

# Bases conceptuales y pautas para el manejo de yeso en suelos afectados por sales

MARTÍN TORRES DUGGAN<sup>1</sup> - MÓNICA BEATRIZ RODRÍGUEZ<sup>2</sup>

## RESUMEN

El yeso es el principal mineral utilizado en la corrección y/o mejoramiento de suelos sódicos debido a su gran abundancia y disponibilidad en la naturaleza, bajo costo respecto de fuentes de origen industrial y una composición química y mineralógica que lo hace apto para su aplicación en el ámbito agropecuario. La utilización de yeso en suelos sódicos requiere de un abordaje integral que considere tanto las condiciones edáficas y del relieve, como así también las posibilidades tecnológicas para distribuir y agregar el yeso con la maquinaria disponible. La premisa fundamental del manejo de suelos sódicos es el de mantener y/o restablecer la cobertura de vegetación, previniendo y/o mitigado el ascenso capilar de sales. Así, la profundidad y dinámica hidrológica de la capa freática y de las condiciones hidrogeoquímicas regionales y del sitio de producción, condicionan las posibilidades de aplicación y la eficiencia esperada de la aplicación de yeso. Por otro lado, el manejo de fertilizantes y enmiendas, en general, y del yeso, en particular, en suelos bajo riego complementario afectados por procesos de sodificación secundaria y/o compactación, requieren de marcos y modelos conceptuales diferentes de aquellos utilizados en suelos sódicos "naturales". El análisis de la información disponible en la Argentina permite evidenciar que, por un lado, la información geológica, mineralógica y de la calidad del "yeso agrícola" local es abundante. En cambio, la información regional y/o subregional sobre el funcionamiento del yeso como corrector/mejorador de suelos afectados por sales es escasa, existiendo un vacío de conocimiento básico y aplicado que se debería ir desarrollando en el futuro cercano.

## Introducción

Los minerales representan recursos de gran importancia económica ya que son extensamente utilizados en diferentes aplicaciones como la industria química, construcción y también como fertilizan-

<sup>1</sup> Tecnoagro. Girardot 1331 (C1427AKC) CABA. [torresduggan@tecnoagro.com.ar](mailto:torresduggan@tecnoagro.com.ar)

<sup>2</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Dpto. de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Av. San Martín 4453 (C1417 DSE) CABA. [mrodrigu@agro.uba.ar](mailto:mrodrigu@agro.uba.ar)

tes y enmiendas para mejorar la nutrición vegetal y la condición de fertilidad de los suelos (Martínez y Castro, 2012; Van Straaten, 2014; Herrmann y Torres Duggan, 2016). Los principales minerales utilizados en la agricultura son los carbonatos (de calcio y/o calcio y magnesio), roca fosfática y el yeso. En los últimos tiempos también se evidencia interés por otros minerales como las zeolitas, debido a su capacidad para mejorar la capacidad de retención hídrica edáfica y como aditivo para incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno de fertilizantes nitrogenados convencionales y de residuos orgánicos de origen animal (De Campos Bernardi *et al.*, 2013; Torres Duggan y Rodríguez, 2015).

El yeso es el mineral más utilizado en la corrección/mejoramiento de suelos sódicos derivados de fenómenos naturales como el anegamiento y las inundaciones, como así también en aquellos que han sufrido procesos de alcalinización secundaria, por la aplicación de aguas bicarbonatadas sódicas a través del riego complementario (Lavado y Taboada, 2009; Torres Duggan *et al.*, 2016). Asimismo, el yeso es un recurso muy valioso como complemento de los carbonatos en la mejora de suelos ácidos y/o acidificados por el uso agrícola (Vázquez, 2011; Vázquez *et al.*, 2013). Se destaca también que el yeso es la principal fuente azufrada sólida utilizada en la fertilización de cultivos extensivos de grano en la Región Pampeana Argentina (Torres Duggan *et al.*, 2012a).

Las principales razones por las cuales el yeso es un mineral tan difundido en la corrección de suelos sódicos son su gran abundancia en la naturaleza, su composición y propiedades químicas y físico-químicas particulares. La amplia oferta de yeso como recurso mineral explica su menor costo relativo, diferenciándolo de otros compuestos cálcicos solubles que podrían ser aplicados como enmiendas con similar efectividad agronómica (e.g. cloruro de calcio). En este caso no sólo se trata de un producto de mayor costo sino con mayores dificultades para adquirirlo en el mercado y/o distribuirlo con la maquinaria disponible.

Debido a que actualmente la información experimental regional y/o subregional sobre corrección química de suelos por aplicación de yeso en la Argentina es muy escasa, adquiere especial importancia establecer principios y bases conceptuales para su manejo en el ámbito agropecuario. Por estas razones, los objetivos del presente capítulo son:

- 1 caracterizar el yeso desde la perspectiva de su aptitud agronómica para la mejora de suelos afectados por limitaciones de sodicidad
- 2 aportar modelos conceptuales y principios de manejo de yeso en suelos sódicos y sodificados por el riego complementario en zonas húmedas y/o subhúmedas de la Región Pampeana.

### **Características del yeso**

#### **Obtención**

El yeso es un mineral muy abundante y con una profusa distribución regional en la Argentina. Los depósitos mesozoicos se encuentran en la Cuenca Neuquina, en las provincias de Mendoza, Río Negro y Neuquén, mientras que los depósitos terciarios se localizan en la faja extrandina, asociados a cuencas de margen pasivo (Chubut) y de antepaís (Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, San Luis, La Rioja y San Juan). En Entre Ríos, La Pampa y Buenos Aires los depósitos de yeso son cuaternarios (SEGEMAR-UNSAM, 2008). En la naturaleza, el yeso es uno de los primeros minerales que cristalizan en la evaporación de aguas salinas. Los yacimientos de yeso pueden tener origen marino o lacustre y en base a ello se definen dos modelos genéticos de depósitos minerales: las evaporitas marinas y las evaporitas lacustres (Herrmann y Torres Duggan, 2016). Los depósitos del primer tipo se generan en cuencas marinas marginales cuya fuente de sulfato de calcio es el agua de mar, son de gran extensión areal y de un considerable espesor. Los depósitos lacustres son más pequeños, aunque pueden alcanzar espesores relativamente importantes y purezas que lo hacen aptos para su uso en el ámbito agropecuario.

En la Argentina se han realizado diversos relevamientos de los recursos disponibles de yeso en las diferentes provincias (Ponce y Torres Duggan, 2005; SEGEMAR-UNSAM, 2008). Si bien los yacimientos de yeso de la cuenca Neuquina y en particular de Mendoza se consideran los de mayor potencia (espesor) y pureza, los yacimientos disponibles en las demás cuencas geológicas y provincias también se los aprovecha para diferentes usos tanto en la industria como en el ámbito agropecuario, presentando grados variables tanto de potencia como de pureza. La disponibilidad de yacimientos según provincia, como así también de los niveles de pureza y reservas, escapa el alcance del presente capítulo y puede consultarse en SEGEMAR-UNSAM (2008).

### Mineralogía y propiedades químicas y físico-químicas

El yeso es la fase mineral de sulfato de calcio más abundante en la naturaleza y corresponde al sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) bihidratado. Su mayor solubilidad y contenido de agua molecular, lo diferencian de la basanita y de la anhidrita (Tabla 1).

Tabla 1. Fases minerales del sulfato de calcio en la naturaleza.

Especies de sulfato de calcio	Formula química	Contenido de nutrientes	Características de interés agronómico
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	S=18,6% Ca=23%	Fuente de inmediata disponibilidad de sulfatos. Principal fertilizante azufrado sólido utilizado en la Argentina. Pureza variable que determinan % de S en el rango de 15 a 18%. Reacción neutra en el suelo. Se utiliza como corrector/mejorador en suelos sódicos, ácidos y/o acidificados.
Basanita	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$	S=22% Ca=27%	Rápidamente convertido a yeso cuando reacciona en el suelo (hidratación). Presenta el mismo comportamiento agronómico que el yeso. Se lo comercializa en la Argentina como "sulfato de calcio solubilizado". En general, lo comercializan empresas de la construcción, partiendo de materias primas (yeso) de elevada pureza. Contiene más S y Ca que el yeso agrícola.
Anhidrita	$\text{CaSO}_4$	S=23,5% Ca=29,4%	Presenta un escaso valor como fertilizante azufrado y/o como corrector de suelos debido a su baja reactividad en el suelo asociado a su mayor dureza y menor solubilidad en agua.

Fuente: Adaptado de SEGEMAR-UNSAM (2008) y Ponce y Torres Duggan (2005).

El yeso es soluble en agua ( $\sim 2,4 \text{ g L}^{-1}$  a  $0^\circ\text{C}$ ), con bajo índice salino y reacción neutra en el suelo (Gowariker *et al.*, 2008; Til, 2010). Estos atributos, sumado a su amplia disponibilidad geográfica y su menor costo relativo a otro tipo de fertilizantes cálcicos, facilitan su utilización tanto en la corrección de suelos sódicos, como así también en la fertilización azufrada de los cultivos (Torres Duggan *et al.*, 2012a; Herrmann y Torres Duggan, 2016). La bibliografía suele hacer referencia a minerales como el azufre elemental para la corrección de suelos alcalinos, pero es importante tener en cuenta que este recurso se obtiene principalmente como sub-producto de la industria petroquímica, siendo muy menor la contribución de depósitos de origen mineral. Por consiguiente, su disponibilidad en el mercado restringe considerablemente su uso como corrector de suelos afectados por sales. Por otro lado, en suelos alcalinos con elevado contenido de calcio intercambiable

y/o carbonato de calcio, el azufre elemental, que se oxida biológicamente a ácido sulfúrico, reacciona produciendo yeso, compuesto que es en definitiva el responsable de los efectos sobre la condición física del suelo (Richards, 1973). Así, cuando se dispone de yeso disponible en el sitio de producción, resulta más razonable directamente aplicar este mineral ya que la aplicación de azufre elemental requiere predecir y/o estimar la oxidación del mineral para las condiciones agro-ecológicas y edáficas locales, información que, en general, no está disponible a escala predial.

### Calidad del yeso para uso agropecuario

La utilización de minerales como fertilizantes y/o enmiendas requiere un trabajo conjunto entre el sector geológico-minero y el agropecuario, compatibilizando las posibilidades de procesamiento del mineral en origen con los requerimientos para su distribución y aplicación en el ámbito agropecuario. En este plano se ha avanzado notablemente en la Argentina en relación a la calidad del yeso ofrecido en el mercado tanto como fertilizante azufrado como enmienda mineral. Primero se avanzó con la generación de normas IRAM específicas para yeso agrícola y más recientemente se ha incorporado este marco de información en la normativa vigente para la inscripción de fertilizantes y enmiendas utilizada por el SENASA (Rodríguez y Torres Duggan, 2015).

La calidad del yeso para uso agropecuario (*i.e.* “yeso agrícola”) se define en base a sus características químicas y físicas de interés agronómico, principalmente el grado equivalente (*i.e.* concentración de nutrientes esenciales para las plantas) y granulometría (Torres Duggan, 2007; Rodríguez y Torres Duggan, 2015). La calidad química del yeso agrícola depende de la composición química y mineralógica, ya que éstos determinan la concentración de nutrientes y por consiguiente su aptitud de uso como fertilizante y/o enmienda. La calidad física del yeso agrícola se evalúa a través de la granulometría (fracciones granulométricas). En términos generales, tradicionalmente el yeso granulado y pelleteado se ha utilizado como fertilizantes mientras que para la corrección de suelos se prefería yesos en polvo, para mejorar la velocidad de la reacción en el suelo. Sin embargo, en planteos en siembra directa este enfoque ha perdido vigencia, y la tendencia es hacia la utilización de diferentes tipos de granulometrías según la si-

tuación particular, incluyendo por ejemplo la aplicación de yesos granulados o en polvo en cobertura total, dependiendo de la maquinaria disponible. Asimismo, en especial cuando se aplican dosis relativamente elevadas de yeso agrícola (*i.e.* corrección química), también resulta importante evaluar la concentración de algunos elementos como sodio, hierro o aluminio, que en general son acompañantes del mineral de yeso. En la Argentina, la normativa vigente exige un mínimo de 85% sulfato de calcio bihidratado en los productos comercializados como yeso de uso agropecuario (Tabla 2).

Tabla 2. Requisitos químicos y físicos requeridos por el SENASA según la normativa vigente.

Propiedad	Referencia
Pureza (% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	Mínimo 85% (p/p)
Cloruro de sodio	Máximo 0,5% (p/p)
Óxido de hierro	Máximo 1% (p/p)
Óxido de aluminio	Máximo 1,2% (p/p)
Agua libre	Máximo 1% (p/p)
Granulometría de yesos granulados	90% entre 1 y 4 mm Máximo de 10% menor a 1 mm
Granulado pelletizado	97% entre 1 y 4 mm Máximo de 3% menor a 1 mm

Fuente: <http://www.senasa.gov.ar/normativas/resolucion-264-2011-senasa-servicio-nacional-de-sanidad-y-calidad-agroalimentaria>

El yeso granulado es la forma más utilizada en el país y corresponde a los yesos que, luego de extraídos de las canteras, son sometidos a trituración primaria y secundaria y procesados hasta alcanzar el rango granulométrico de interés, ubicado, en general, entre 1 y 5 mm (Ponce y Torres Duggan, 2005). El yeso “granulado pelletizado” se obtiene a partir de la aglomeración del yeso molido fino o entrefino mediante el uso de equipos específicos como discos pelletizadores o tambores aglomeradores (Rodríguez y Torres Duggan, 2015). Es importante aclarar que no se observan diferencias en efectividad agronómica entre el yeso granulado y el pelletizado. Los dos tipos tienen la misma capacidad de proveer calcio y azufre a las plantas. Esto es razonable considerando que el proceso de pelletización no modifica la solubilidad del mineral de yeso, propiedad que depende de la especie química (en este caso sulfato de calcio bihidratado) y la temperatura. Sin embargo, existen diferencias en cuanto a los costos del procesamiento del yeso pelletizado, aumentando la complejidad y los costos de su elaboración.

## Pautas para la aplicación de yeso agrícola en suelos sódicos

### Evaluación de suelos y su capacidad productiva

El primer pilar para establecer las posibilidades de uso del yeso en suelos sódicos consiste en clasificar los diferentes tipos de suelos (ambientes salinos y/o sódicos) y su capacidad productiva (Cisneros *et al.*, 2008; Lavado y Taboada, 2009). Si bien la aptitud de uso de los suelos salinos, salino-sódicos o sódicos es principalmente ganadera, existe un amplio gradiente de posibilidades que tienen que ver con la ubicación del suelo en el paisaje (fisiografía), características morfológicas (estructura, textura, distribución y espesor de horizontes), químicas (pH, CE, RAS), como así también del riesgo de anegamiento (hidromorfismo) (Tabla 3).

Tabla 3. Posición en el paisaje, y capacidad productiva de suelos bajos de la Pampa Deprimida y Pampa Arenosa.

Tipo de suelo	Ubicación en el paisaje	Capacidad de uso	Limitaciones	Uso recomendado
Hapludol thaptonátrico	Planicies intermedias	Variable (III-VIs)	Alcalinidad subsuperficial	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natrucoles	Planicies bajas ("bajo dulce poco anegable")	Variable (IVs-VIs)	Alcalinidad subsuperficial	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natracuoles	Planicies tendidas ("bajo dulce")	Variable (IV-VIws)	Alcalinidad subsuperficial Riesgo variable de inundación	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natracualfes, Natralboles	Planicies bajas alcalinas ("bajo alcalino")	VIws	Salinidad-alcalinidad superficial y subsuperficial	Ganadero (pastizal natural y/o forrajeras adaptadas)

Fuente: Elaboración propia.

### Marco de referencia para el mejoramiento de suelos sódicos o sodificados por procesos naturales

Es importante resaltar que la mejora y "rehabilitación" de suelos sódicos y/o suelos agrícolas que han sufrido procesos de sodificación por ascenso de capa freática, requieren de un diagnóstico integral (Cisneros *et al.*, 2008; Torres Duggan *et al.*, 2013). En general, el

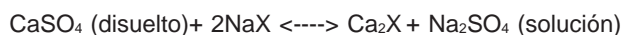
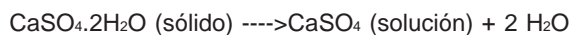
principal objetivo del manejo de ambientes salinos o salino-sódicos es mantener o recuperar la cobertura de vegetación, limitando el ascenso capilar de sales desde la capa freática. En la Tabla 4 se presentan las principales técnicas que se utilizan para mejorar este tipo de ambientes, incluyendo el uso del yeso.

Tabla 4. Técnicas de manejo de suelos salino-sódicos según diferentes propósitos.

Técnica de manejo	Reducir ascenso capilar	Aumentar infiltración	Recuperar cobertura	Deprimir nivel freático	Aumentar producción del sitio
Pastoreo rotativo		X	X		X
Coberturas y mulches	X	X	X		X
Aflojamiento	X	X	X		
Intersiembr	X	X	X		X
Subsolado-drenes topo		X		X	
Revegetación de playas	X	X	X		X
Transplantes de especies			X		X
Forestación	X		X	X	
Enyesado en bandas		X	X		X
Drenajes localizados	X			X	
Fertilización					X
Clausuras	X	X	X		X

Fuente: Cisneros *et al.* (2008).

Como se puede observar, la aplicación del yeso juega un rol importante para la mejora de la infiltración de agua en el suelo y la recuperación de la cobertura de vegetación, aumentando la capacidad productiva del sitio de producción. El primer efecto del agregado de yeso sobre el suelo es provocar la floculación del mismo, mejorando la condición física, en particular la infiltración del agua (Lavado, 2010). Posteriormente, a medida que el mineral reacciona con la fase sólida del suelo ocurre un fenómeno de intercambio iónico progresivo, según la siguiente reacción:



El calcio, además de mejorar la condición estructural del suelo, reduce la presencia del sodio en solución y su toxicidad específica. A



medida que el sodio adsorbido en el complejo de cambio del suelo (arcillas y MO) se va desplazando progresivamente por acción del calcio, el sodio reacciona con el sulfato, formando sulfato de sodio en solución. Esta sal se debe eliminar del perfil para completar la corrección química del suelo. Para ello, el suelo debe presentar una adecuada permeabilidad y la capa freática se debe ubicar a una profundidad donde no ocurra ascenso capilar de sales. A medida que se va eliminando el sodio del sistema suelo-planta, se va reduciendo la alcalinidad debido a la eliminación del sodio fuera del sistema suelo-cultivo (Richards, 1973; Lavado y Taboada, 2009).

La evaluación de la dinámica de la capa freática, la cobertura o ausencia de cobertura de vegetación y la distribución de la alcalinidad en el perfil son variables decisoras centrales para establecer la tecnología de aplicación del yeso (Lavado, 2010). La profundidad a la cual la capa freática provoca el ascenso capilar de sales hasta la superficie, causando problemas de salinización y/o sodificación se denomina “profundidad crítica” y depende principalmente de la estructura y textura del suelo. En el área central de la Región Pampeana, la profundidad crítica de la capa freática se ubica en el rango de 100-130 cm en suelos areno francos y francos, respectivamente, siendo un poco mayor en suelos arcillosos (Cisneros *et al.*, 2008).

Cuando ocurre ascenso capilar, ya sea porque la capa freática se ubica por encima de la profundidad crítica o bien se presenta ascenso capilar de sales desde capas arcillosas impermeables a nivel subsuperficial, la aplicación masiva de yeso es una práctica poco efectiva, debido a la ocurrencia de procesos de re-sodificación de la superficie del suelo (Cisneros *et al.*, 2008; Torres Duggan *et al.*, 2013). En estas condiciones se debe procurar la instalación de forrajeras sobre el propio tapiz de vegetación (intersiembra) realizando aplicaciones de yeso en bandas en dosis bajas, localizadas en la línea de siembra. Este método de aplicación mejora la condición físico-química del sitio de germinación-emergencia de las plántulas y el establecimiento de los cultivos. En situaciones en donde la cobertura de vegetación es escasa debido a la severa salinización, se recomienda en primer lugar restablecer la cobertura mediante diferentes técnicas como la realización de clausuras al pastoreo, mulches, técnicas de revegetación, entre otras. Una vez instalada la vegetación, se pueden utilizar las técnicas de aplicación localizada de yeso mencionadas previamente (Cisneros *et al.*, 2008) (Fig. 1)

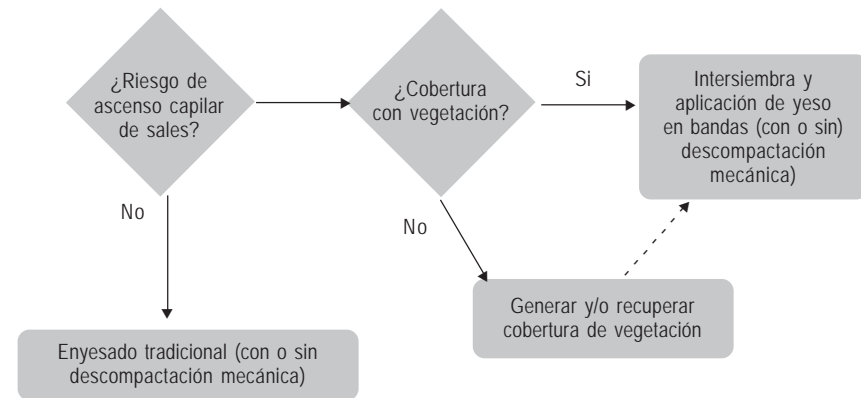


Figura 1. Modelo de decisión para definir la tecnología de aplicación de yeso en ambientes sódicos y/o sodificados. Elaboración propia en base a Cisneros *et al.* (2008) y Taboada y Lavado (2009).

Cuando la capa freática se ubica por debajo de la profundidad crítica no ocurre ascenso capilar de sales hacia la superficie. Por ello, si el suelo presenta un adecuado drenaje interno, las posibilidades de éxito de la aplicación de yeso en dosis más elevadas y en cobertura total son mayores. Asimismo, cuando se observa la presencia de costras duras en superficie, se puede combinar la aplicación de técnicas de descompactación mecánica sin remoción de la cobertura con el agregado de yeso. El laboreo vertical aplicado durante la descompactación mecánica y la no remoción de la cobertura del suelo, son pre-requisitos básicos que se deben considerar en el manejo de ambientes sódicos (Fig. 2).

La determinación de la dosis de yeso a agregar en cada lote o ambiente se debería basar en calibraciones regionales y/o subregionales generadas a través de la experimentación local; información que no se ha generado aún en la Región Pampeana, con la excepción de algunos ensayos de campo y algunos trabajos realizados en condiciones de laboratorio y/o en experimentos en invernáculo (Costa y Lodz, 1999). En este tipo de circunstancias, cuando no se dispone de referencias experimentales y/o modelos de diagnóstico a nivel zonal, como primera aproximación se puede realizar un cálculo teórico de la "necesidad de yeso". Para ello se calcula la cantidad de meq de sodio (es decir, la masa equivalente de sodio) que se requiere reemplazar del complejo de cambio del suelo mediante la aplicación de una masa equivalente del yeso. Sin embargo, esta metodología presenta limita-



Figura 2. Sembradoras para la intersemebra de forrajeras con púas montadas para realizar descompactación (A y B) y equipo descompactador desarrollado por el INTA San Luis (C y D).

ciones y requiere de ajustes en el cálculo considerando la pureza del yeso, las características del suelo y el método de aplicación (Richards, 1973; Lavado, 2010; Torres Duggan *et al.*, 2013;). Asimismo, en suelos sódicos con muy altos niveles de PSI superficiales, las dosis que derivan de la utilización de este cálculo teórico resultan muy elevadas y pueden no ser viables desde el punto de vista económico o factible de ser aplicado con la maquinaria disponible.

Debido a las limitaciones que surgen del cálculo teórico de la “necesidad de yeso” en suelos fuertemente sódicos, surge como una tecnología interesante las aplicaciones sucesivas de dosis bajas de yeso ya sea de fuentes granuladas o bien en polvo, según la maquinaria disponible y las condiciones de aplicación. Es decir, se tiende a un manejo de aplicaciones de yeso más frecuentes, pero con menores dosis, propendiendo hacia una mejora progresiva de la condición de fertilidad del suelo. Debido a que actualmente no se dispone de calibraciones regionales en el ámbito local para guiar las recomendaciones de aplicación del yeso, el criterio del asesor agrónomo juega un rol central ya que es quien debe analizar de un modo holístico dife-

rentes factores que pueden incidir en el funcionamiento del yeso en el sistema suelo-planta y establecer pautas para su utilización a escala predial (Fig. 3).

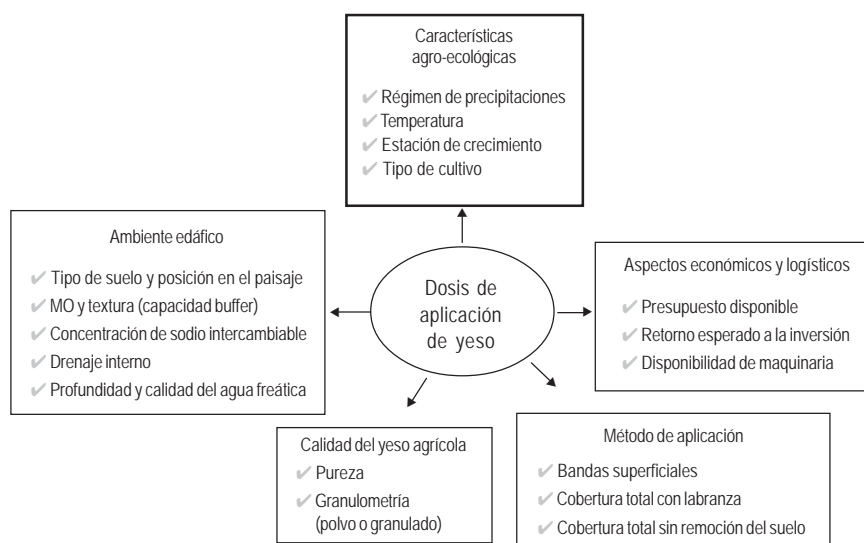


Figura 3. Información necesaria para establecer la dosis y método de aplicación en sistemas agropecuarios. Elaboración propia.

Cuando se realizan cálculos teóricos de la “necesidad de enyesado” según el procedimiento previamente indicado para determinar dosis de corrección de suelos agrícolas, cuya sodificación es secundaria y los niveles de PSI suelen ubicarse en concentraciones muy inferiores a suelos sódicos, es importante ajustar las dosis teóricas según la magnitud del PSI, aumentando las mismas a medida que se reducen los niveles de éste indicador (Richards, 1973). Esto se debe a que el calcio aportado por el yeso en suelos no solo desplaza al sodio sino también a otros cationes presentes en el complejo de cambio como el potasio y el magnesio, cationes que pueden tener concentraciones relativamente elevadas en suelos agrícolas de la Región Pampeana. A modo de referencia, en las Tablas 7 y 8 se muestran dosis teóricas de aplicación de yeso para alcanzar un 2 y 5% de PSI, respectivamente, considerando eficiencias diferenciales según el nivel de PSI inicial del suelo.

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia esperada de la aplicación de yeso en suelos con influencia de la capa freática y/o ascenso capilar de sales hacia la superficie es baja. Dicha efectividad se encuentra influenciada por diversos factores como la dosis, pureza y granulometría del yeso; PSI inicial del suelo, textura y MO del suelo y el método de aplicación. Cuanto mejor es la condición física del suelo y menor la influencia del ascenso capilar de sales, mayor es la eficiencia y perdurabilidad esperada del agregado de yeso. También las condiciones ambientales durante la aplicación y luego de la aplicación, sobre todo temperatura y humedad edáfica son factores a considerar. Cuanto mayor es el PSI inicial del suelo, a igualdad de otros factores, mayor es la eficiencia teórica del intercambio del calcio aportado por el yeso por el sodio adsorbido en el complejo de cambio del suelo (Richards, 1973).

### **Pautas para la aplicación de yeso agrícola en suelos sodificados por el riego complementario**

#### **Características del riego complementario**

Si bien los sistemas de producción de granos de la Pampa Ondulada son fundamentalmente de secano, existen eventos de sequía estival más o menos severos en la región. En este tipo de condiciones, el riego complementario incrementa marcadamente los rendimientos de los cultivos, estabilizando los mismos en el tiempo, aspecto que representa un gran beneficio para la empresa agropecuaria debido a la posibilidad de minimizar el riesgo climático en cultivos sensibles al estrés hídrico como el maíz (Torres Duggan *et al.*, 2016).

El rasgo principal del riego complementario es la aplicación de láminas inferiores a 300 mm aplicadas cuando la humedad del suelo se aleja del rango óptimo, dinámica que depende de la recarga por las lluvias y la descarga asociada a la demanda evapotranspirativa de los cultivos (Génova, 2011). Asimismo, en general, el momento de riego coincide con etapas fenológicas críticas para la determinación del rendimiento de los cultivos como la floración y/o el llenado de granos cuando se presentan condiciones en donde los balances hidrológicos no permiten cubrir la demanda del cultivo. Por el contrario, en el riego integral practicado en zonas áridas, el número de riegos y fundamentalmente el volumen total de agua aplicada es muy superior, del orden de los 600 a 1200 mm (Génova, 2011). Si bien estos criterios permi-

ten ubicar las características diferenciales de cada tipo de riego, existe una heterogeneidad de modelos productivos que utilizan el riego complementario con un amplio gradiente de laminas de riego, dependiendo de las condiciones agro-ecológicas, cultivos y tipo de sistema de producción (Torres Duggan *et al.*, 2016). En los sistemas de producción de semillas es donde, principalmente se presentan las condiciones de mayo intensificación en el uso del riego complementario debido a la elevada rentabilidad de este tipo de producciones.

### **Sodificación y compactación en suelos bajo riego complementario**

Cuando el agua de riego es de mala calidad (e.g. elevado valor de RAS y/o sales), se pueden presentar procesos de salinización y/o sodificación, que alteran la fertilidad del suelo. Además de los procesos de salinización/sodificación en ambientes regados en forma complementaria, pueden ocurrir alteraciones del funcionamiento físico del suelo, principalmente de la infiltración y la resistencia mecánica. La compactación excesiva causada por el tránsito de maquinarias pesadas constituye un problema importante y frecuente en la Región Pampeana, tanto en áreas de secano como regadas (Álvarez *et al.*, 2009; Torres Duggan *et al.*, 2012 b; Torres Duggan *et al.*, 2016). Así, la preocupación sobre el impacto negativo de la compactación excesiva se incrementó en los últimos años en la Argentina, en consonancia con la intensificación agrícola y la expansión de la siembra directa. En este sistema de manejo, dominante en las áreas de producción extensiva de cultivos de granos de la Argentina, la compactación del suelo es causada principalmente por el tránsito de la maquinaria durante las prácticas culturales y de cosecha a lo que se suma la ausencia de remoción de los primeros centímetros del suelo. Las operaciones de cosecha, principalmente, se realizan en general con el suelo húmedo, utilizando alta presión en los neumáticos y equipos pesados (Botta *et al.*, 2004).

Cuando el riego aporta cantidades significativas de sodio al suelo, fenómeno estrechamente vinculado con la RAS del agua aplicada, puede ocurrir la sodificación del mismo. Este proceso consiste en el aumento del PSI. La sodificación puede ocurrir en regiones áridas, semiáridas o húmedas (Lavado, 2009), aunque su diagnóstico y pronóstico es muy diferente en cada condición climática. Así, en regiones áridas y semiáridas, donde los valores de CE edáficos son fre-



cuentemente elevados, los límites críticos de PSI utilizados para definir el riesgo de deterioro físico del suelo por efecto del sodio, son más altos ya que el suelo se encuentra flocculado. Por lo tanto, es posible aportar sodio sin observar efectos estructurales desfavorables (Summer, 1993). Por el contrario, en regiones húmedas o sub-húmedas, como las imperantes en las principales zonas de producción de granos, en donde se aplica riego complementario, las precipitaciones producen el lavado de sales durante el otoño, manteniendo bajos los niveles de CE del suelo. Cuando se utiliza agua de riego con altos valores de RAS, a igualdad de otros factores, se produce un incremento del PSI del suelo a expensas del desplazamiento del calcio o magnesio intercambiables adsorbidos en el complejo de cambio del suelo (Summer, 1993).

Los límites críticos de PSI considerados para definir a un suelo como “sódico” (*i.e.* PSI > 15%) fueron propuestos para regiones áridas y/o semiáridas donde los suelos presentan altos valores de conductividad eléctrica (CE) (Qadir & Schubert, 2002). Por lo tanto, en regiones húmedas o sub-húmedas, donde se utiliza el riego complementario, los límites críticos pueden ser significativamente más bajos (Balks *et al.*, 1998). En la Argentina, al igual que en otras regiones del mundo, los problemas de salinidad de suelos por riego prevalecen en regiones áridas. Por el contrario, en regiones húmedas y/o sub-húmedas, la sodicidad de suelos es la principal limitante asociada con el riego complementario en sistemas de producción extensiva de granos (Lavado, 2009; Génova, 2011; Torres Duggan *et al.*, 2016). En la mayor parte de los estudios que se han realizado en la Región Pampeana se observó que el riego complementario incrementó principalmente la sodicidad del suelo (PSI), con aumentos leves en la salinidad (CE) y el pH (Torres Duggan *et al.*, 2016).

#### **La condición física en suelos regados en forma complementaria**

Si bien el impacto del riego complementario sobre las propiedades edáficas es variable, se han observado efectos negativos del riego complementario sobre el funcionamiento físico del suelo, en particular sobre la infiltración de agua en diversos estudios efectuados en la Región Pampeana, aún en suelos en donde los niveles de PSI se pueden considerar “bajos” o “moderados” considerando los límites críticos de sodicidad válidos para regiones áridas (Pilatti *et al.*, 2005; Mon *et al.*, 2007; Torres Duggan *et al.*, 2012).

Otras propiedades físicas como la resistencia a la penetración fueron menos exploradas en áreas regadas. Sin embargo, en áreas de secano (la mayor parte del área cultivada en la región) existe evidencia de procesos de compactación superficial (incrementos en la dureza o resistencia mecánica) en planteos de siembra directa comparado con sistema de labranza convencional, que es consistente en diferentes contenidos hídricos de suelo (Álvarez *et al.*, 2009). Las principales causas de la compactación en este tipo de sistemas de producción se vincularían con el tráfico vehicular, la cosecha sobre suelo húmedo y la ausencia de remoción mecánica del mismo.

Es importante resaltar que la combinación de procesos de sodificación y compactación puede interactuar desfavorablemente sobre la condición estructural del suelo afectando negativamente el crecimiento de las raíces de cultivos (Taboada y Lavado, 1996). El impacto se puede presentar tanto en los cultivos en donde se aplica el riego complementario, como así también en los cultivos subsiguientes implantados en los mismos lotes (Torres Duggan *et al.*, 2016). Por ello es importante considerar los efectos del riego tanto sobre los cultivos regados como así también sobre los demás cultivos de la rotación manejados en secano. Como se mencionó antes, aún con niveles de PSI considerados bajos o moderados se han observado incrementos en el tamaño medio de los agregados, disminución en la tasa de infiltración y una tendencia a la formación de estructuras en bloques muy duros como forma estructural dominante en las situaciones regadas. En los ambientes regados, debido a que el suelo se mantiene con contenidos de humedad elevados, se enmascara el deterioro físico. Pero luego, en los cultivos de secano dentro de las rotaciones, el sodio intercambiable y la compactación favorecen la formación de costras muy duras en seco, que pueden afectar la implantación de los cultivos, y el acceso a los recursos abióticos como agua y/o nutrientes.

### **Modelo conceptual para el diagnóstico y mejoramiento de la condición física del suelo**

Recientemente Génova (2011), formuló un modelo conceptual en base a investigaciones de suelos regados en forma complementaria conducidos durante 20 años. La principal limitación del modelo es que considera como límite de referencia de sodificación el 15% de PSI, infiriendo la ausencia de deterioro estructural (*i.e.* sustentabilidad de la práctica)



cuando los niveles de sodicidad se ubican por debajo de dicho límite de PSI. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, de la experimentación a campo surgen alteraciones de la condición física de los suelos aún con valores menores de PSI. Por otro lado, el modelo conceptual propuesto por Génova, primero como una hipótesis y luego como una teoría general (Génova, 2011) considera una serie de supuestos que pueden presentarse o no en la condición particular del productor regante, requiriéndose por consiguiente una validación local. Estos supuestos son: lluvias del orden de los 950 mm, láminas de riego inferiores a 300 mm por temporada de riego, lavado de sales, abundancia de calcio intercambiable, intercambio catiónico favorecido por la mayor actividad del calcio en soluciones diluidas, drenabilidad de los suelos y escasa influencia de la capa freática. Sin embargo, tanto las lluvias como las láminas de riego aplicadas son muy variables en las diferentes regiones agro-ecológicas de la Región Pampeana, existiendo un amplio gradiente de posibilidades, desde aquellos planteos más parecidos a esquemas de riego integral hasta los sistemas típicos de riego complementario, dependiendo de la condición agro-ecológica, frecuencia y cantidad de agua regada. Esta variabilidad en las condiciones de riego justifican la evaluación y el monitoreo de los suelos regados a escala predial.

En otros países como Australia se han publicado límites críticos de sodificación del 5% de PSI (Balks *et al.*, 1998). En la Argentina, AAPRESID (2015) propuso en su “Manual de Buenas Prácticas Agrícolas e Indicadores de Gestión” tres categorías para el diagnóstico de sodicidad edáfica en condiciones de secano (Tabla 5).

Para condiciones de suelos regados en forma complementaria en zonas húmedas y/o suhúmedas, no se dispone de umbrales o lími-

Tabla 5. Limitaciones de sodicidad en suelos según nivel de PSI.

PSI	Diagnóstico
< 5	Suelo con mínimas limitaciones en la infiltración y desarrollo de cultivos.
5-15	Suelo con crecientes limitaciones en la infiltración y desarrollo de los cultivos.
> 15	Suelo sódico con severas limitaciones en la infiltración y desarrollo de la mayoría de los cultivos.

Fuente: AAPRESID, 2015.

tes de referencia de PSI. Como se mencionó previamente, si bien el PSI es un indicador muy utilizado para diagnosticar el riesgo de sodificación del suelo, no permite *per se* establecer si hay o no degradación estructural en el suelo y por consiguiente no permite determinar el grado de sustentabilidad en el manejo del riego complementario. Esto se debe principalmente a que el PSI a partir del cual se puede afectar desfavorablemente la condición física del suelo es variable y está regulado por una compleja interacción de propiedades como la textura del suelo, mineralogía de arcillas, contenido de MO y también de la humedad edáfica.

Preliminarmente, y con la finalidad de aportar un marco de referencia práctico para el productor regante, en la Figura 4 se presenta un esquema conceptual para evaluar el riesgo de sodificación del suelo según el nivel de PSI del suelo (0-20 cm).

Si bien se observa una dinámica de incremento y reducción de los niveles de PSI en post y pre-temporada de riego, respectivamente, los efectos sobre la dinámica estructural del suelo pueden mante-

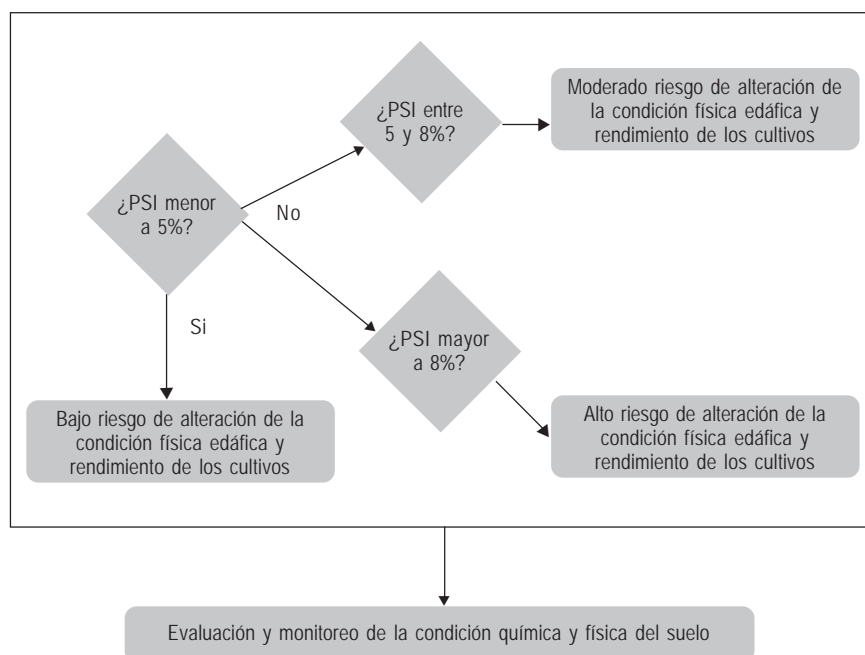


Figura 4. Modelo conceptual para evaluar el riesgo de sodificación y el subsiguiente efecto sobre la condición física del suelo regado en forma complementaria en la Región Pampeana. Fuente: Torres Duggan *et al.* (2016).

nerse y afectar a los cultivos implantados luego del cultivo regado dentro de las rotaciones. Esto debe ser considerado en el monitoreo integral de los agro-ecosistemas en donde se aplica riego complementario. Un modelo conceptual superador para la evaluación y monitoreo de suelos regados debería considerar, además de la evaluación de indicadores de salinidad y sodicidad (e.g. CE, PSI), el seguimiento de atributos morfológicos y físicos del suelo que permitan establecer la magnitud de los impactos actuales y su evolución temporal. Este enfoque no pretende definir si el manejo del suelo regado es o no sustentable, sino más bien ofrecer lineamientos para un uso responsable del recurso suelo.

### Estrategias y pautas para la aplicación de yeso

El uso de yeso en suelos bajo riego complementario debe formar parte de un diagnóstico y monitoreo integral. El mismo se basa en la evaluación de aspectos centrales como la calidad y cantidad del agua aplicada en el riego, como así también de las propiedades edáficas y condiciones agro-ecológicas (Torres Duggan *et al.*, 2016). En la Figura 5 se presenta un modelo conceptual para evaluar la condición

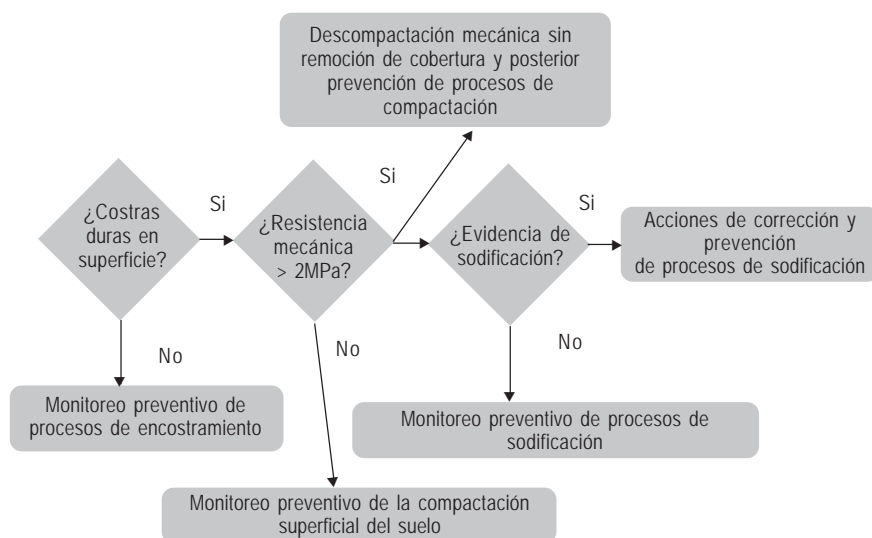


Figura 5. Modelo conceptual para la evaluación integral de la condición de fertilidad de suelos regados en forma complementaria de la Región Pampeana. Fuente: Torres Duggan *et al.* (2016).

de fertilidad de suelos regados en forma complementaria y en la Tabla 6 se indican algunas pautas para el diagnóstico, prevención y corrección de limitaciones físicas.

Tabla 6. Criterios y acciones para el diagnóstico, prevención y corrección de procesos de deterioro de la condición física edáfica en suelos regados en forma complementaria.

Contexto	Prácticas recomendadas
Diagnóstico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Análisis de suelos y seguimiento de variables de interés pH, CE, MO, CIC, cationes). Cálculo del PSI.</li> <li>✓ Análisis de aguas: pH, CE, aniones, cationes. Cálculo del RAS y RAS ajustado.</li> <li>✓ Observación del perfil (e.g. estructura; presencia de costras; profundidad de raíces; etc.).</li> <li>✓ Evaluación de la condición física (e.g. infiltración, resistencia mecánica, entre otras)</li> </ul>
Prevención	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ajuste de láminas de riego según necesidad real.</li> <li>✓ Evitar la compactación por tránsito de maquinaria durante labores culturales y de cosecha.</li> <li>✓ Rotación con gramíneas y cultivos de cobertura.</li> <li>✓ Fertilización balanceada.</li> </ul>
Corrección	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reducción de láminas de riego.</li> <li>✓ Aplicación de enmiendas minerales y orgánicas.</li> <li>✓ Remoción mecánica de costras y/o zonas compactadas mediante implementos que no remuevan o alteren la cobertura (e.g. paratil/paraplow).</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Torres Duggan *et al.* (2016).

La aplicación de yeso podría mejorar la estructuración del suelo regado, favoreciendo la eliminación, aunque parcial, del sodio intercambiable. Actualmente no se dispone de información experimental regional y/o subregional en la Región Pampeana para establecer con precisión dosis de aplicación de yeso en suelos bajo riego complementario en siembra directa. Preliminarmente y a modo de hipótesis, la aplicación de dosis bajas de yeso permitiría la disolución del yeso en este tipo de sistemas de manejo, y facilitaría su incorporación progresiva a través del riego o de la lluvia. Actualmente se encuentra en evaluación en algunos países el funcionamiento de correctores granulados de origen mineral en aplicaciones en cobertura total en planteos en siembra directa, principalmente asociado a la corrección de limitaciones de acidez edáfica (Caires *et al.*, 2000; Caires *et al.*, 2008; Torres Duggan *et al.*, 2013).

Otro aspecto poco explorado en el ámbito local es la aplicación combinada de yeso con residuos orgánicos de origen animal, que permitiría una mejora en la condición física edáfica debido al efecto favorable del carbono orgánico aportado por el residuo pecuario, y del calcio

soluble aportado por el yeso (*i.e.* mayor agregación y infiltración de agua). Asimismo, el yeso facilitaría la incorporación del abono orgánico, reduciendo las eventuales pérdidas de nitrógeno por volatilización de amonio. (Rasoulzadeh y Yaghoubi, 2010; Larney y Angers, 2012). En la Argentina, la mayor parte de los efluentes y residuos orgánicos de origen animal no son reutilizados en los propios agroecosistemas o en el ámbito de influencia de los mismos para aportar nutrientes esenciales para las plantas o como mejoradores de suelos. Por el contrario, en general, son acumulados en lotes destinados *ad hoc* o bien vertidos sobre cursos de agua cercanos, contaminando el ambiente (Herrero y Gil, 2008). Por ello es muy importante revalorizar estos materiales como recursos estratégicos a considerar en la fertilización de los cultivos, principalmente como fuentes de nitrógeno y fósforo, aprovechando residuos y efluentes disponibles a nivel local (Herrero, 2014; Torres Duggan y Rodríguez, 2015).

Tabla 7. Cálculo teórico de dosis de aplicación de yeso ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en suelos sodificados por el riego complementario para alcanzar PSI objetivo del 2%.

PSI inicial (%)	CIC ( $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$ )				Eficiencia (%)
	10	15	20	25	
5	0,9	1,3	1,8	2,3	50
8	1,8	2,7	3,7	4,6	50
11	2,5	3,9	5,2	6,9	60
14	3,5	5,2	6,9	9,2	60

Fuente: Elaboración propia. Supuestos: profundidad=20 cm;  $\text{Dap}=1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ; pureza del yeso=100%; masa equivalente del yeso=86. La eficiencia de intercambio varía según el PSI inicial y se consideró la propuesta en Richards *et al.* (1973). Supuesto: capa freática por debajo de profundidad crítica.

Tabla 8. Cálculo teórico de dosis de aplicación de yeso ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en suelos sodificados por el riego complementario para alcanzar PSI objetivo del 5%.

PSI inicial (%)	CIC ( $\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$ )				Eficiencia (%)
	10	15	20	25	
8	0,9	1,3	1,8	2,3	50
11	1,7	2,6	3,4	4,3	60
14	2,6	3,9	5,2	6,5	60

Fuente: Elaboración propia. Supuestos: profundidad=20 cm;  $\text{Dap}=1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ; pureza del yeso=100%; masa equivalente del yeso=86. La eficiencia de intercambio varía según el PSI inicial y se consideró la propuesta en Richards *et al.* (1973). Supuesto: capa freática por debajo de profundidad crítica.

### Conclusiones y consideraciones finales

La información presentada y discutida en el presente capítulo deja en evidencia la abundante información referida a la disponibilidad de yacimientos de yeso en el país como así también de su calidad y aptitud de uso en el ámbito agropecuario. Este cuerpo de conocimiento contrasta con la escasa información regional y/o subregional disponible sobre corrección/mejoramiento de suelos sódicos mediante aplicaciones de enmiendas en general, y particularmente con el yeso.

Debido a la gran complejidad intrínseca de los suelos sódicos se requieren abordajes integrales para evaluar las posibilidades de mejora y rehabilitación de los suelos, donde el agregado de yeso es un componente más de las técnicas factibles de implementar. Así, las características fisiográficas, edáficas, hidrológicas y la tecnología disponible para realizar las aplicaciones del yeso juegan un rol central en la determinación de la viabilidad y la eficiencia esperada de la aplicación de yeso en los agroecosistemas. El principal objetivo de su utilización debe ser coadyuvar, a través del mejoramiento de la condición física edáfica, en el mantenimiento y/o restablecimiento de la cobertura de vegetación, aspecto sumamente relevante para prevenir/minimizar el ascenso capilar de sales desde la capa freática y por consiguiente mantener la capacidad productiva del suelo. En este contexto, y sobre todo en suelos fuertemente sódicos, la aplicación de yeso en dosis reducidas, ya sea en forma granulada o en polvo, es una tecnología que debería evaluarse, ya que permitiría mejorar la instalación de la vegetación natural o la intersebrada en suelos bajos.

Por otro lado, la aplicación de enmiendas minerales en general y del yeso en particular en suelos regados en forma complementaria plantea nuevos desafíos que surgen, por un lado, del manejo dominante en siembra directa y por el otro, de la gran complejidad derivada de la superposición e interacción de procesos de sodificación y compactación en un mismo sistema de producción. En esta temática también se evidencia la escasa información experimental disponible en el ámbito local, sobre todo en cuanto al diagnóstico y tecnología de aplicación de yeso en diferentes tipos de suelos y/o bajo distintas situaciones de sodicidad o compactación.

La aplicación conjunta de enmiendas cálcicas como el yeso y residuos orgánicos debería ser una práctica estimulada tanto para promover su adopción como tecnología como así también como línea de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, CR; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; A Bono; PL Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1242-1250.
- Balks, W; WJ Bond & CJ Smith. 1998. Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. *Aust. J. Soil Res.* 36: 821-830.
- Botta, GF; D Jorajuria; R Balbuena & H Rossato. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78: 53-58.
- Caires, EF; D Banzatto & DA Fonseca. 2000. Calagem na superfície em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 24: 161-169.
- Caires, EF; FJ Garbuio; AS Churk; G Barth & JCL Correa. 2008. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean and wheat root growth and yield. *European Journal of Agronomy* 28: 57-64.
- Cisneros, JM; A Degioanni; JJ Cantero & A Cantero. 2008. Caracterización y manejo de suelos salinos en el área Pampeana. *En: La salinización de suelos en la Argentina, su impacto en la producción agropecuaria.* E. Taleisnik; K. Grunberg & G. Santa María (eds). Capítulo 2. Editorial Universidad Católica de Córdoba. P 17-46.
- De Campos Bernardi, AC; P Anchoa Oliviera; MB de Melo Monte & F Souza-Barros. 2013. Brazilian sedimentary zeolite use in agricultura. *Microporous and Mesoporous Materials* 167: 16-21.
- Génova, LJ. 2011. Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 119 (2): 63-81.
- Lodz, P & JL Costa. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudeste de la Pampa Deprimida. *Ciencia del Suelo* 17(2): 21-27.
- Gowariker, V; VN Krishnamurthy; S Gowariker; M Dhanorkkar & K. Paranjape. 2009. *En: The Fertilizer Encyclopedia.* A John Wiley & Sons, INC. 861 pp.
- Herrero, MA & SB Gil. 2008. Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología Austral* 18: 273-289.
- Herrero, MA. 2014. Manejo y tratamiento de estiércol y purines. Año? *En: La producción animal y el ambiente.* MA Herrero; SB Gil, M Rebuerto y GMI Sardi (eds). Bmpress. 97-126 p
- Herrmann, C & M Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. *En: Suelos y Geología Argentina.* FX Pereyra y M Torres Duggan (eds). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo y Asociación Geológica Argentina. P 329-355.
- Larney, FJ & DA Angers. 2012. The rol of organic amendments in soil reclamation: A review. *Can. J. Soil. Sci.* 92: 19-38.
- Lavado, RS y MA Taboada. 2009. Alteraciones de la fertilidad del suelo causado por halomorfismo. *En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones.* Capítulo 1. M.A. Taboada y R.S Lavado (eds). Editorial Facultad de Agronomía (UBA). p 1-44.
- Lavado, RS. 2009. Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. *En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos.* Capítulo 2. MA Taboada y RS Lavado (eds). Editorial FAUBA. p 45- 58.
- Lavado, RS. 2010. Salinidad y alcalinidad: propiedades, efectos sobre los cultivos y manejo. *En: Fertilidad de suelos, caracterización y manejo en la Región Pampeana.* Sección 1, Capítulo 3. R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez & RS Lavado (eds). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. p 21-44.
- Martínez, JS & LN Castro. 2012. Minerales y rocas en el arte, la ciencia y la tecnología. Eudeba. 180 pp
- Mon, R; C Irurtia; FG Botta; O Pozzolo; F Bellora Melcón; D Rivero & M Bomben. 2007. Effects of supplementary irrigation on chemical and physical soil properties in the Rolling Pampa región of Argentina. *Ciencia e Investigación Agraria* 34: 143-150.

- Pilatti, MA; S Imhoff; P Ghiberto & R Marano. 2005. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Ponce, B & M Torres Duggan. 2005. Yeso. *En: Minerales para la agricultura en Latinoamérica*. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (eds). 574 pp. CyTED.UNSAM-OLAMI.
- Qadir, M & S Schubert. 2002. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils. *Land Degrad. Develop.* 13: 275-294.
- Rasoulzadeh A & A Yaghoubi. 2010. Effect of cattle manure on soil physical properties on a Sandy clay loeam soil in North-West Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 8(2): 976-979.
- Richards, LA. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Editorial Limusa. México. 172 pp.
- Rodríguez, MB & M Torres Duggan. 2015. Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. *En: Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana*. Álvarez, R (ed). Facultad de Agronomía (UBA). 369-400 pp.
- SEGEMAR-UNSAM. 2008. Yacimientos portadores de sulfato de calcio. *En: Carbonato y sulfato de calcio*. Publicación técnica N°15. p 81-98.
- Summer, ME. 1993. Sodic soils: new perspectives. *Australian Journal of Soil Research* 31: 683-750.
- Taboada, MA & RS Lavado. 1996. Interactive effects of exchangeable sodium and water content on soil modulus of rupture. *Soil Technology* 8: 345-349.
- Til, AR. 2010. Sulphur and sustainable agriculture. First edition, IFA, Paris, France. 70 pp.
- Torres Duggan, M. 2007. Calidad de fertilizantes. ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico? *En: Simposio «Fertilidad 2007: Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos»*. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) y Fertilizar Asociación Civil. García, F e I Ciampitti, Editores. 160 pp.
- Torres Duggan, M; R Melgar; MB Rodríguez; RS Lavado & IA Ciampitti. 2012a. Sulfur fertilization in the Argentine Pampas region: a review. *Agronomía & Ambiente* 32(1-2): 61-73.
- Torres Duggan, M; CR Álvarez; MA Taboada; T Celesti; F Vignarolli & D D'ambrosio. 2012b. Riego complementario en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas. *Ciencia del Suelo* 30 (2): 201:207.
- Torres Duggan, M; MB Rodríguez & JA Lamelas. 2013. El azufre en los agro-ecosistemas: corrección de suelos y fertilización de cultivos. *En: «60 años de uso y conservación de suelos»*. III Simposio Paraguayo de Manejo y Conservación de Suelos. Hoheneau. Cooperativas Colonias Unidas (CCU) y Sociedad Paraguaya de la Ciencia del Suelo (SOPACIS). R. Samaniego & E. Hahn (eds). ISBN: 978-99967-726-1-0. pp 54-64.
- Torres Duggan, M & MB Rodríguez. 2015. Biomasa y aprovechamiento de agua y nitrógeno de raigrás en un Hapludol éntico tratado con residuos de feed lot y zeolitas. *En: Simposio Fertilidad 2015. Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro*. García y A Correndo (eds). p 217-225.
- Torres Duggan, M; CR Álvarez & H. Rimski Korsakov. 2016. Evaluación y monitoreo de suelos bajo riego complementario en la Región Pampeana. *En: 5ª Reunión Internacional de Riego*. INTA Manfredi. Córdoba. p 13-39.
- Van Straaten, P. 2014. Rocks for crops: the use of locally available minerales and rocks to enhance soil productivity. Proceedings of the 16<sup>th</sup> World Fertilizer Congress of CIEC. Technological innovations for a sustainable tropical agriculture. October 20-24. Río de Janeiro. Brazil. p 55-58.
- Vázquez, M. 2011. Causas de la acidificación en el ámbito templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. *En: Simposio Fertilidad 2011. La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción*. F.O. García & A. Correndo (eds). p. 13-29.
- Vázquez, M; A Terminiello; G Millán; I Daverede & E Baridon. 2013. Dynamics of soil liming materials broadcast on a thaptoargic Hapludoll soil in Argentina. *Ciencia del Suelo* 31(1): 23-32.