes (Figura 64).

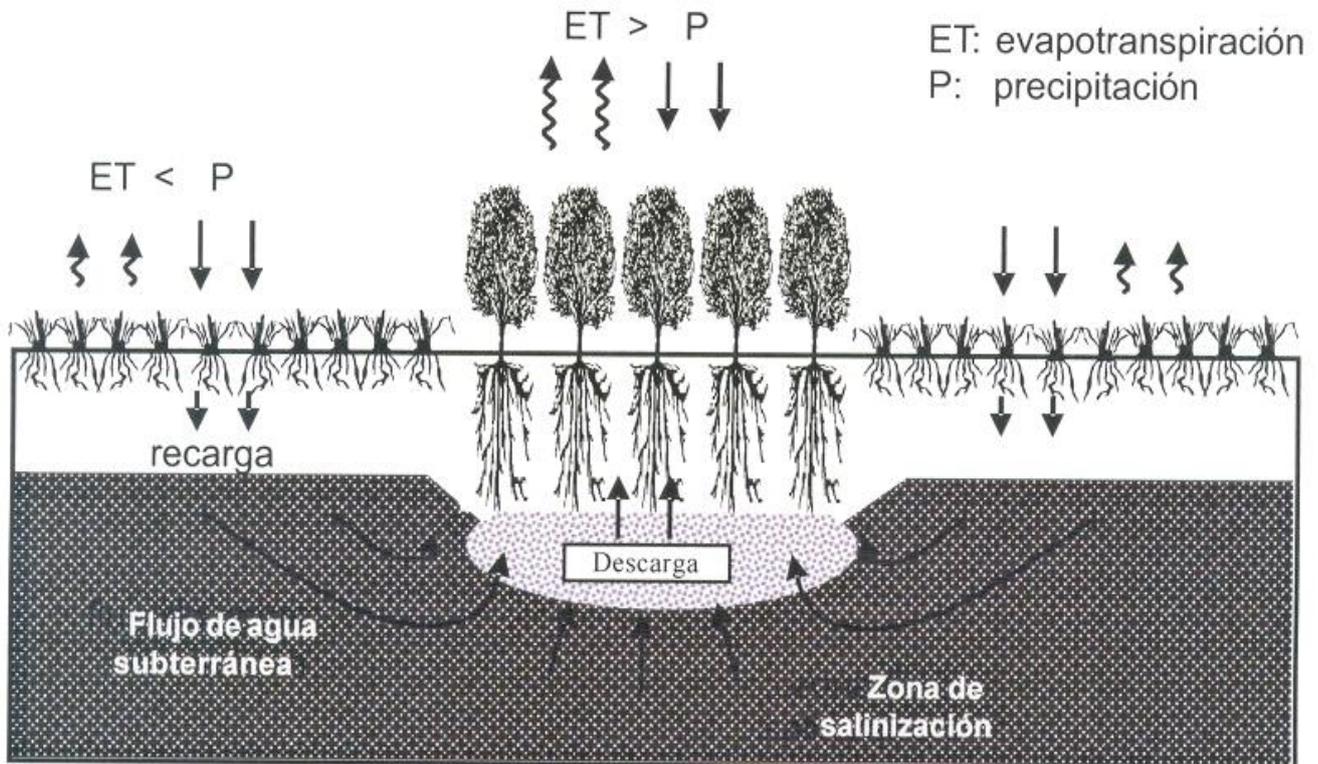


Figura 64. Modelo conceptual de los efectos de la dinámica del agua subterránea de una plantación de árboles aislada en un entorno de pastizales.

En la Figura 63 puede verse que la plantación recibe un aporte advectivo de energía de los pastizales vecinos, que junto con la mayor rugosidad y mayor área foliar de los árboles dan como resultado tasas más altas de ET. Esto a su vez conduce al mayor consumo de agua subterránea y a menores niveles de recarga. Las áreas en las que había recarga neta de aguas subterráneas experimentan una inversión de flujos hidrológicos después de la plantación de los árboles, por lo que hay más pérdida de agua y salinización. Este proceso ha sido documentado en varios sitios de la Región Pampeana (Jobbagy y Jackson, 2004).

Es de destacar que si tratara de una región húmeda el balance hídrico en la zona forestada sería positivo ($EV < P$) y actuaría como zona de carga, razón por la cual, tal lo explicado, no existiría riesgo de salinización. En otras situaciones hay que considerar que la napa puede estar a más de 3 m de profundidad y el riesgo de salinización de estos suelos aún bajo balance hídrico negativo sería sensiblemente menor (Ej: forestación en médanos del NO Bonaerense).

Manejos recomendados para mitigar efectos negativos de la forestación sobre pastizales

Rotaciones con cultivos y pasturas

Especialmente recomendada para regiones semiáridas donde la forestación en zonas de recarga (médanos) puede comprometer la disponibilidad de agua desde el acuífero con sus consecuencias para diferentes usos. No obstante algunos autores recomiendan la forestación de estas áreas como una forma de disminuir los anegamientos de áreas bajas de descarga y así lograr un equilibrio a través de las rotaciones agropecuarias-forestales.

Sistemas silvo-pastoriles

Los sistemas silvopastoriles podrían ser una alternativa en bajos de regiones semiáridas con freática alta a los fines de mitigar la acumulación de sales en la napa freática producto de la forestación. Asimismo, en dichas regiones y también en las húmedas, permiten una mejor circulación del capital invertido adaptado a las características propias de los productores ganaderos de de cría y recria.

Especies de alta resistencia a la salinidad, sodicidad y anegamiento

Respecto a este punto se deberá seleccionar las especies resistentes a las condiciones de diagnóstico del área a forestar a los fines de evitar fracasos por muerte o significativa baja de rendimiento del monte forestal

Para nuestras condiciones las especies arbóreas más apropiadas son aquellas de hoja ancha y que mantienen las hojas todo el año, ya que con esto se favorece la transpiración, con el consiguiente abatimiento de la napa freática. Con esas características, las especies más interesantes son las del género *Eucalyptus*. A continuación se citan las más tolerantes a la salinidad, y que prosperan en las condiciones del centro argentino: *Eucalyptus amplifolia*, *E. astringens*, *E. botryoides*, *E. longifolia*, *E. occidentalis*, *E. sargentii*, *E. umbra*, *E. diptera*, *E. dundasii*, *E. gomphocephala*, *E. pilularis*, *E. robusta*, *E. rudis*, *E. camaldulensis* y *E. siderophloia*. En la Tablas 17 y 18 se dan detalles al respecto.

Tabla 17. Requerimientos edáficos y características productivas de diferentes especies forestales (Extraído de Alconada Magliano, Bussoni, Rosa y Carrillo Rivera).

Espece	Clima Temperatura humedad	Drenaje	Ubicación topográfica	Textura Profundidad	pH	CE (dS m ⁻¹)	MA m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	Corte año
<i>Pinus taeda</i>	Plástico, resistente al frío, ETP media 0,3 m ³ /día	Resistente mal drenaje	Bajo, media loma	Franco, > 0,75 m	4,5- 6,5	No calcáreo	18	25
<i>Eucalyptus viminalis</i>	Resiste frío y sequía	Buen drenaje	Loma, mayor a 0,75 m de profundidad	Arenoso	< 8	< 4	18- 20	13
<i>Eucalyptus teriticornis</i>	No resiste frío, requiere alta humedad	Imperfecto drenaje, no encharcable	Bajos a media loma, ligeramente ondulado	Fr-arcilloso a arcilloso	8,3	4	12	30
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	No tolera frío extenso, resiste heladas y sequía	Mal drenaje e inundación temporal	Bajos	Arcilloso, > 0,75 m	>8,8	> 8	12- 15	25
<i>Prosopis flexuosa</i>	Asociado a la freática, muy resistente a la sequía y clima frío	Asociada a más humedad que <i>P.</i> <i>chilensis</i>	Variable	Arenoso	7,6- 8,9	Salino degradado	13	> 30
<i>Prosopis chilensis</i>	Freatrófita, con < 300 mm de lluvia	No tolera anegamiento	Variable	Arenoso o Franco- arenoso	7,6- 8,9	Salino- sódico degradado	13	> 30
<i>Prosopis caldenia</i>	Resistente a frío y sequía	tolerante	Bajos, depresiones	Arenoso o Franco- arenoso	7,6- 8,9		13	> 30

Tabla 18. Tolerancia a la salinidad de diferentes especies forestales

Especie arbórea	Máxima salinidad reportada (dS m ⁻¹)	Referencia
Eucalyptus camaldulensis	35	House et al. (1998)
Eucalyptus meliodora	33,6	House et al. (1998)
Eucalyptus cinerea	15	Taw (2003)
Pinus radiata	18,9	Stirzaker et al. (2002)
Cedrus deodara	5,8	Wu et al. (2001)
Cupressus sempervirens	17,7	Benito et al. (2005)
Casuarina cunninghamiana	25,7	Horse et al. (1998)
Quercus robar	18,9	Spennemann y Marcar (1999)
Populus deltoides	10	Stirzaker (2002)
Maclura pomifera	10	Swift (1997)

Forestación de un porcentaje de la cuenca.

La forestación de cuencas originalmente ocupadas por otros usos agropecuarios puede traer como consecuencia la disminución de los caudales de los cursos de agua por debajo de su nivel ecológico con las consecuencias negativas sobre los ecosistemas y comprometiendo otros usos del agua incluso el humano. A su vez puede afectar la recarga de los acuíferos. Esta situación es más comprometida en regiones semiáridas y subhúmedas. Se estima que un 50% de forestación de una cuenca puede traer como consecuencia la disminución de los caudales de los cursos en 2/3 de su valor original.

En la Figura 65 puede observarse la disminución de los rendimientos hídricos para dos ríos de la Argentina localizados en Corrientes y San Luis.

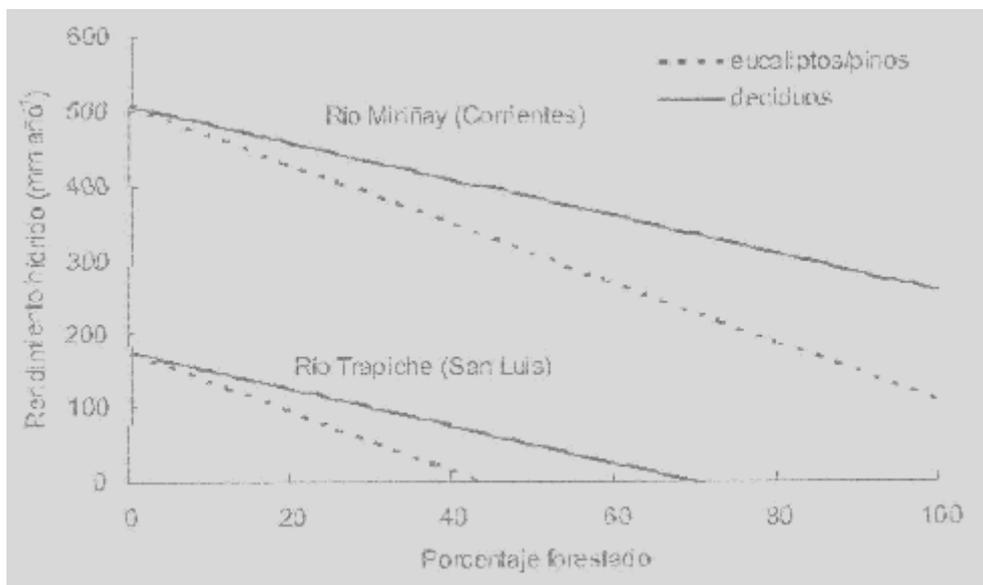


Figura 65. Cambios provocados en el rendimiento hídrico en las cuencas de los ríos Miriñay (Corrientes) y Trapiche (San Luis) ante aumentos de la superficie forestada con eucalyptus/pino y especies deciduas. Se consideró una disminución de 40 mm y 25 mm en el rendimiento por cada 10% del aumento de la superficie forestada, respectivamente para estas especies.

Coberturas y mulches

Conjunto de técnicas consistentes en la aplicación de residuos de vegetación viva o muerta sobre el suelo, que produzcan una cobertura total del mismo durante la mayor parte del año, y especialmente en aquellas épocas de alta evapotranspiración y/o precipitación.

Para tierras con mal drenaje y suelos sujetos a salinización por freática, es una técnica que reduce el ascenso capilar de sales y mejora la infiltración en la superficie del suelo. De aplicación tanto en áreas bien drenadas, como en todos las variantes de tierras mal drenadas, en especial en aquellas donde se ha reducido la cobertura superficial por la vegetación, por debajo de 70-80 %, como es el caso de muchos pastizales de espartillo, pelo de chanco, gramón, cachiyuyo, agropiros degradados, etc.

La aplicación de estas técnicas es esencial cuando se pretende recuperar una playa salina mediante intersiembras o plantación y puede complementarse con el aflojamiento, en las situaciones que lo permitan.

Revegetación de playas salinas

Técnicas conducentes a la recuperación de la cubierta vegetal perdida por problemas de manejo. Se incluyen aquí una combinación de las siguientes técnicas:

- Clausuras al pastoreo
- Coberturas y mulches
- Intersiembras
- Transplante de especies resistentes

Práctica a aplicar en sitios con degradación extrema por salinización-inundación, comunes de encontrar en áreas periféricas a lagunas, espartillares, pastizales de pelo de chanco y/o agropiro degradados, arbustales de cachiyuyo degradados, ambientes con extrema salinidad superficial.

Transplante de especies resistentes

Técnica de introducción de especies adaptadas a determinadas condiciones ambientales mediante transplante de órganos vegetativos (rizomas o estolones). Las especies actualmente en condiciones de ser utilizadas son “gramilla blanca” (*Paspalum vaginatum*) y “pasto laguna” (*Echinochloa helodes*).

Los ambientes más adecuados para la utilización de estas especies son los espartillares muy inundables y con salinidad media a baja, característicos de ambientes semidulces asociados a napas de baja salinidad. Asociada a otras técnicas puede utilizarse para las primeras etapas de recuperación de playas salinas degradadas.

Las etapas que deberían cumplirse son:

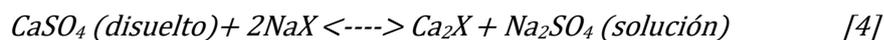
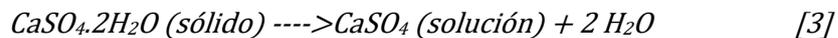
1. Localización de las fuentes de rizomas y estolones: Para el caso de gramilla blanca, las poblaciones más importantes se encuentran asociadas a bajos dulces del sistema de grandes lagunas (Olmos, Assunta, Ruiz Diaz de Guzman).
2. Extracción del pan de tierra o champa: La champa extraída debe tener como mínimo 5 cm de espesor y 50 cm de diámetro, de modo de asegurar una cantidad suficiente de rizomas y estolones. Posteriormente las champas son procesadas (lavadas) para poder individualizar los órganos vegetativos de plantación
3. Acondicionamiento de los órganos de propagación: Una vez lavados se seccionan en trozos que aseguren 2 o 3 nudos (yemas).
4. Plantación: La misma deberá hacerse en primavera, enterrando rizomas y estolones a no más de 5 cm de profundidad y a 1 m x 1m, teniendo la precaución, en el caso de los estolones, de dejar un nudo descubierto. Es esencial que la plantación se realice bajo cobertura o mulch (ver técnica específica).
5. Uso y mantenimiento: Se recomienda no pastorear dentro del primer año posterior a la plantación, y con bajas cargas en los dos años subsiguientes. Deberá dejarse clausurada una pequeña área vegetada a los fines de que sirva como futura área de vivero de cría.

Enmiendas para la corrección química

Las enmiendas son minerales o subproductos industriales de escaso valor intrínseco y para los cuales los gastos de transporte significan el principal costo en su aplicación a los suelos. Las dosis usuales son del orden de toneladas por ha. Por ese motivo, las enmiendas se utilizan normalmente en forma local y, por lo tanto, no siempre es una cuestión de elección, sino de disponibilidad. El yeso es de distribución generalizada y, por ello, es la enmienda más utilizada, aunque en diversas zonas se usan otras enmiendas de mayor o menor eficiencia.

Yeso

El yeso ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) es la enmienda más difundida para rehabilitar suelos sódicos (Figura 66). Esto es debido a su disponibilidad y bajo costo. El yeso aporta calcio y electrolitos para recuperar suelos sódicos o para evitar la sodificación de suelos salinos. Se considera que la respuesta inicial al yeso resulta de la concentración electrolítica, que flocula al suelo ya dispersado o evita que se disperse si aun no lo está. En la medida que mejora la penetración del agua en el suelo, va cobrando importancia el intercambio del Na^+ por el Ca^{2+} . La magnitud de los fenómenos de cambio varía considerablemente según las condiciones de suelos y ambiente. La solubilidad del yeso depende de la composición de la solución del suelo y de la composición de la fase de intercambio. La reacción puede sintetizarse en:



X representa la fase intercambiable (por ejemplo, las arcillas)

La eficiencia del yeso en general es baja, en el orden del 20 al 30 %. Los efectos del agregado de yeso sobre las propiedades del suelo pueden mantenerse en años subsecuentes, a condición que el nivel freático no incorpore sodio al perfil. Tradicionalmente el yeso se aplica en superficie y se incorpora al suelo con una labor superficial, aunque se han desarrollado otras técnicas como la aplicación en forma vertical y el agregado en forma disuelta. La baja eficiencia de la enmienda incrementa los costos, por lo que en los últimos años se ha tendido a utilizar dosis anuales pequeñas, por ejemplo, 5 toneladas por ha, a lo largo de cierto tiempo, en lugar de dosis altas una sola vez.



Figura 66. Aplicación de yeso en suelos sódicos en Noetinger, provincia de Córdoba.

El principal efecto del yeso es mejorar la capacidad del suelo de infiltrar agua de lluvia. En un trabajo realizado en el área de Coronel Vidal, provincia de Buenos Aires, se observaron descensos significativos en la tasa de escurrimiento superficial como resultado del agregado de yeso (Tabla 19). Estos descensos en el escurrimiento demuestran que el agua de lluvia pudo infiltrar en el suelo.

Costa y Godz (1999) encontraron que el agregado e incorporación de yeso en los primeros 10 cm del suelo, bajo condiciones de secano, redujo los valores de sodio superficiales. Con 15 Mg ha^{-1} se mejoraron

los primeros 20 cm de suelo. Con dosis más elevadas (35 y 60 Mg ha⁻¹) fue posible reducir significativamente los contenidos de sodio en los horizontes subyacentes, donde el yeso no fue mezclado con el suelo. Para alcanzar a reducir el sodio hasta los 45 cm de profundidad fue necesario aplicar 60 toneladas de yeso por hectárea. Después de 10 años se comenzó a revertir el efecto del enyesado.

Tabla 19. Efecto del enyesado sobre la tasa de escurrimiento en un Natracuol Típico de Coronel Vidal (Godz et al., 1983).

Fecha	Lluvia mm	Tratamiento	Escorrimento		Relación sin yeso/con yeso
			%	mm	
21-dic	12	Testigo	34,36	4,12	10,57
		Yeso	3,25	0,39	
24-dic	20	Testigo	22,59	4,52	9,22
		Yeso	2,45	0,49	
31-dic	26	Testigo	10,26	2,67	29,31
		Yeso	0,35	0,09	
05-ene	21,15	Testigo	25,28	5,44	13,97
		Yeso	1,81	0,39	
27-mar	54,5	Testigo	43,65	23,79	8,02
		Yeso	5,44	2,97	

Se conocen varios modelos para estimar las dosis de la enmienda a utilizar en la recuperación de estos suelos. Estos modelos utilizan distintas propiedades del suelo (Capacidad de Intercambio Catiónico, PSI, etc.), así como características de la enmienda a utilizar y del sistema de manejo (irrigación, por ej.). En áreas con escasa información puede estimarse tentativamente la dosis de acuerdo con los meq de sodio que se desea reemplazar por calcio. En otros lugares se han realizado ensayos que dan idea de las dosis adecuadas.

Un ejemplo de la cantidad de enmienda aplicar está relacionada con la cantidad de sodio a ser removido del suelo y en forma teórica se puede calcular como:

$$\text{Yeso (meq/100g)} = \text{CIC (PSI inicial - PSI final)} / 100$$

PSI inicial: es el medido antes de comenzar la recuperación

PSI final: es el valor deseado, habitualmente considerado 10

Por ejemplo, para un suelo con un PSI inicial de 25 y una CIC de 20 meq/100g de suelo.

$$\text{Yeso (me/100g)} = \frac{20 \times (25 - 10)}{100} = 3.0 \text{ meq/100 g suelo}$$

Dado que 1 meq de yeso es equivalente a 860 ppm de yeso, y considerando que una hectárea de suelo hasta una profundidad de 20 cm pesa aproximadamente 2.600 toneladas, la cantidad de yeso teóricamente requerida para tratar esa profundidad de suelo será:

$$\text{Requerimiento de yeso/ha 20 cm} = 860 \times 2.6 \times 10^6 \times 3.0 = 6.708 \text{ kg}$$

En la práctica el yeso tiene impurezas por lo que debe usarse un factor de corrección (factor de pureza) en cada caso. Además debe destacarse que la eficiencia de remplazo de sodio por calcio no es del 100 %, fundamentalmente debido a la presencia de sodio libre. Por esta razón se recomienda que la cantidad de yeso a aplicar sea incrementada de acuerdo con los equivalentes de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio libre. Estudios efectuados por el U.S. Bureau of Reclamation (no publicados) en Idaho, EE.UU., han demostrado que, en términos generales, el yeso tiene una eficiencia de solo el 60 a 75 % en el reemplazo de sodio intercambiable, porcentaje éste que puede ser utilizado para ajustar los valores calculados (FAO Soil Bulletin N° 42)

Otro ejemplo de cálculo de la dosis de yeso es la siguiente:

El cálculo se basa en el PSI original y el deseado, expresando, a partir de esas cifras, la cantidad de Na^+ a ser reemplazado. A modo de ejemplo se presentan los cálculos para un suelo sódico con las características que se mencionan en la Tabla 20.

Se plantea la situación de pretender reducir el PSI de 6% a 3% en el horizonte superficial (HA) y de 22% a 10% en el horizonte E (HE).

Horizonte A (HA):

$$PSI = 6\% = 1,3 * 100 / 20,9$$

$$PSI = 3\% = X * 100 / 20,9, \text{ por lo tanto } X = 3 * 20,9 / 100 = 0,63 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$$

Es decir, de un valor de $1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Na^+ se pretende llegar a $0,63 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, o sea, reemplazar $0,67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, lo que equivale a $0,154 \text{ g kg}^{-1}$ de Na^+ (Peq Na = 23 gr). Efectuando los cálculos a nivel de ha, asumiendo una densidad de $1,2 \text{ t (m}^3)^{-1}$, se tiene:

$$\text{Peso HA} = 10.000 \text{ m}^2 * 0,23 \text{ m} * 1,2 \text{ t (m}^3)^{-1} = 2.760 \text{ t ha}^{-1}$$

$$\text{Na int. a reemplazar} = 0,154 * 2.760 = 425 \text{ kg ha}^{-1}$$

Horizonte E (HE):

$$PSI = 22\% = 3 * 100 / 13,6$$

$$PSI = 10\% = X * 100 / 13,6 \text{ por lo tanto } X = 10 * 13,6 / 100 = 1,36 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$$

Es decir de un valor de $3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Na^+ se pretende llegar a $1,36 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, es decir reemplazar $1,64 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, lo que equivale a $0,377 \text{ g kg}^{-1}$ de Na^+ .

Efectuando los cálculos a nivel de ha asumiendo densidad $1,3 \text{ t (m}^3)^{-1}$ se tiene:

$$\text{Peso HE} = 10.000 \text{ m}^2 * 0,12 \text{ m} * 1,3 \text{ t (m}^3)^{-1} = 1.560 \text{ t ha}^{-1}$$

$$\text{Na int. a reemplazar} = 0,377 * 1.560 = 588 \text{ kg ha}^{-1}$$

Sumando las necesidades de enyesado de los horizontes A (425 kg ha^{-1}) y E (588 kg ha^{-1}), se tiene un total de 1.013 kg ha^{-1} .

Tabla 20. Composición del complejo intercambiable de un suelo sódico.

Horizonte	A	E	Bt
Profundidad (cm)	0-23	23-35	35-80
CIC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	20,9	13,6	29,0
Cationes de intercambio ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)			
Ca^{2+}	11,1	7,2	9,2
Mg^{2+}	2,4	2,2	4,5
Na^+	1,3	3,0	12,3
K^+	1,3	0,9	3,0
PSI (%)	6	22	42

El valor obtenido a través del cálculo presentado debe afectarse por la eficiencia del producto, dada por su pureza y el tamaño de partícula, y por la tasa de intercambio, es decir el porcentaje de Ca^{2+} que es capaz de reemplazar al Na^+ adsorbido. Esta capacidad de intercambio depende de la concentración total de sales y del PSI, siendo mucho mayor ante elevados valores de PSI (Rhoades, 1982). La remoción del Na^+ a PSI < 10% puede ser reducida, pues parte del Ca^{2+} reemplaza al Mg^{2+} intercambiable, pudiendo en estos casos la eficiencia ser menor al 30%. La eficiencia también puede ser reducida en texturas finas debido al lento intercambio ocurrido dentro de las unidades estructurales de la microporosidad (Manin *et al.*, 1982).

- Sulfato de hierro:
 - $2 \text{ Fe SO}_4 + 3 \text{ H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{ H}_2 \text{SO}_4 + \text{FeO} / \text{Fe(OH)}_2$
 - $\text{H}_2 \text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - suelo – $\text{Na}_2 + \text{CaSO}_4 \leftrightarrow \text{suelo-Ca} + \text{Na}_2\text{SO}_4$

- Para el caso de un Solonetz típico (pH en pasta saturada 8,5) sin CaCO_3 :
 - El S reacciona con el suelo:
 - suelo – $\text{Na}_2 + \text{H}_2 \text{SO}_4 \leftrightarrow \text{suelo-2H} + \text{Na}_2\text{SO}_4$

 - Si se aplica CaCO_3 :
 - suelo – $\text{NaH} + \text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{suelo-Ca} + \text{NaHCO}_3$

En áreas cercanas a yacimientos de sulfuros, azufre, otros sulfatos o áreas cercanas a industrias que producen subproductos ricos en ácido sulfúrico, cloruro de calcio, sulfato ferroso, ácido clorhídrico y otros, éstos materiales predominan por razones de costos. En algunas circunstancias, la toxicidad o la perturbación del medio ambiente o peligrosidad del manipuleo de estos subproductos influye en la decisión del uso. El caso más conocido es el ácido sulfúrico residual de diversas industrias que se aplica como enmienda a los suelos sódicos, reduciendo su influencia contaminante sobre el medio ambiente.

En muchas circunstancias la permeabilidad de suelos muy sódicos es tan baja, que el incremento logrado con la aplicación de yeso es inadecuado para completar una recuperación en un tiempo razonable. En esos casos, otras enmiendas más solubles, como el cloruro de calcio (Cl_2Ca) o el ácido sulfúrico ($\text{SO}_4 \text{ H}_2$) aceleran la rehabilitación.

Enyesado en bandas

En las condiciones de freática fluctuante dentro de la profundidad crítica, y con alto contenido de Na^+ no es aconsejable la práctica del enyesado masivo, tal como se aplica en áreas bajo riego, ya que, al no eliminarse el aporte de sales y Na^+ , la adición de una enmienda cálcica no tiene efectos significativos.

No obstante puede recurrirse a agregados de pequeñas cantidades de corrector en las líneas de siembra a los fines de producir una mejora física (aumentar la agregación) y físico-química (reducir el pH) del micrositio de germinación de las especies forrajeras, en estas condiciones de suelos sódicos o salino-sódicos.

La técnica requiere aun de mejoras y adaptaciones, pero es de aplicación en todas las condiciones donde sea viable la intersembrado de forrajeras, y preferiblemente con el suelo cubierto con vegetación. No es recomendable su utilización en suelo desnudo, ya que en esas condiciones, la germinación está impedida por el exceso de sales, y no por las malas condiciones físicas.

Otra forma de enmendar suelos sódicos es a través de la labranza profunda también llamado "metodo mecánico". Se desarrollaron arados profundos (algunos superan el metro de profundidad de labor). Estos arados mezclan los horizontes del suelo, "diluyen" así el horizonte B nátrico en la masa de todo el perfil, floculando los coloides dispersos con las sales y el calcáreo o yeso presentes en el horizonte C. De esta manera, se crea un nuevo suelo. Como aspectos negativos se encuentra la eliminación del horizonte A y con ello la caída del suministro natural de nutrientes y el riesgo de ascenso de capas freáticas. Esta práctica se estudió en muchos países, incluyendo la Argentina, pero a pesar de sus supuestos virtudes nunca se difundió, ya que su costo es muy elevado y es así su rentabilidad es baja para las producciones extensivas que se realizan en estos suelos (Lavado y Cairns, 1980).

Uso de enmiendas biológicas

Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos son, en general, subproductos de la producción animal: estiércoles de origen vacuno, aviar, porcino o equino. Hay también abonos que son subproductos de agroindustrias. Un factor clave para la utilización de estos residuos es la distancia a recorrer, pues el mayor problema de utilización no es el costo, sino la logística (e.g. almacenaje, transporte, etc.). En este sentido, en los campos ganaderos existen numerosas oportunidades de utilización de estos productos, las que a menudo se desaprovechan, sea por desconocimiento, desidia, o por falta de maquinaria para espacir a campo (Figura 67).



Figura 67. Estercoladora esparciendo abonos orgánicos a campo.

Caben como ejemplos, la utilización del estiércol de corrales de encierre, o de piletones de tambo (Figura 68). Estos piletones debieran ser eliminados para producir leche de máxima calidad.

Inclusive, el traslado de los comederos o rollos de pasto hacia ambientes de suelos sódicos genera un continuo aporte de material fecal, distribuido sobre la superficie del suelo de esos ambientes, que contribuye a su mejoramiento (Figura 69).



Figura 68. Piletón de tambo con residuo del lavado de la sala de ordeño.



Figura 69. Comederos instalados en ambientes con suelos sódicos del partido de Arrecifes, provincia de Buenos Aires (Damiano y Taboada, 2005).

La adición a los suelos de abonos orgánicos no sólo aporta nutrientes esenciales (Tabla 22), sino que también puede mejorar sus propiedades físicas. Estas mejoras físicas son particularmente cruciales en los suelos sódicos, aquejados precisamente por un deficiente funcionamiento físico-hídrico. Como resultado de estas mejoras se producen aumentos significativos en la productividad forrajera de estos ambientes. En la Figura 70, se observa de qué manera la producción de una pastura de agropiro aumenta con dosis crecientes de biosólidos.

Tabla 22. Concentración de nutrientes en varios abonos (valor agronómico). g

Nutriente %	Cama de Caballo	Cama de Pollo	Biosólido
Nitrógeno	2,23	2,54	2,56
Fósforo	0,43	0,87	0,77
Potasio	1,35	1,37	0,14
Calcio	0,89	1,20	2,82
Magnesio	0,23	0,26	0,27
Azufre	0,21	0,14	0,40

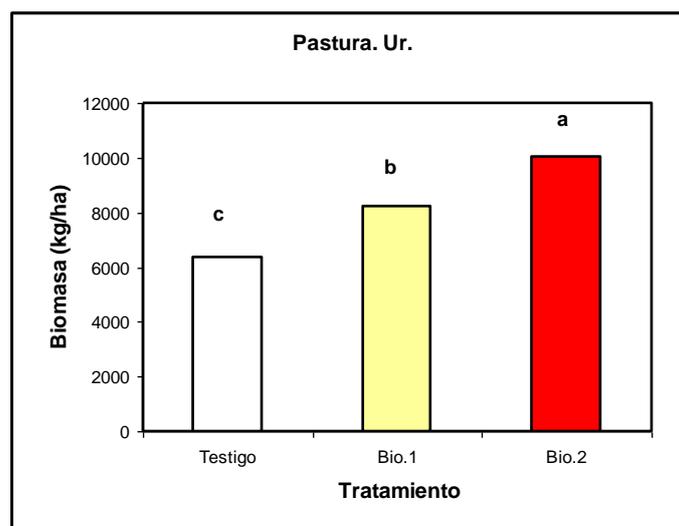


Figura 70. Producción de biomasa de una pastura de agropiro en un Natracualf de Uribelarrea, provincia de Buenos Aires. Bio 1 y Bio 2 representan dosis de 8 y 16 ton. MS / ha de biosólido, respectivamente (Lavado y Taboada, inédito).

Los efectos benéficos de la aplicación de residuos orgánicos sobre la estructura de los suelos son conocidos desde hace mucho tiempo, aunque en suelos sódicos la materia orgánica es a menudo inadecuada para llegar a la estabilización de la estructura. Muchos estudios muestran que los residuos orgánicos no son capaces de unir a las partículas de estos suelos. Inclusive, la adición de compuestos orgánicos a suelos alcalinos de alto pH puede incrementar el potencial dispersivo del suelo (Lavado y Alconada, 1994). Bajo condiciones sódicas, ha sido mostrado que el uso de matriz orgánica sola no es efectiva en la agregación de las partículas y es necesario primero flocular el suelo (Lavado, 2006).

En un trabajo reciente realizado en Australia, se hallaron significativos incrementos en la producción de trigo por el agregado de enmiendas orgánicas a 30 – 40 cm de profundidad, para mejorar las condiciones físicas de un subsuelo sódico (Figura 71).

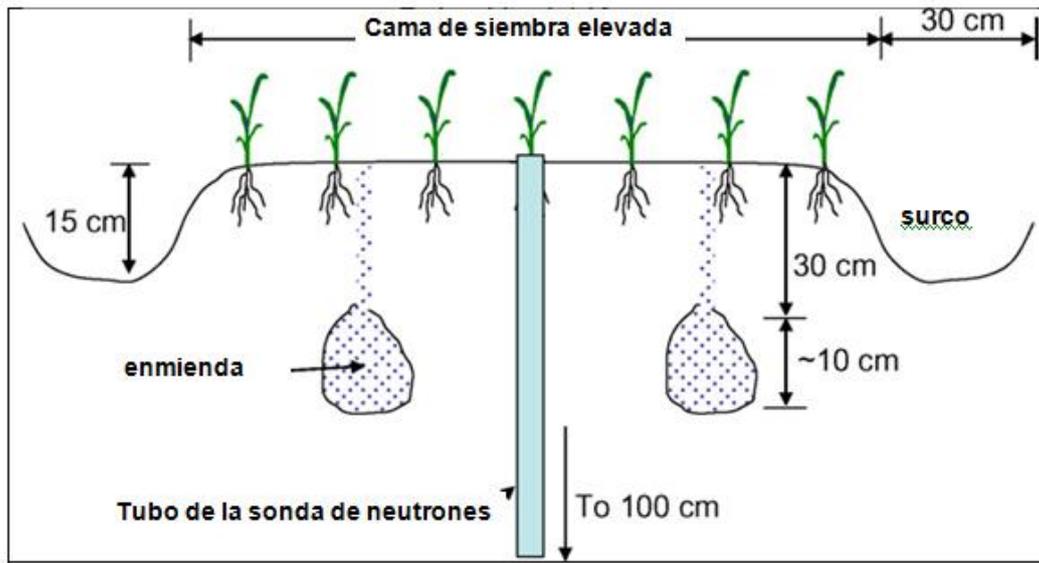


Figura 71. Diagrama del suelo elevado por labranzas, que muestra los surcos de los cultivos, el tubo de acceso de una sonda de neutrones para medir los cambios del agua almacenada en el suelo y el lugar de ubicación de la enmienda en el suelo (tomado de Gill et al., 2008).

Manejo de las labranzas

Entre las tecnologías a aplicar para el manejo de los flujos de sales se puede encarar el manejo de los rastrojos. El *mulch* de rastrojos reduce las pérdidas por evaporación y ayuda considerablemente a lavar las sales. Siempre debe favorecerse el *mulch* para reducir los flujos ascendentes de sales. Por ello, puede ser recomendable sembrar en siembra directa o intersembrar. La Figura 72 presenta la situación idealizada de dos lotes de un mismo campo, sometidos a distintos sistemas de labranzas. En la figura se observan los principales flujos, que indican el movimiento de agua y sales.

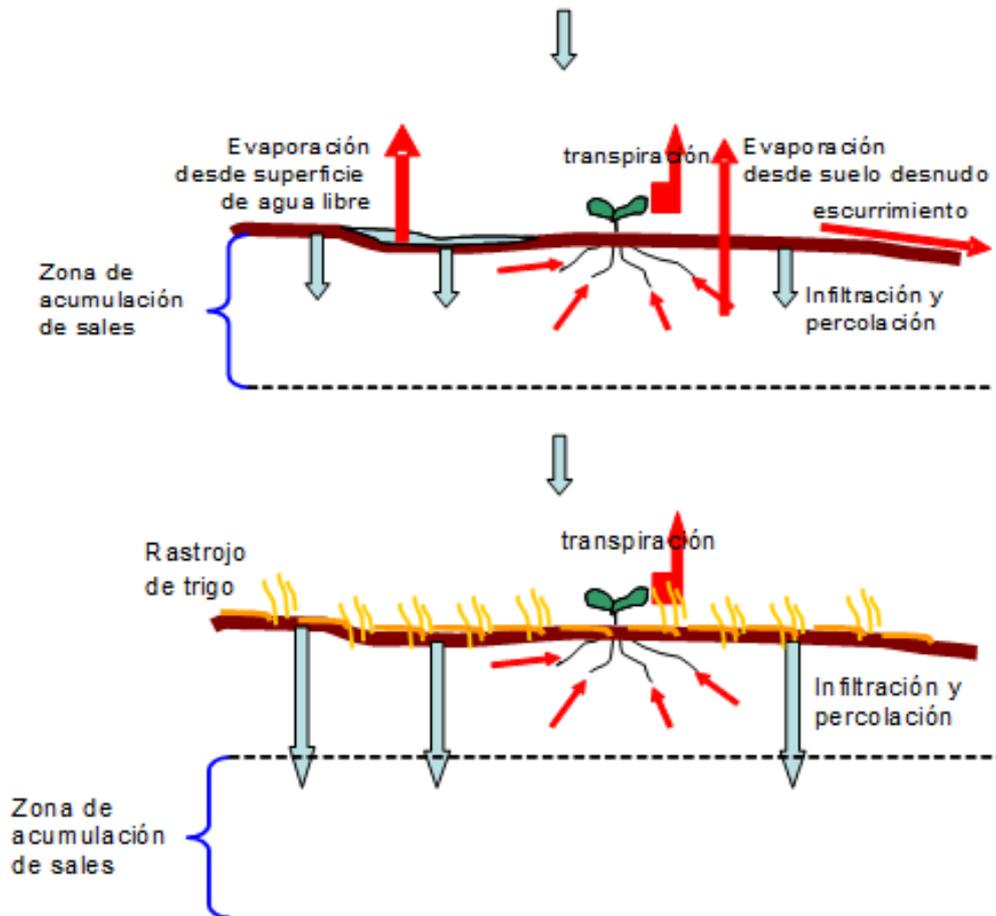


Figura 72. Esquema idealizado que muestra los flujos de aguas y las zonas de acumulación de sales en un sistema bajo labranza convencional (arriba) y bajo siembra directa (abajo).

Algunos datos observados en el campo se muestran en la Figura 73 (Taboada y Lavado, inédito). No existen aun investigaciones seguras que permitan aseverar que la siembra directa contribuye a reducir el nivel salino cerca de la superficie de los suelos, pero comienzan a aparecer evidencias en ese sentido.



Nivel salino (dS/m) de un lote con trigo, bajo labranza convencional.



Nivel salino (dS/m) de un lote con trigo, bajo siembra directa.

Profundidad	0-30 cm.	30-60 cm.	Profundidad	0-30 cm.	30-60 cm.
Salinidad	6,34	7,02	Salinidad	3,21	4,71

Figura 73. Ejemplos de cobertura en un cultivo de trigo bajo labranza convencional y siembra directa y los contenidos salinos en los perfiles de suelos (Taboada y Lavado, inédito).

Aflojamiento superficial del suelo

Consistente en la roturación de horizontes superficiales compactados con herramientas de corte vertical y/o horizontal, manteniendo la mayor proporción de cubierta vegetal viva o muerta.

Permite mejorar la infiltración del agua, aumentar la retención superficial, cortar la capilaridad del suelo e incrementar la disponibilidad de nutrientes del suelo. Se aplica en tanto en situaciones de tierras bien drenadas, como en aquellas mal drenadas, con suelos compactados en superficie (5 a 10 cm), que presenten vegetación en superficie. Quedan excluidas de la técnica aquellas situaciones completamente desnudas y salinizadas, como los llamados “peladares” o “calvas”, en las cuales cualquier trabajo con herramientas es altamente perjudicial.

Debe cumplir las siguientes condiciones técnicas:

- **Cubierta vegetal:** debe realizarse con la mayor cantidad de superficie cubierta con vegetación. En caso de no existir vegetación debería comenzarse la recuperación con clausuras, mulches e intersembras. En caso de estar trabajando con vegetación muerta, ésta debería permanecer cubriendo la superficie.
- **No inversión del suelo:** la herramienta debe fracturar el suelo superficial pero debe producir la menor inversión posible del suelo, que provoque superficies desnudas. En este sentido no debería producir la muerte de la vegetación presente, ya que el manejo consiste en mejorar la existente.
- **Tipo de herramientas:** resultados experimentales muestran que las condiciones anteriores se logran el ajuste de la herramienta requiere la presencia de filos verticales, filos horizontales y succión, lo cual se consigue en modelos comerciales (arados tipo paraplow) o mediante adaptaciones y ajustes en arados de rejas o de cinceles. La UNRC ha desarrollado y patentado un prototipo denominado “reja-cero”, para producir aflojamientos sin inversión del pan de tierra, adaptable a arados de reja o cinceles. La profundidad de trabajo depende del horizonte superficial compactado, el que para las condiciones estudiadas, fluctuó entre 7 y 10 cm.
- **Epoca de realización:** Depende del ciclo de las especies integrantes del sitio, de la humedad del suelo (piso), de la realización simultánea de intersembras y de la estación de lluvias. Para las condiciones estudiadas, la etapa de fin de verano - comienzo de otoño aparece como la más adecuada, debido a la abundancia de lluvias que garantizan el lavado de sales, y a la proximidad de la estación seca. Esta época es más apta para la intersemebra de forrajeras invernales.
- **Dirección de la labor:** Debería realizarse cortando la pendiente principal, a fin de maximizar la retención y el detenimiento, por efecto del microrelieve generado por la labor.
- **Humedad del suelo:** La humedad ideal para la labor, es cuando el suelo se encuentra friable, es decir ni seco, ni pegajoso. En el primer caso es escasa la eficiencia en la rotura de terrones es menor, y en el segundo se incrementa el peligro de recompactación.
- **Frecuencia de laboreos:** La duración del efecto del laboreo dependerá de la eficiencia de la operación, del uso posterior y de la textura del suelo sobre el que se realizó. Algunas experiencias en la zona indican que, para pastizales de gramón y pelo de chanco, en suelos franco-arenosos, la duración del efecto esta entre 2 y 4 años.

Drenajes Localizados: Subsolado, uso de drenes topo.

Consiste en la roturación profunda del suelo y en la generación de canales subterráneos de circulación y/o acumulación de agua en el subsuelo. Se realiza con herramientas de corte vertical profundo que llevan adosado un dispositivo en forma de bala a la profundidad de labor, la cual produce una cavidad circular por la cual se produce el drenaje de la freática.

Puede aplicarse a una amplia gama de situaciones con mal drenaje, según los dos objetivos expresados antes, de las cuales se destacan las siguientes:

1. **Objetivo de mejora en la infiltración-drenaje:** Situaciones en las cuales el drenaje interno está impedido por un horizonte profundo (tipo fragipán, B sódico, etc.), de aparición frecuente en la zona mal drenada. En este caso la operación deberá romper el impedimento, de manera de permitir una mejor circulación del agua en profundidad.

2. **Objetivo de deprimir la freática:** Situaciones de bajos inundables (generalmente espartillares o pelos de chancho) asociados a lagunas o áreas más bajas. En estos casos es posible que la operación de subsolado funcione como drenaje de la freática, aumentando el escurrimiento subterráneo por los drenajes que produce el topo. Las partes más bajas o lagunas funcionan como áreas de sacrificio, a condición de que la salinidad de la freática que se va a deprimir sea similar a la del lugar de sacrificio, a fin de evitar contaminaciones por sales.

El drenaje de depresiones puede realizarse mediante la técnica del subsolado con topo (drenaje subterráneo), sólo o combinado con zanjas de drenaje y conducción a cielo abierto, definiéndose las siguientes variantes de la técnica:

- **Drenes subterráneos radiales:** Los drenes se disponen en forma radial (perpendiculares) a la depresión o laguna que sirve de área de sacrificio. Por lo general esta disposición sigue la dirección del flujo freático. La profundidad del drén deberá estar por debajo de la freática, tanto como las posibilidades lo permitan (tipo de subsolador, potencia, etc.). El distanciamiento de los drenes es variable entre 1 y 4 m. y la operación deberá realizarse con el suelo mojado, en el sector donde opera la bala.
- **Combinación de drenes subterráneos y zanjas a cielo abierto:** Las zanjas o drenes a cielo abierto se utilizan principalmente para evacuar el agua que le llega de los drenes subterráneos, hacia la depresión. La profundidad de las zanjas de drenaje deberá ser mayor que la profundidad del drén, y deberán trazarse con pendiente hacia la depresión.
- **Zanjas a cielo abierto:** No se recomiendan como método de drenaje de freática en nuestras condiciones, debido a su poca efectividad, su alto costo y los problemas hidrológicos que acarrea.

Fertilización de pasturas

Consiste en el agregado de nutrientes a pasturas en condiciones hidrohalmórficas (salino-sódicas o inundadas), a los fines de mejorar su producción.

Puede utilizarse en pasturas naturales y cultivadas, a condición de que la cobertura superficial y la ocupación del volumen de suelo por las raíces sea la máxima posible para esa situación.

La utilización de Nitrógeno (N) requiere un perfil de suelo sin anegamiento, ya que se producirían pérdidas por desnitrificación. Por esta razón no es una técnica aconsejable para mejorar la productividad de espartillares, y su utilización en otro tipo de pastizales mejor drenados, esta condicionada a un período largo sin probabilidades de inundación/anegamiento.

Esta técnica debe concebirse como la última etapa de la recuperación de pasturas naturales o cultivadas, en una fase de optimización de la productividad. Esto implica necesariamente su consideración conjunta con las otras técnicas para garantizar el éxito de la práctica. A continuación se enumeran las condiciones operativas a tener en cuenta al utilizar la fertilización:

- **Estado del pastizal:** El sitio a fertilizar deberá tener recuperada la biomasa vegetal y la cobertura superficial para obtener una mínima eficiencia en la toma del fertilizante, ya que de este modo se garantiza una máxima incorporación al suelo y una mínima pérdida por escorrentía. Como ya se indicó no debe existir anegamiento ni probabilidad de ocurrencia próxima.
- **Cálculo de dosis:** Para pasturas de agropiro criollo, pueden esperarse aumentos de rendimiento del orden de 50 kg de materia seca por kg de (N) aplicado, y de 5 kg de semilla por kg de N (Cantero et al., 1985), habiendo respuesta hasta la aplicación de 200 kg N/ha.
- **Formas de aplicación:** La aplicación podrá hacerse al voleo o en bandas. El primer caso es más adecuado para la aplicación de N en pasturas ya implantadas, el segundo es más adecuado para la aplicación de P en la línea de siembra o intersiembra, debido a que es un nutriente poco móvil.
- **Tipo de fertilizante:** En suelos más arcillosos, poco permeables y muy húmedos, conviene la aplicación de fertilizantes nítricos que pueden ser directamente incorporados por las plantas. Las pérdidas por desnitrificación que probablemente ocurran en suelos anegados, pueden disminuirse fraccionando las dosis que se aplican. Puede ser conveniente el uso de abonos nítricoamoniacaes (nitrato de amonio), que siempre pueden superar las dificultades con algunas de sus formas nitrogenadas, o las actuales formas líquidas (UAN).

Manejo agrohidrológico

La sistematización agrohidrológica incluye la realización de obras para el manejo de excedentes hídricos dentro del campo. Ello implica la conducción de los excedentes hídricos por medio de obras del tipo de las que se muestran en las Figuras 74 y 75. La idea consiste en utilizar los reservorios naturales de agua, las cuales son superficies cubiertas de agua en períodos de altas precipitaciones, manejando así el agua dentro de los campos. La sistematización agrohidrológica comprende terrazas de conducción en las pendientes, y almacenamiento del agua en presas y badenes en los bajos (Damiano y Taboada, 2005). Las obras pueden ser realizadas con maquinaria existente en el campo. Se las considera un paso previo necesario para la realización de prácticas de mejoramiento de suelos, del tipo de las descriptas previamente.

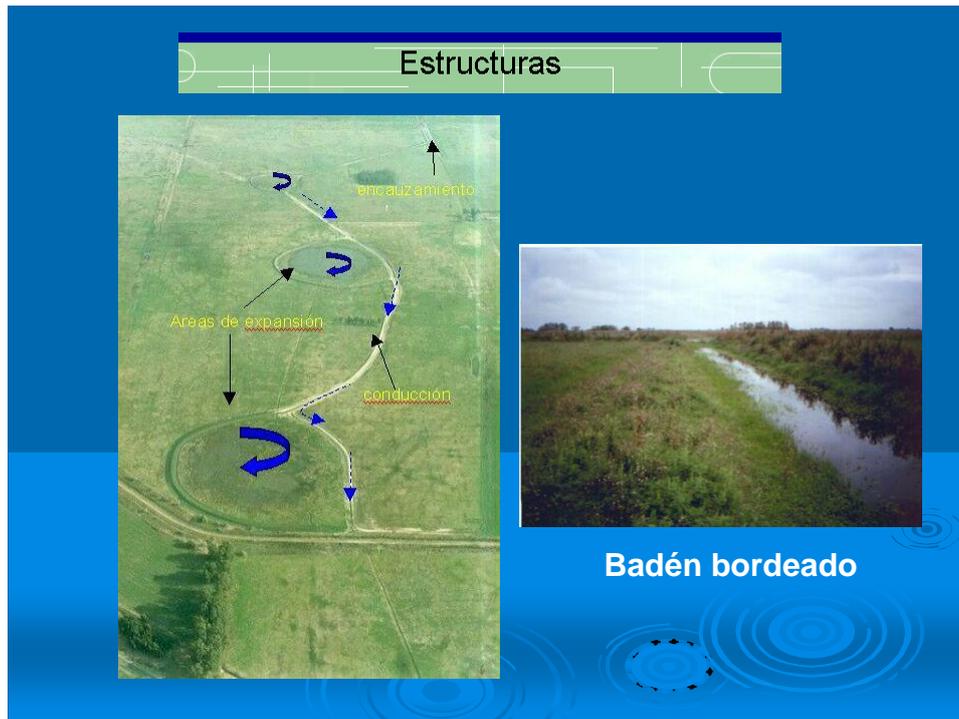


Figura 74. Ejemplos de sistematización agrohidrológica (gentileza F. Damiano).

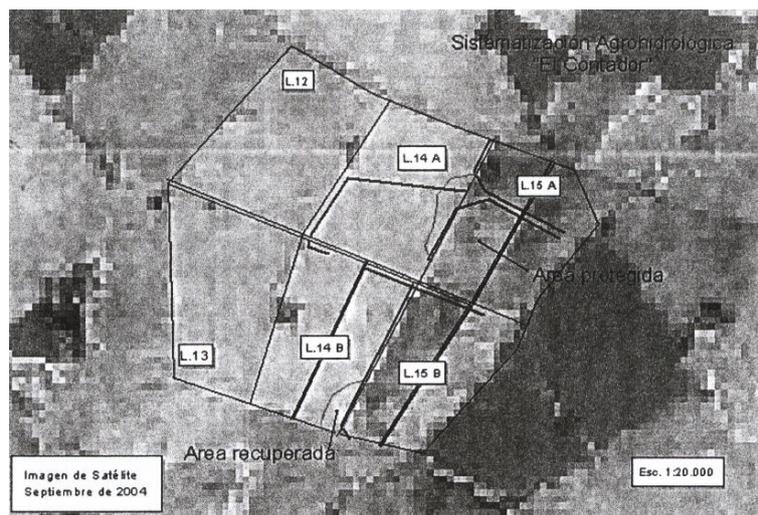


Figura 75. Obras agrohidrológicas sobre imagen en GIS (Damiano y Taboada, 2005).

Una alternativa de manejo del agua más sencilla fue estudiada por Alconada et al. (1993). En este caso se represaba el agua de escurrimiento con maquinaria sencilla y de esa manera generaba áreas anegadas en parte del campo. En esas áreas la salinidad y alcalinidad se reduce drásticamente y se produce un drástico cambio de vegetación pasando de halófila a hidrófila. Esta vegetación produce una gran biomasa, muy palatable y nutritiva, aprovechada por la hacienda.

CUESTIONARIO

1. Defina y caracterice a los suelos salinos, salino-sódicos y sódicos según diferentes criterios.
2. Explique la incidencia del exceso de sales y de sodio de intercambio sobre las propiedades de los suelos y el desarrollo de los cultivos.
3. Establezca un panorama de la distribución de la problemática de suelos halomórficos en el país según diferentes ambientes y problemáticas productivas. Especifique origen de las causas, consecuencias y posibles soluciones.
4. Desarrolle, ayudándose de esquemas, el proceso de salinización de los suelos y otros procesos asociados.
5. Como influye la napa freática y la cobertura vegetal en la dinámica de la salinización y la sodicidad de un suelo en áreas de secano.
6. Que incidencia se le puede atribuir al riego complementario sobre la salinización y la sodificación de suelos en la Región Pampeana.
7. Describa los fundamentos de la recuperación de suelos salinos en áreas de secano. Analice comparativamente con áreas de riego total
8. Describa los fundamentos de la recuperación de suelos sódicos en áreas de secano.
9. Cuales son las prácticas que conllevan a una recuperación biológica de los suelos salinos y sódicos. Describa a cada una de ellas.
10. Cuales son las limitaciones o efectos negativos de la forestación para la recuperación de pastizales salinos.
11. Cuales son las prácticas que conllevan a una recuperación química de los suelos sódicos. Describa y apunte sus restricciones.
12. Cuales son las labranzas dirigidas al manejo del rastrojo de cultivos y aquellas otras dirigidas a mejorar el drenaje interno del suelo para la recuperación de suelos salinos y sódicos. Describalas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alconada, M.; O Ansin.; R. Lavado; V. A. Deregibus; G. Rubio y F. H. Gutiérrez Boem. 1993. "Effect of run-off water retention and grazing on soil and vegetation characteristics of a temperate humid grassland". *Agricultural Water Management* 23: 233-246.
- Andriulo, A.; M. L. Galetto; C. Ferreira; C. Cordone; C. Sasal; F. Abrego; J. Galina y F. Rimatori. 1998. Efecto de once años de riego complementario sobre un Argiudol Típico pampeano. *Ciencia del Suelo* 16: 125-127.
- Angeli A. R., C. Cholaky, A. Cantero y J. Cisneros. 2011. Efecto de la vegetación arbórea (biodrenaje) sobre la salinidad y nivel freático en tierras del sur cordobés. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Bonadeo E., I. Moreno, R. Hampp, M. Irastorza y C. Milan. 2011. Efecto del agregado de yeso sobre la permeabilidad de un Haplustol típico con fases por salinidad y alcalinidad. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Bustingorri, C. y R. S. Lavado, R. S. 2008. respuesta de la soja a situaciones de estrés salino permanente o en forma de pulso. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de Los Funes, San Luis, Actas.
- Cantero J.J., J. Cisneros, O. Giayetto, C. Nuñez, J. de Prada, J. y M. Piola. Estrategias de manejo de la vegetación natural en ambientes salinos. El caso de estancia "las dos hermanas" (Arias, Córdoba). Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Casas R.R. Estrategias de recuperación post-emergencia de suelos afectados por las inundaciones en la Región Pampeana. Publicado en *Inundaciones en la Región Pampeana (2003)*. Universidad nacional de La Plata. EDULP : Editorial de la Universidad Nacional de La Plata
- Ceballos R. B., R.D. Corbella, J. García, L. Caldez y A. Plasencia. 2011. Manejo y recuperación de un campo de producción mixta en la llanura deprimida salina tucumana. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Cisneros J. M., A. Degioanni, A. Cantero, H. Videla H. 2011. Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Cisneros, J. M.; A. Degioanni; J. J. Cantero y A. Cantero. 2007. caracterización y manejo de suelos salinos en el área pampeana central. p. 17-46. en: E. Tailenik, K. Grunberg y G. Santa María (Ed.). *la salinización de suelos en la argentina: su impacto en la producción agropecuaria*. ed. de la universidad católica de córdoba, córdoba.
- Cisneros J., A. Degioanni, J. Cantero, y A. Cantero. 2006. Caracterización y manejo de suelos salinos en el Área Pampeana Central. *Agrociencia X(2)*: 109 – 124.
- Costa, j. j. y p. godz. 1999. aplicación de distintas dosis de yeso a un natracuol de la pampa deprimida. *Ciencia del Suelo* 17: 21-27 .
- Costa J. y P. Godz. 1994. Respuesta de Natracuoles a la mezcla de horizontes y al agregado de yeso. E.E.A. Balcarce - INTA Boletín Técnico Nº 122.
- Damiano, F. Y M. A. Taboada. 2005. sistematización agrohidrológica predial en la cuenca del río arrecifes, provincia de Buenos Aires. Congreso Argentino de Ingeniería Rural, San Luis.
- Emerson, W.W. 1984. soil structure in saline and sodic soils; in *ecological studies* vol. 51. Ed. Springer-Verlag.
- Fadda S. 2011. Experiencias en recuperación de suelos y control de la salinidad con drenaje subterráneo en caña de azúcar bajo riego. Conferencia Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.

- Genova, L.1993. Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas subterráneas de acuífero Pampeano en el norte de Bs As. Actas XIV Cong.Arg. Ciencias del Suelo. p. 347:348 pp. Mendoza.
- Genova L.2005. Resistencia y resiliencia edáfica a la degradación salina y sódica en agrosistemas regados complementariamente en la pampa húmeda argentina. 2005. II Congreso Intrenac. de Riego y Drenaje. CD-ROM. La Habana, Cuba.
- Gill, J. S.; P.W.G. Sale Y C. Tang. 2008. amelioration of dense sodic subsoil using organic amendments increases wheat yield more than using gypsum in a high rainfall zone of southern Australia. *Field Crop Research* 107: 265-275.
- Godz, P.; J. L. Costa; R. A. González Belo; N. A. Vidal y M. Lazovich. 1983. la pampa deprimida de la provincia de buenos aires, argentina. p. 939-972. en: M. C. Fuschini Mejía (Ed.). *Hidrología De Las Grandes Llanuras. Actas Del Coloquio De Olavarría, Vol. Iii. Unesco- Moysp, Buenos Aires, Argentina.*
- Godz P., J. Costa y R. González Belo. 1994. Mezcla de horizontes en un Natracuol de la Pampa Deprimida. E.E.A. Balcarce - INTA Boletín Técnico Nº 121.
- González L. M., H. Perez, J.Sayago, M. Collantes y S. Jerez. 2011. Relación geomorfológica, salinidad edáfica y ocupación de las tierras en el valle fluvial de santa maría (provincias de Catamarca y Tucuman). Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Gorgas, J. A. y M. V. Bustos. 2007. dinámica y evaluación de los suelos de córdoba con problemas de drenaje, salinidad y alcalinidad sódica. p. 47-62. en: E. Tailsnik, K. Grunberg y G. Santa María (ed.). *la salinización de suelos en la argentina: su impacto en la producción agropecuaria.* Ed. de la Universidad Católica de Córdoba, Córdoba.
- Gutiérrez Boem, F. H. y R. S. Lavado. 1996. the effects of soil sodicity on emergence, growth, development and yield of rapeseed (*brassica napus* L.). *Journal of Agricultural Sciences, Cambridge* 126: 169-173.
- Jobbágy, E. 2008. dinámica de sales en la llanura chaco-pampeana. p. 525-526. conferencia dictada en el xxi congreso argentino de la ciencia del suelo, 13 al 16 de mayo de 2008, Potrero De Los Funes, San Luis.
- Jobbágy, E.G; Vasallo M; Farley K.A; Piñeiro G.; Garbulsky M.F.; Nosetto M.D.; Jackson R.B.; Paruelo, J.M. *Forestación de Pastizales: Hacia una visión integral de usu oportunidades y costos ecológicos. Agrociencia (2006) Vol X Nº2* pág 109-124.
- Lavado R. 2012. Fertilidad de Suelos: caracterización y manejo en la Pampa Deprimida; Cap. 3: Salinidad y alcalinidad: propiedades, efectos sobre cultivos y manejo. P. 35-58. Editorial Facultad de Agronomía, UBA. 2da edición.
- Lavado, R. S. 2011. Análisis integral de la problemática de la salinidad en la argentina y sus posibilidades de cambio. Conferencia Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Lavado, R.S. 1983. Evaluación de la relación entre composición química del agua de lluvia y el grado de salinidad y alcalinidad en distintos suelos. *Rev. Fac. Agronomía. UBA.* 4: 135-139.
- Lavado, R.S. y R. R. Cairns. 1980. solonetzic soil properties and yield as affected by deep plowing and ripping. *Soil Tillage Res.* 1: 69-79.
- Lavado, R.S. 2006. Materia orgánica, nitrógeno, fósforo y azufre en los suelos afectados por sales de la Región Pampeana. en alvarez, r. (ed.). *materia orgánica. valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos.efa, buenos aires.* 195-206.
- Lavado, R. S. 2007. Visión sintética de la distribución y magnitud de los suelos afectados por salinidad en la argentina. p. 11-15. en: E. Tailsnik, K. Grunberg y G. Santa maría (ed.). *la salinización de suelos en la argentina: su impacto en la producción agropecuaria.* Ed. de la Universidad Católica de Córdoba, Córdoba.

- Lavado, R.S. y M. alconada. 1994. "soil properties behavior on grazed and ungrazed plots of a grassland sodic soil". *soil technology* 7: 75-81.
- Lavado R.S. y M. A. Taboada. 1987. soil salinization as an effect of grazing in a native grassland soil. *Soil Use And Management* 3: 143 - 148.
- Mihanovich, J. C., J. M. Cisneros y G. Espósito. 2011. Nivel y salinidad de la napa freática y su influencia en el cultivo de maíz en la pampa arenosa anegable (Córdoba). Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Milán C., E. Bonadeo, M. Basanta, J. Viola y I. Moreno. 2011. Efecto del agregado de enmiendas sobre la condición físico química de un Natracualf típico en áreas con "manchoneo" y su relación con la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Molina J.S. 1986. Tranqueras abiertas. Editorial El Ateneo.
- Montico S. 2006. Principios para el manejo de situaciones con suelos salinos y alcalinos. *Revista Agromensajes*. Facultad de Cs Agrarias UNR.
- Musto, J. 1981. Grupos de suelos de igual aptitud para la implantación de pasturas en la Pampa Deprimida. CIRN. Tirada interna N° 71. Buenos Aires.
- Nosetto M. 2007. Conversión de pastizales en forestaciones: impactos sobre la dinámica del agua y sales. Tesis doctoral. Escuela para Graduados Alberto Soriano. Facultad de Agronomía de la UBA.
- Naidu R. y P. Rengasamy. 1993. ion interaction and constraints to plant nutrition in australian sodic soils. *Aust. J. Soil Sci.* 31, 801-819.
- Otondo, J. 2011. Efectos de la introducción de especies megatérmicas sobre características agronómicas y edáficas de un ambiente halomórfico de la Pampa Inundable. Tesis de M.Sc., Escuela para Graduados Alberto Soriano. FAUBA, Argentina, 58 p.
- Painuli, D.K. E I. P. Abrol. 1986. effects of exchangeable sodium on crusting behaviour of a sandy loam soil. *Australian Journal of Soil Research* 24: 367-376.
- Peinemann N. 1997. Formación, clasificación, manejo y recuperación de suelos salinos y sódicos. ISBN 950-9715-41-7. Ediciones Sur. Argentina.
- Peinemann N., P. Zalba y M. Villamil. 1997. Procesos de salinización en el Partido de Guaminí. Departamento de Agronomía. Universidad Nacional del Sur.
- Pellejero M., A. Degioanni y J. Cisneros. 2011. Eficiencia de implantación de Grama rhodes (*Chloris gayana* kunth) sobre suelos salinos con pelo de chancho (*Distichlis spicata*). Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Personal del Laboratorio de Salinidad de E.U.A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de Suelos Salino y Sódicos. Departamento de Agricultura de los E.U.A. Editorial Limusa. México.
- Pepi, M. L.; G.A. Grosso y M Díaz-Zorita. 1998. contenido salino del agua freática vinculado al tamaño de partículas de los suelos del noroeste bonaerense (argentina). *Ciencia del Suelo* 16: 122-124.
- Prieto, D.; G. Angella y C. Angueira. 2007. un enfoque al problema de salinidad en el área de riego del río dulce. p. 93-104. en: E. Tailenik, K. Grunberg y G. Santa María (ed.). *la salinización de suelos en la argentina: su impacto en la producción agropecuaria*. Ed. de la Universidad Católica de Córdoba, Córdoba.
- Sáenz C.A., J. Morábito, V. Gómez Hermida, K.L.Frigerio, O.A. Terenti y M.P. Cortés. 2011. Respuesta del cultivo de maíz y las características físico-químicas del suelo al riego complementario con agua subterránea salina en la región semiárida pampeana. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC . Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Sauberán, C. y J. S. Molina. 1963. recuperación de terrenos "salitrosos" por métodos biológicos. *Ciencia E Investigación* 19: 449-458. 1963.

- Semilliani M.G., M. Brassiolo y O. Pranzoni. 2005. Evaluación de un rodal implantado de *Prosopis Alba* (Griseb) en terreno con incidencia salina. SAGyP. Forestal N° 36. Diciembre.
- Sumner, M. E. 1993. sodic soils; new perspectives. Australian Journal of Soil Research 31: 683-750.
- Taboada, M. A. y R. S. Lavado. 2008. suelos salino-sódicos: optimizando su uso y manejo. xvi congreso de AAPRESID. Rosario, 12 al 15 de agosto: 339-348.
- Taboada, M. A.; G. Rubio y R. S. Lavado. 1998. The deterioration of tall wheatgrass pastures on saline sodic soils. Journal of Range Management, 51: 239-244.
- Taboada M. A. y R. Lavado. 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, el hidromorfismo y las inundaciones. Editorial Facultad de Agronomía UBA. 1ra Edición.
- Taboada M. A. 2011. Suelos halo e hidromórficos. Génesis y problemática. Instituto de Suelos CIRN, INTA. 24 de agosto.
- Talesnik E., Grunberg K., Santa María G. 2008. La salinización de suelos en Argentina. Su impacto en la producción agropecuaria. Educc. Córdoba.
- Toll Vera J.R., G.O.(h), M.G. Martín Nicosia y M.M. Fernández. 2011. Implantación y sobrevivencia de algarrobo blanco (*Prosopis alba griseb*) var. alba, en suelos salinos y salinos sódicos en el oeste de Santiago del Estero, argentina. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán, 24 al 26 de Agosto.
- Toll Vera J.R., G.O.(h), M.G. Martín Nicosia, M.M. Fernández y A.M. Plasencia. 2011. Recuperación biológica de suelos salinos mediante grama rhodes (*Chloris gayana künth*) cv. común (2n) en la llanura deprimida salina del este de Tucumán y oeste de Santiago del Estero, Argentina. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Toll Vera J.R., G.O.(h), M.G. Martín Nicosia, M.M. Fernández y A.M. Plasencia. 2011. Recuperación biológica de suelos salinos mediante pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*), en la llanura deprimida salina del este de Tucumán y oeste de Santiago del Estero, argentina. Resúmenes, Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC. Sociedad Rural de Tucumán. 24 al 26 de Agosto.
- Vecchio M.C., A. Pellegrini, J. Gianotti, J. Garcia, M. Chalde, A. Rodriguez y R. Golluscio. 2012. Efecto del manejo pastoril de una estepa de halófitas sobre indicadores edáficos. XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina. 16 al 20 de abril.
- Zamolinski A. 2000. Experiencias en recuperación de suelos salinizados Publicación Técnica N° 31. Estación Experimental Gral Villegas. Rep.Arg. Noviembre.
- Zamolinski A., R. Casas y A. Pittaluga. 1994. Manejo de los suelos salinos en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Publicación Técnica N° 15, agosto. INTA.
- Zurita, J. J. 2007. la salinidad. su incidencia en las provincias de chaco y formosa. p. 81-91. en: e. talesnik, k. grunberg y g. santa maría (ed.). La Salinización De Suelos En La Argentina: su impacto en la producción agropecuaria. Ed. de la Universidad Católica de Córdoba, Córdoba.