

**REHABILITACIÓN DE SUELOS SALINO-SÓDICOS:
EVALUACIÓN DE ENMIENDAS Y DE ESPECIES FORRAJERAS**

*Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires,
Área Recursos Naturales*

Ramiro Bandera

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de La Plata- 2004

INTA. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis
Patricia Susana Cornaglia
Ing. Agr. (UBA)
MSc. (UBA)

Consejero de Estudios
Miguel Ángel Taboada
Ing. Agr. (UBA)
MSc, (UBA)
Dr INP Toulouse

Consejero de Estudios
Daniel Gustavo Méndez
Ing. Agr. (UNMdP)
MSc. (UNMdP)

JURADO DE TESIS

JURADO
Dra. Silvia del Carmen Imhoff

JURADO
Dra. María Semmartin

Fecha de defensa de la tesis: 7 de Mayo de 2013

A mis padres, Juan Carlos y Amalia.

Agradecimientos

A mis Consejeros Ing. Agr. (MSc.) Daniel Méndez, Ing. Agr. (MSc, PhD.) Miguel Taboada e Ing. Agr. (MSc.) Patricia Cornaglia, por sus invalorables aportes en el desarrollo del presente trabajo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), por la financiación de la carrera de postgrado.

A la Asociación Cooperadora de la EEA INTA “General Villegas” por el aporte de recursos económicos para la adquisición del invernáculo.

A las autoridades de la EEA INTA “General Villegas” por haber facilitado los recursos humanos, material de laboratorio y vehículos, indispensables para el desarrollo del trabajo.

Al Ing. Agr. (MSc.) Cristian Álvarez (EEA INTA “General Villegas”), por la ayuda prestada en la toma de muestras de suelo e interpretación de datos.

Al Ing. Agr. Francisco Babinec (EEA INTA “Anguil”) por su valiosa contribución en el análisis estadístico de la información obtenida.

Al Med. Vet. (MSc.) Patricio Davies y a la Ing. Agr. (MSc.) Irene Ceconi, integrantes del Grupo de Producción Animal de la EEA INTA “General Villegas”, por su permanente colaboración.

A Paula Fumagallo, Bibliotecaria de la EEA INTA “General Villegas”, por la ayuda prestada en la búsqueda de bibliografía.

A los ayudantes de campo del Grupo de Producción Animal de la EEA INTA “General Villegas”, Sres. José Videla, Matías Morán, Rubén Gerez y Ricardo Ranalli, por su colaboración en los trabajos de campo, invernáculo y procesamiento de muestras.

Al Ing. Agr. (PhD.) Alberto Quiroga (EEA INTA “Anguil”), por su colaboración en la interpretación de datos de suelo y su buena predisposición.

Al Sr. Raúl Arano, por haber facilitado una sección de su establecimiento para llevar a cabo el trabajo.

Al personal Administrativo de la EEA INTA “General Villegas”.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia del problema de salinización de los suelos ..	1
1.2. Causas de la salinización de los suelos	2
1.3. Efectos de las sales sobre el crecimiento de las plantas.....	4
1.4. Métodos de rehabilitación	5
1.5. Objetivos	6
1.6. Hipótesis.....	6

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características más importantes de la región de estudio.....	8
2.2. Experimentos.....	8
2.2.1. Experimento en invernáculo	8
2.2.1.1. Tratamientos	10
2.2.1.2. Determinaciones	11
2.2.1.3. Análisis estadístico.....	12
2.2.2. Experimento a campo	12
2.2.2.1. Tratamientos	13
2.2.2.2. Cobertura vegetal generada.....	13
2.2.2.3. Determinaciones.....	14
2.2.2.4. Diseño experimental.....	14
2.2.2.5. Análisis estadístico.....	15
2.2.2.6. Datos climáticos.....	15
2.2.2.7. Muestreo de suelo sectorizado en el cultivo de <i>Sorghum sudanense</i>	16

CAPITULO 3. RESULTADOS

3.1. Experimento en invernáculo	17
3.1.1. Biomasa aérea	17
3.1.2. Biomasa radical.....	21
3.1.3. Relaciones biomasa aérea/biomasa radical y biomasa aérea/biomasa total...	22
3.1.4. Biomasa aérea acumulada.	23
3.1.5. Concentración de minerales en la materia seca aérea y radical	24
3.2. Experimento a campo.....	25
3.2.1. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades químicas del suelo.....	25

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN

4.1. Experimento en invernáculo	28
4.2. Experimento a campo.....	30

CAPÍTULO 5: SUMARIO DE RESULTADOS, CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS AGRONÓMICAS 33**PERSPECTIVAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS** 37**BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....** 38

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1. Suelos afectados por sales en el mundo	1
Tabla 1.2. Clasificación de suelos afectados por sales.....	3

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 2.1. Características más importantes de la serie de suelos “Drabble”	9
Tabla 2.2. Propiedades químicas del suelo experimental	9
Tabla 2.3. Propiedades químicas de los Biosólidos de Feedlot (BF) y de los Efluentes de Tambo (BT).....	10
Tabla 2.4. Precipitaciones por trimestre (mm).....	15
Tabla 2.5. Temperaturas medias mensuales (°C)	15

CAPITULO 3. RESULTADOS

Tabla 3.1. Relaciones biomasa aérea, radical y total al primer y segundo corte	23
Tabla 3.2. Concentración de minerales en la materia seca aérea y radical de <i>Thinopyrum ponticum</i> al segundo corte.....	24
Tabla 3.3. Valores promedio (para las dos profundidades evaluadas y los dos meses de muestreo) de las propiedades químicas de suelo para cada tratamiento, con y sin cobertura vegetal	25
Tabla 3.4. Porcentaje de individuos logrados en cada una de las unidades experimentales, por cultivo y para cada tratamiento.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Fig. 3.1. Materia seca aérea total de forraje al primer y segundo corte	17
Fig. 3.2. Materia seca aérea de forraje (0-7 cm y > 7 cm) al primer y segundo corte	18
Fig. 3.3. Longitud de láminas y longitud de vainas al primer y segundo corte	19
Fig. 3.4. Número de macollos por planta al primer y segundo corte	20
Fig. 3.5. Biomasa por macollo al primer y segundo corte	21
Fig. 3.6. Materia seca radical total al primer y segundo corte	21
Fig. 3.7. Materia seca radical por estratos de profundidad (0-10 cm, 10-20 cm y > 20 cm) al primer y segundo corte	22
Fig. 3.8. Materia seca aérea de forraje (> 7 cm) acumulada en los dos cortes	24
Imagen 3.1. A. Unidad experimental con sectores sin logro de individuos (a), con individuos de mediano desarrollo (b) y con individuos de gran desarrollo (c). B. Unidad experimental con 100% de individuos logrados, todos ellos de gran desarrollo	26

Declaración

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.”

Ramiro Bandera
Ing. Agr.

Abreviaturas

BA:BR = Relación biomasa aérea/biomasa radical

BA:BT = Relación biomasa aérea/biomasa total

BF = Biosólidos de Feedlot

BT = Efluentes de Tambo

CE = Conductividad Eléctrica

CIC = Capacidad de Intercambio Catiónico

MO = Materia Orgánica

MS = Materia seca

PSI = Porcentaje de Sodio Intercambiable

RAS = Relación Adsorción Sodio

T = Testigo.

Y = Yeso.

REHABILITACIÓN DE SUELOS SALINO-SÓDICOS: EVALUACIÓN DE ENMIENDAS Y DE ESPECIES FORRAJERAS

RESUMEN

La salinización de los suelos es uno de los problemas más graves de degradación en el mundo. En la Argentina hay aproximadamente 85.000.000 ha afectadas por exceso de sales y sodio. La generación de productos orgánicos como residuo de procesos industriales es vista con interés para la recuperación de suelos salino-sódicos. Por otra parte, en producciones extensivas se generan productos orgánicos con potencial de bioremediación como los biosólidos de Feedlot (BF) y los Efluentes de Tambo (BT). El **objetivo** de esta tesis fue investigar posibles estrategias de rehabilitación de suelos salino-sódicos, a través de la evaluación de la aplicación de enmiendas biológicas (Biosólidos de feedlot y Efluentes de tambo) y químicas (Yeso) con el fin de modificar las propiedades químicas de suelos Natracuoles y mejorar la productividad primaria de gramíneas forrajeras perennes. Para esto, se llevaron a cabo dos ensayos, uno bajo condiciones de invernáculo y otro a campo. En los dos ensayos los tratamientos fueron: testigo (T), aplicación de 8 t de materia seca (MS) ha⁻¹ de BT, aplicación de 8 t MS ha⁻¹ de BF y aplicación de 12 t ha⁻¹ de Y. En invernáculo se evaluó la respuesta en biomasa aérea y radical de *Thinopyrum ponticum* (agropiro alargado). En el ensayo de campo se evaluó el comportamiento de las enmiendas sobre las propiedades químicas del suelo, utilizándose cobertura vegetal de cebada (*Hordeum vulgare L.*) y sorgo para silaje (*Sorghum sudanense*). En invernáculo se comprobó que los BT, los BF y el Y incrementaron la MS aérea y radical de *T. ponticum*. En el ensayo a campo, se comprobó que los BT, los BF y el Y, no tuvieron efecto alguno sobre las propiedades químicas del suelo. La variabilidad observada en la materia seca (MS) de *S. sudanense* se explicó en un 49 % por el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) del suelo y la profundidad del horizonte A. Se concluye que los BT, los BF y el Y incrementaron la MS aérea y radical de agropiro bajo condiciones de invernáculo, pero a campo, no fueron efectivos en la remediación de la salinidad y la sodicidad del suelo debido a la elevada variabilidad edáfica y a la sequía ocurrida durante el período experimental, condiciones que impidieron la lixiviación de sodio intercambiado por calcio y el exceso de sales solubles, y la consecuente remediación. La falta de respuesta observada a campo fue atribuida, además a la decobertura superficial del suelo por la labranza, particularmente en suelos con delgado horizonte A.

Palabras clave: enmiendas, salinidad, suelos sódicos, yeso, *Thinopyrum ponticum*.

RECLAMATION OF SALINE-SODIC SOILS: AMENDMENTS APPLICATION AND FORAGE CROPS

ABSTRACT

Soil salinization is one of the most serious concerns of land degradation in the world. Around 85 million hectares are affected by excess of salts and sodium in Argentina. The organic product generation, as a by-pass product of industrial processes, is regarded with interest for the reclamation of saline-sodic soils. In addition, extensive productions generate organic products with potential for bioremediation such as the case of Dairy Slurry (BT) and Cattle Slurry (BF). The aim of the present study was to evaluate the effects in some chemical properties and forage productivity by additions of biological amendments (BT and BF) and Gypsum (Y) to a saline-sodic soil. Two experiments were carried out: one at greenhouse conditions and the other at field conditions. In two experiments, the treatments were: control (T), and application of 8 Mg dry matter (DM) BT ha⁻¹, 8 Mg DM BF ha⁻¹, and 12 Mg Y ha⁻¹. In the greenhouse experiment, the treatments were evaluated in terms of the aerial and root biomass of *Thinopyrum ponticum*. In the field experiment, treatments were evaluated in terms of soil salinity and sodicity. All field treatments were planted with barley (*Hordeum vulgare L.*) and sorghum (*Sorghum sudanense*) as cover crops. In the greenhouse experiment, BT, BF and Y, increased the aerial and radical MS production of *Thinopyrum ponticum*. In the field experiment, treatments did not change soil salinity or sodicity. Soil exchangeable sodium percentage (PSI) and horizon A thickness explained 49% of the variability of Sorghum biomass production. It can be concluded that under greenhouse conditions BT, BF and Y, increased aerial and radical DM production of *Thinopyrum ponticum*, but under field conditions, they was not effective in remediating soil salinity and sodicity, due to the variability of soil properties and drought during the experimental period, conditions that prevented leaching of sodium interchanged by calcium and leaching of excess of soluble salts, and the consequent remediation. Furthermore, the lack of effects observed in the field was attributed to the remove vegetal cover of soil by tillage; particularly in soils with thin A horizon.

Keywords: amendments; salinity; sodic soils; gypsum; *Thinopyrum ponticum*.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia del problema de salinización de los suelos

Actualmente, la población mundial se ubica en 6.8 billones de personas, proyectándose un incremento de 3.1 billones para el año 2050 (Naciones Unidas, 2009). Este escenario plantea grandes desafíos tecnológicos para las próximas décadas, ya que la producción de alimentos deberá incrementarse en un 57% (Wild, 2003) y dentro de ello, la producción global de granos en un 100% (Alexandratos, 1999; Cassman, 1999) para sostener dicho crecimiento poblacional.

Si bien la incorporación de nuevas tecnologías para incrementar los rendimientos por hectárea es uno de los caminos a seguir, para el caso de suelos degradados se requiere de mayores esfuerzos para incrementar su productividad. Un trabajo reciente pone de manifiesto dicha problemática, indicando que aproximadamente un 15 % de la totalidad de los suelos del mundo se encuentran degradados, debido principalmente a procesos de erosión y de degradación física y química, incluyendo la salinización (Wild, 2003).

La salinización de los suelos es uno de los problemas más graves a los que se enfrenta la agricultura mundial. Los suelos afectados por sales se caracterizan por la acumulación de cantidades excesivas de sales solubles, sodio intercambiable o ambos, de tal manera que afectan o alteran su productividad. Existen en el mundo 830 millones de hectáreas con problemas de salinización (Martínez-Beltran y Manzur, 2005). La distribución de los suelos salinos en el mundo, demuestra que se trata de un problema que afecta a los cinco continentes (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Suelos afectados por sales en el mundo (Szabolcs, 1994).

Área geográfica	Superficie afectada (%)
Norteamérica	1,6
Centroamérica	0,2
Sudamérica	13,5
África	8,4
Sur de Asia	9,1
Norte y Centro de Asia	22,2
Sureste Asiático	2,1
Australia	37,6
Europa	5,3
Total	100

El desarrollo de suelos salinos ha sido asociado a climas áridos y semiáridos, debido a la incorporación de sales con el agua de riego. El uso de aguas de mala calidad es una de las causas antropogénicas más importantes de pérdida de productividad de los suelos por salinización en ambientes de clima árido y semiárido. Thomas y Middleton (1993) advirtieron que el riego es el responsable de este problema en más de 10 millones de hectáreas al año, a escala mundial. Existen diversas consecuencias del

fenómeno de salinización, pudiéndose agrupar en agronómicas y de índole social. Entre las agronómicas se encuentran la pérdida de la fertilidad de los suelos, la pérdida de biodiversidad y los procesos de desertificación (Szabolcs, 1994). Las consecuencias sociales más importantes son el abandono de tierras por tornarse improductivas y el deterioro en la estructura y estabilidad de las comunidades agrícolas, generando migración de trabajadores rurales hacia las grandes ciudades (FAO, 2000a).

En la República Argentina hay aproximadamente 85.000.000 ha afectadas por exceso de sales y sodio, incluyendo los ambientes áridos y semiáridos del país (Szabolcs, 1979). La información provista por la FAO (2000b) indica que Argentina posee aproximadamente 600.000 hectáreas de suelos bajo riego afectadas por problemas de salinidad y que nuestro país se ubica en tercer lugar, después de Rusia y Australia, con mayor superficie de suelos afectados por sales en el mundo.

A diferencia de otros países, que poseen suelos afectados por sales en climas áridos y semiáridos, en Argentina también existen enormes extensiones de estos suelos en climas húmedos y subhúmedos (Taboada et al., 2003), donde las sales provienen de las capas freáticas, predominando una dinámica climática e hidrológica más compleja y difícil de modelizar. La importancia del hidrohalomorfismo (exceso de sales y condiciones de anegamiento) en regiones húmedas y subhúmedas de Argentina lo demuestra la superficie que afecta a la Pampa Deprimida del centro-este bonaerense (9 millones de hectáreas) y al noroeste bonaerense (2,5 millones de hectáreas) (Taboada y Lavado, 2009). Lo anteriormente expuesto, pone de manifiesto la importancia del problema de la salinización de los suelos en el mundo y en Argentina y que su impacto en las actividades productivas, sociales y ambientales es altamente negativo.

1.2. Causas de la salinización de los suelos

La formación de suelos afectados por sales requiere de la presencia de una fuente de sales solubles y de un balance en donde los procesos de acumulación prevalezcan periódica o permanentemente sobre los de lavado (Darab, 1981). Los procesos de salinización y/o sodificación de los suelos se deben a la acumulación de sales y/o sodio intercambiable en las partes más deprimidas del relieve. Las mismas reciben las aguas de escorrentía o el aporte de capas freáticas salinas que, al ascender en períodos de lluvia abundantes, depositan cantidades considerables de sales en el perfil del suelo, variando su magnitud según la frecuencia y duración del fenómeno (Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires, 1987). Al finalizar un período lluvioso, se produce la eliminación del agua mediante evaporación e infiltración y comienza la desecación de las capas superiores del suelo. Al intensificarse el proceso, se produce el ascenso capilar del agua freática que, al evaporarse, enriquece de sales el perfil y, principalmente, la porción superior del suelo, fenómeno denominado “salinización”.

El USDA (1954) define a los suelos salinos y sódicos como aquellos que presentan concentraciones excesivas de sales solubles, sodio intercambiable o ambos, de tal manera que afectan o alteran la productividad. Tomando como criterios evaluativos, el valor de Conductividad Eléctrica (CE) de 4 dS/m a 25°C para la salinidad y el de 15% para el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), los suelos afectados por sales se clasifican en cuatro clases: normal, salino, sódico y salino-sódico (Tabla 1.2). Este criterio fue desarrollado para suelos halomórficos (con exceso de sales) de zonas áridas, usualmente destinados a riego, y no siempre se aplica correctamente a los suelos

halomórficos de zonas húmedas y subhúmedas. En ellos, los principales criterios para definir niveles excesivos de sodio intercambiable son el PSI y el valor Relación Adsorción Sodio (RAS) (Szabolcs, 1994).

Tabla 1.2. Clasificación de suelos afectados por sales (USDA, 1954).

CE = conductividad eléctrica. PSI = porcentaje de sodio intercambiable.

Suelo	pH	CE (dS m ⁻¹)	PSI (%)
Normal	6 a 7	< 2	< 15
Salino	< 8.2	> 4	< 15
Sódico	> 8.2	< 4	> 15
Salino-Sódico	> 8.2	> 4	> 15

Los suelos sódicos se caracterizan por su horizonte nátrico (Szabolcs, 1969) y se encuentran tanto en zonas áridas como en zonas semiáridas, con exceso de sodio que afecta la estructura del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, tales como la estabilidad estructural y la permeabilidad, se encuentran estrechamente vinculadas con la naturaleza del complejo de cambio y ésta, a su vez, con los efectos de dispersión coloidal. Así, el calcio imprime al suelo propiedades físicas favorables, mientras que el sodio induce la dispersión de arcillas y el hinchamiento coloidal. Estos procesos se suman a la formación de costras superficiales, para constituirse en los problemas estructurales que predominan en los suelos sódicos. Los problemas estructurales afectan el movimiento de agua y aire, la disponibilidad de agua, la penetración radical, la emergencia de plántulas y dificultan la realización de labranzas (Shainberg y Letey, 1984; Gupta y Abrol, 1990; So y Aylmore, 1993; Sumner, 1993). Estos cambios en las propiedades físicas y químicas reducen la actividad radical de las plantas, dando por resultado una baja productividad primaria.

Existen distintos tipos de suelos sódicos, que en la Pampa Deprimida (región centro-este de la provincia de Buenos Aires) siempre se ubican en las posiciones deprimidas del relieve. En la posición más baja se encuentran suelos de drenaje pobre, elevada alcalinidad sódica, bajo tenor de materia orgánica (MO) y nivel freático alto (Natracualf típico) (Zamolinski, 2001). En la medialoma se encuentran los Natracuales típicos (USDA, 1975), agrupándose en mosaicos de distinto grado de alcalinidad (Colabelli, 1996). Todos estos suelos sódicos difieren en su calidad agronómica, la cual está en gran parte determinada por la profundidad a la que se encuentra el horizonte nátrico y el espesor y propiedades del horizonte A. Los suelos Natracuales de la Pampa Deprimida poseen un horizonte A húmico y fértil, con pH neutro a moderadamente ácido (Lavado y Taboada 1988). Estos suelos ocupan ambientes planos tendidos, afectados por encharcamientos estacionales. Estos encharcamientos son causados usualmente por agua de lluvia, si bien al mismo tiempo se encuentra la capa freática próxima a la superficie del suelo (Lavado y Taboada 1988). Los Natracualfes poseen baja calidad agronómica, pues carecen de un horizonte A fértil, y poseen exceso de sodio intercambiable desde la superficie. A campo se los conoce como “barros blancos”, y su respuesta a prácticas de manejo difiere de los Natracuales, pues poseen escasa cobertura vegetal y baja diversidad florística. En ellos prevalecen gramíneas del género *Distichlis* (“pelo de chanco”) que poseen baja calidad forrajera.

Los Natracuoles ocupan dentro de la provincia de Buenos Aires 2.993.400 ha (SAGPyA e INTA, 1989). Estos suelos resultan de la interacción de diversos factores como el clima, la geomorfología, la hidrología y el uso del suelo (Lavado y Taboada, 1988). El drenaje interno de estos suelos determina un movimiento vertical lento del agua debido a la presencia de horizontes subsuperficiales muy arcillosos y alcalinos de baja permeabilidad (INTA, 1977; Perelman, 1984). El horizonte B, de baja permeabilidad característico de estos suelos, actúa como una barrera que limita la comunicación entre las aguas de lluvia superficial y el agua subterránea con alta concentración de sales, durante los episodios de encharcamiento invierno-primaverales (Lavado y Taboada 1988). Esta limitante determina la distribución de sales y sodio en el perfil. Lavado y Taboada (1988) hallaron en el centro de la Pampa Deprimida la existencia de dos regímenes de salinización independientes uno de otro, actuando a diferentes profundidades. En los horizontes profundos Bt y BC, la alcalinidad y salinidad son elevadas debido a la frecuente salinización provocada por el ascenso de la capa freática. En cambio, en los horizontes superficiales la alcalinidad y salinidad son bajas porque prevalece la lixiviación de sales, producto de la acción del agua de lluvia (Lavado y Taboada, 1988).

1.3. Efectos de las sales sobre el crecimiento de las plantas

La salinidad y sodicidad de los suelos son las principales restricciones para la producción agrícola y ganadera (Taleisnik et al., 2008). Los efectos de la elevada concentración de sales en los suelos sobre las plantas se expresan de varias formas. El principal efecto del estrés salino es una reducción del crecimiento foliar. Además, en gramíneas, el macollaje se reduce, esta variable es un componente importante de la acumulación de biomasa (Maas et al., 1994; Munns y Tester, 2008). Los rasgos fisiológicos más asociados a la tolerancia a la salinidad en gramíneas son la exclusión del ion, la tolerancia de los tejidos al sodio (Tester y Davenport, 2003; Munns y Tester, 2008) y el ajuste osmótico (Zhang et al., 1999). Por otra parte, parámetros de crecimiento como acumulación de materia seca (Munns y Tester, 2008), macollaje (Ruan et al., 2008) y crecimiento de las hojas (Taleisnik et al., 1997; De Luca et al., 2001) han sido criterios utilizados para caracterizar poblaciones y para evaluar tolerancia a salinidad en gramíneas.

Para la rehabilitación de suelos salino- sódicos se requieren especies tolerantes a condiciones de salinidad, las cuales, mediante cambios morfológicos garanticen su supervivencia y producción satisfactoria en estos ambientes (Munns y Tester, 2008). La magnitud de estos cambios en una forrajera juega un rol importante y definen la capacidad de aclimatación de la especie. Sin embargo, son escasos los estudios sobre el efecto de las enmiendas biológicas o químicas sobre la morfología de gramíneas templadas. El cubrimiento del suelo con forrajeras perennes tolerantes en áreas afectadas por sales reduciría la recarga y expansión de la salinidad (Rengasamy et al., 2003; Yunusa y Newton, 2003, en Zabala et al., 2011) y resultaría una de las alternativas más promisorias para rehabilitar áreas salino sódicas (Taboada y Lavado, 2009).

1.4. *Métodos de rehabilitación*

Varios han sido los métodos de recuperación aplicados con el objetivo de resolver la problemática de los suelos afectados por sodio. Los métodos de mejoramiento tienen como objetivo incrementar el contenido de calcio en el complejo de cambio de los minerales de arcilla, a expensas del sodio intercambiable (disminuir la sodicidad a valores lo más bajos posibles). El sodio reemplazado, junto con el exceso de sales solubles, es removido de la zona radical por el agua de infiltración. De esta manera, se busca incrementar la cantidad y estabilidad de poros que provean un ambiente físico favorable para el movimiento de agua y por ende para el crecimiento y desarrollo del sistema radical.

La aplicación de enmiendas químicas, como el yeso: Y ($SO_4 Ca.2H_2O$), es el método más difundido en el mundo para recuperar suelos sódicos (Ahmad et al., 1990; Ilyas et al., 1993; Ilyas et al., 1997; Qadir et al., 1996). En Argentina, Costa y Godz (1998) comprobaron que el agregado de Y produjo una mejora en un suelo Natracuol del sudeste de la Pampa Deprimida, favoreciendo la implantación de pasturas y duplicando la producción de materia seca. Del mismo modo, la efectividad del Y también fue probada en suelos sódicos del oeste bonaerense (Altamore et al., 1983). Sin embargo, el uso de Y implica la aplicación de altos volúmenes cuyo costo económico es elevado.

La biorremediación es una estrategia de recuperación biológica, basada en los cambios generados en el suelo a través del crecimiento de especies vegetales tolerantes a la sodicidad. Los mecanismos principales por los cuales se produce la biorremediación están relacionados con el incremento de la presión parcial de dióxido de carbono en la proximidad de las raíces, incrementándose de esta forma la solubilidad del carbonato de calcio nativo y promoviendo la recuperación en la zona radical. Otro mecanismo asociado al efecto anterior consiste en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo (estructura) como resultado del crecimiento y actividad radical. Resultados favorables relacionados a propiedades físicas de suelo y disponibilidad de nutrientes han sido hallados en diversos trabajos (Qadir et al., 1997; Khan, 2003; Mishra et al., 2003; Akhter et al., 2004).

La generación de productos orgánicos, como residuo de una serie de procesos industriales, ha sido vista con sumo interés por parte de investigadores para la recuperación de suelos sódicos. Se han hallado respuestas altamente positivas a la aplicación de biosólidos de plantas depuradoras en suelos sódicos y decapitados (Rodríguez et al., 2003). Se han observado descensos en la Relación Adsorción de Sodio (RAS), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), pH, y mejoras en la infiltración y estabilidad de agregados, como resultado de la aplicación de suero ácido proveniente de la elaboración de quesos (Jones et al., 1992; Lehrsh et al., 1993). Sin embargo, en producciones extensivas también podrían generarse productos orgánicos con potencial de biorremediación. Uno de los conflictos asociados a los procesos de intensificación de los sistemas de producción lechera es la cantidad creciente de Efluentes de Tambo: BT (efluentes generados en la limpieza de corrales, sala y máquina de ordeño e higiene de pezones). Esta problemática recibe mucha atención en países desarrollados (Meyer y Schwankl, 2000; Adhikari et al., 2005), pero sólo ha despertado un interés incipiente en nuestro país. La eliminación de desechos de producción lechera consiste en conducirlos a lagunas artificiales, y en muchos casos con posterior vertido a algún curso de agua en forma directa o indirecta. Es evidente que la gestión ambiental debe dejar de ser un camino paralelo a la gestión económica, para constituirse en parte del sistema de

producción, incorporando no sólo restricciones sino garantías de calidad, que permitan preservar el medioambiente.

La primera fuente de nutrientes empleada para restablecer o incrementar la fertilidad de los suelos fueron los residuos animales. No obstante, actualmente los residuos generados en las producciones bovinas en confinamiento son considerados desperdicios, y se invierten esfuerzos en eliminarlos, en lugar de evaluar su contribución a la restauración de la calidad del suelo (Bolton et al., 2004). Si bien la aplicación de abonos basados en estiércol vacuno es una práctica frecuente y de efectos conocidos sobre la fertilidad edáfica (Lal y Kang, 1982; Eck y Stewart, 1995; Stewart et al., 2000), no existen experiencias de similar alcance acerca de la utilización de Efluentes de Tambo. Una mayor concentración de grasas y proteínas en los residuos de la industria lechera con respecto al estiércol vacuno generaría en los suelos mayor cantidad de materia orgánica (MO) disuelta (Jomaa et al., 2003). Basado en estas evidencias, se propone la aplicación de distintas enmiendas a suelos Natracuoles con el fin de mejorar su productividad primaria a partir de las modificaciones en las propiedades químicas.

1.5. *Objetivos*

El **objetivo general** de esta tesis fue investigar posibles estrategias de rehabilitación de suelos salino-sódicos a través de la aplicación de enmiendas biológicas (Biosólidos de feedlot y Efluentes de tambo) y químicas (Yeso) con el fin de modificar las propiedades químicas de suelos Natracuoles de la región de la Pampa Arenosa y el crecimiento de especies forrajeras adaptadas.

De este objetivo general se desprenden los siguientes **objetivos específicos**:

1. Evaluar características morfológicas y la producción y partición de la biomasa aérea y subterránea de *Thinopyrum ponticum* en respuesta a la aplicación de enmiendas biológicas y químicas.
2. Evaluar los cambios en las propiedades químicas de suelos Natracuoles en respuesta a la aplicación de enmiendas biológicas y químicas.

1.6. *Hipótesis*

La **hipótesis general** establece que los suelos salino-sódicos rehabilitados con enmiendas biológicas (BT y BF) muestran mejoras agronómicas comparables con las logradas mediante la aplicación de enmiendas químicas clásicas, como el yeso (Y). Estas mejoras se incrementan cuando el suelo posee cobertura vegetal.

De esta hipótesis general se desprenden las siguientes **predicciones**:

1. La elevada cantidad de materia orgánica disuelta (MOD) en las enmiendas biológicas (mayor en el estiércol vacuno que en los efluentes de tambo) puede disolver el

carbonato de calcio nativo. Dada su reacción ácida, se incrementará el catión calcio en los sitios del complejo de cambio de los minerales de arcilla, a expensas del catión sodio. Esta reacción modifica las propiedades físico-químicas del suelo.

2. Los cambios generados en las propiedades químicas en los primeros centímetros de suelo promueven el crecimiento de especies forrajeras adaptadas a zonas semiáridas y con limitaciones por salinidad. Esto se expresará en cambios morfológicos, tales como un incremento del número de macollos, de plantas con mayor desarrollo aéreo y radical, debido a un menor contenido de sodio en sus tejidos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Características más importantes de la región de estudio

La región de la Pampa Arenosa abarca el sector noroeste de la provincia de Buenos Aires, sudeste de Córdoba, sur de Santa Fe y noreste de La Pampa, Argentina y cubre aproximadamente una superficie de 54.980 km² (Viglizzo et al., 2001).

El clima es templado. La temperatura media anual es de 16,2 °C, con medias máximas durante el mes de enero de 33,0 °C y medias mínimas durante el mes de julio de 1,6 °C. Las precipitaciones son altamente variables entre años, condición típica de ambientes semiáridos y subhúmedos, con una distribución primavera-verano-otoño.

Dentro de la Pampa Arenosa, específicamente en la región del noroeste bonaerense (región más acotada donde se realizó la presente tesis) la superficie afectada por exceso de sales y condiciones de anegamiento es de 2.500.000 hectáreas (Taboada y Lavado, 2009). Si bien no se cuenta con estimaciones que indiquen la superficie que ocupan los suelos Natracuoles en la región de la Pampa Arenosa, dentro de la Provincia de Buenos Aires estos suelos ocupan 2.993.400 ha (SAGPyA e INTA, 1989).

2.2. Experimentos.

Esta tesis contiene el desarrollo de un primer *experimento en invernáculo*, donde se evaluó el efecto de la aplicación de enmiendas (BF, BT y Y) sobre características morfológicas y producción de biomasa de *T. ponticum*

Posteriormente, se llevó a cabo un *experimento a campo*, complementario, donde se evaluó el impacto de la aplicación de las enmiendas (BF, BT y Y) sobre las propiedades químicas de un suelo Natracuol.

2.2.1. Experimento en invernáculo

Se planteó el **objetivo** de evaluar características morfológicas, composición química y la producción de biomasa aérea y subterránea de *T. ponticum* en respuesta a la aplicación de enmiendas biológicas (Efluentes de tambo y Biosólidos de feedlot) y químicas (Yeso) bajo condiciones controladas de régimen hídrico en invernáculo.

La **hipótesis** asociada es que:

Los suelos tratados con enmiendas biológicas o químicas promueven el crecimiento de especies forrajeras adaptadas a zonas semiáridas y con limitaciones por salinidad. Esto se expresará en cambios morfológicos, tales como un incremento del número de macollos, de plantas con mayor desarrollo aéreo y radical, debido a un menor contenido de sodio en sus tejidos.

El experimento se inició tomando suelo del horizonte superficial de una sección del Establecimiento “21 de Octubre” propiedad del Sr. Raúl Arano, ubicado en la localidad de Drabble (34° 54' S, 63° 44' W), Partido de General Villegas (Buenos

Aires). Por medio de cartas de suelo, se determinó que la sección pertenecía a un Natracuol típico, Serie “Drabble”, cuyas características se presentan en la tabla 2.1. Su secuencia de horizontes es: A, entre 0 y 0,12 m; BA, entre 0,12 y 0,20 m; Bt k, entre 0,20 y 0,45 m; presentando carbonato de calcio cementado por debajo de los 0,45 m.

Tabla 2.1. Características más importantes de la serie de suelos “Drabble” (INTA. CIRN, 1988).

Serie “Drabble” (Dr)	
Clasificación:.....	Natracuol típico, fina, illítica, térmica.
Posición:.....	Pie de loma y bajos
Pendiente:.....	0-1%, llana
Drenaje:.....	Pobrementemente drenado
Escurrimiento:.....	Muy lento
Permeabilidad:.....	Muy lenta
Alcalinidad:.....	Fuertemente alcalino
Salinidad:.....	Débilmente salino
Limitaciones de uso:.....	Drenaje pobre, fuerte alcalinidad, ligera salinidad

En la sección de donde se extrajo el suelo experimental, mediante la apertura de una calicata, se determinó una alta variabilidad en el espesor del horizonte superficial (horizonte A), siendo en promedio de 12 cm. El muestreo de suelo se realizó sobre una transecta de 10 metros, trazada en forma perpendicular a la pendiente sobre un sector representativo del sitio en cuanto a cobertura vegetal y relieve, tomándose muestras a intervalos de 2 metros. Las propiedades químicas del suelo experimental se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades químicas del suelo experimental: CE=Conductividad Eléctrica en el extracto de saturación del suelo; N total= Nitrógeno total; Pe= Fósforo extractable; Ca=Calcio; Mg=Magnesio; Na intercambiable = sodio intercambiable; PSI=Porcentaje de Sodio Intercambiable.

Parámetro	Profundidad (cm)	
	0-10	10-20
pH ^a	9,1	9,3
CE ^b (dS m ⁻¹)	4,08	4
Carbono orgánico ^c (g Kg ⁻¹)	7,2	11,3
N total ^c (g Kg ⁻¹)	1,24	1,65
Pe ^d (mg Kg ⁻¹)	24	20
Ca ^e (cmol Kg ⁻¹)	5,6	6,8
Mg ^e (cmol Kg ⁻¹)	1,2	1,2
Na intercambiable ^e (cmol Kg ⁻¹)	4,6	4,6
Capacidad de intercambio catiónico ^e (cmol Kg ⁻¹)	8,6	8,4
PSI	53,5	54,8

^a pH actual, (Thomas, 1996); ^b Método potenciométrico, relación suelo agua 1:2,5; ^c Combustión húmeda, ^d Olsen y Sommers, 1982; ^e Saturación con amonio (USDA, 1954).

Si bien por cartas de suelo se determinó que el suelo experimental pertenecía a un Natracuol típico, la variabilidad observada en la determinación del espesor del horizonte superficial (horizonte A) y en las propiedades químicas analizadas (Tabla 2.2), indicarían la presencia de un complejo de suelos con características de salinidad y sodicidad marcadamente heterogéneas.

2.2.1.1. *Tratamientos*

Se utilizó un Diseño Completamente Aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento para evaluar los siguientes cuatro tratamientos:

- T: Testigo, suelo natural
- BT: aplicación de 8 t MS. ha⁻¹ de Efluentes de Tambo
- BF: aplicación de 8 t MS. ha⁻¹ de Biosólidos de Feedlot
- Y: aplicación de 12 t. ha⁻¹ de Yeso

BT estuvo conformado por efluentes generados de la limpieza de corrales de espera, sala y máquina de ordeño de instalaciones de tambo y BF por orina y heces de animales confinados. El tratamiento Y contenía 23 % de calcio como elemento. Se utilizó una formulación comercial cuyo estado físico se presentaba en forma de gránulos. El tratamiento T correspondió a la condición natural del suelo. Las propiedades químicas de las enmiendas orgánicas utilizadas se describen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades químicas de los Biosólidos de Feedlot (BF) y de los Efluentes de Tambo (BT). MS=Materia Seca; CE=Conductividad Eléctrica; MO=Materia Orgánica; N=Nitrógeno orgánico; P=Fósforo; Na=Sodio

Parámetro	Enmiendas	
	BF	BT
MS (%)	63	1,45
pH ^a	6,6	9,1
CE ^b (dS m ⁻¹)	3,5	52,5
MO ^c (g Kg ⁻¹)	715	357
N ^d (g Kg ⁻¹)	17,5	13,2
P ^e (g Kg ⁻¹)	4,6	4,1
Na ^f (g Kg ⁻¹)	3	90

^a pH actual, agua 1:5; ^b C.E actual, agua 1:5; ^c Método Gravimétrico;

^d Nitrógeno orgánico total, combustión húmeda; ^e Fósforo total, digestión ácida; ^f Sodio total, fotometría de llama.

Las enmiendas Y y BF fueron aplicadas el 18/02/06 sobre un volumen de tierra en una sola oportunidad al inicio del ensayo. El suelo experimental fue tamizado por malla de 2 mm. Luego, se procedió al llenado de las macetas de 20 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. La enmienda BT, debido a su estado líquido, fue aplicada directamente sobre la tierra ya colocada en macetas iguales a las descriptas.

Las dosis propuestas (8 t MS. ha⁻¹ para BT y BF y 12 t. ha⁻¹ de yeso para Y) equivalían a 27 litros de efluente de tambo (tratamiento BT), a 62,20 g de heces y orina de animales confinados (tratamiento BF) y a 58,8 g de una formulación comercial de yeso (tratamiento Y).

Cada tratamiento dispuso de 6 macetas, 3 de las cuales se utilizaron para la evaluación del 1° corte y las otras tres para la evaluación del 2° corte, ambos destructivos. Transcurridos 30 días de la aplicación de las enmiendas se sembraron en cada una de 24 macetas totales, tres semillas de un cultivar comercial de *Thinopyrum ponticum*. Una vez producida la emergencia se procedió a ralear dejando una planta por maceta. Los riegos se efectuaron con agua de lluvia; la frecuencia se determinó pesando las macetas para mantener la humedad a 33 KPa (contenido de agua a capacidad de campo) y no bajar de 2/3 del contenido de agua a 33 KPa.

2.2.1.2. Determinaciones

Se realizaron dos cortes con el fin de comparar el crecimiento de las plantas. Para definir el momento de corte, se individualizaron y marcaron cuatro macollos de cada planta. Cuando la mitad de los macollos individualizados tuvieron la primera hoja emergida senescida en un 100% se procedió a realizar las mediciones (Berone et al., 2008). El primer corte se realizó el 18 de octubre de 2006 y el segundo el 12 de diciembre de 2006, a los 214 y 269 días desde la siembra, respectivamente.

En cada corte se determinó:

- Biomasa aérea (g MS/planta) discriminada en dos estratos, 0-7 cm y más de 7 cm, la altura de corte consideró el límite de consumo de un vacuno. Se registró la biomasa acumulada desde la siembra hasta inicio de senescencia de la primera hoja en el macollo marcado en el primer corte, y el segundo corte se evaluó un primer rebrote. En cada corte se registró el peso húmedo del material verde y se secó en estufa hasta peso constante (60° C). Para el 1° corte todas las macetas fueron cortadas, se hicieron determinaciones en la mitad de ellas correspondientes a cada tratamiento. La otra mitad se dejó para efectuar las determinaciones del 2° corte sobre el rebrote.

- Número de macollos totales, longitud de láminas y vainas en cada corte. El tamaño de las hojas se determinó sobre la hoja totalmente expandida más joven de cada macollo marcado (Berone et al., 2008).

- Biomasa de raíces (g MS raíz/planta), mediante corte del sistema radical. Las determinaciones fueron realizadas por estratos de profundidad, 0-10 cm, 10-20 cm, más de 20 cm. Las macetas conteniendo el sistema radical fueron ubicadas en recipientes con agua permaneciendo sumergidas por un período de 18 horas. Posteriormente se lavaron con agua corriente hasta separar totalmente las partículas de suelo adheridas a las raíces. Estas, una vez limpias, se cortaron a las profundidades descritas, se registró su peso húmedo y se colocaron en estufa hasta peso constante (60° C).

Se estimaron las siguientes relaciones:

- Biomasa por macollo: Biomasa aérea/Número de macollos (mg/macollo)
- BA:BR: Biomasa aérea/Biomasa radical (g MS/g MS)
- BA:BT: Biomasa aérea/Biomasa total (mg MS/mg MS)

Se determinó la concentración de los siguientes minerales en la MS aérea y radical de *T. ponticum* al segundo corte:

- Sodio (Na^+) y potasio (K^+) (Fotometría de llama)
- Calcio (Ca^{++}) y magnesio (Mg^{++}) (Espectrofotometría de absorción atómica)
- Fósforo (H_2PO_4^-) (Cromatografía)

2.2.1.3. Análisis estadístico

El modelo estadístico asociado al diseño experimental fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde:

Y_{ij} = Variable respuesta en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento

μ = Media general

τ_i = Efecto del tratamiento i.

ε_{ij} = Error aleatorio, donde $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$

Los datos fueron analizados con el programa Statistix 8 (Analytical Software, 2000), siendo el test de la diferencia mínima significativa (DMS) la prueba utilizada para comparar medias de tratamiento ($p < 0.1$)

2.2.2. Experimento a campo

Posteriormente al experimento en invernáculo, se llevó a cabo un experimento complementario a campo con el **objetivo** de evaluar los cambios en las propiedades químicas de suelos Natracuoles en respuesta a la aplicación de enmiendas biológicas (Biosólidos de feedlot y Efluentes de tambo) y químicas (Yeso).

La **hipótesis** asociada es que:

La aplicación de enmiendas biológicas (BF, BT) a suelos Natracuoles de la región de la Pampa Arenosa generan cambios en las propiedades físico-químicas en superficie, comparables a las mejoras logradas mediante la aplicación de enmiendas químicas

como el yeso (Y), debido a las características constitutivas de estas enmiendas (elevado contenido de materia orgánica disuelta de característica acida).

El ensayo fue llevado a cabo desde agosto de 2007 hasta septiembre de 2008 en el Establecimiento “21 de Octubre” propiedad del Sr. Raúl Arano, ubicado en la localidad de Drabble (34° 54′ S, 63° 44′ W), Partido de General Villegas (Buenos Aires). Las características de la serie de suelos fueron descriptas en la tabla 2.1. El área de estudio presentaba un 100 % de cobertura vegetal de *Cynodon dactylon* (“gramón”). Las propiedades químicas del suelo fueron descriptas en la tabla 2.2.

2.2.2.1. Tratamientos

Con posterioridad al muestreo de suelo del sitio experimental, se marcaron 12 unidades de 10 m x 10 m sobre las que se asignaron en 3 bloques los siguientes tratamientos:

T: Testigo
 BT: aplicación de 8 t MS. ha⁻¹ de BT
 BF: aplicación de 8 t MS. ha⁻¹ de BF
 Y: aplicación de 12 t. ha⁻¹ de Y

Se seleccionó un diseño experimental en bloques completos aleatorizados para controlar la posible heterogeneidad del sitio experimental (evidenciada al momento de caracterizar física y químicamente el suelo experimental que fue utilizado en el experimento en invernáculo). Los bloques de parcelas fueron ubicados en forma perpendicular a la pendiente del terreno.

La conformación de las enmiendas (BT, BF y Y) y sus propiedades químicas, fueron descriptas en el Capítulo 2, inciso 2.2.1 y en la Tabla 2.2, respectivamente.

Las enmiendas fueron aplicadas en una sola oportunidad al inicio del ensayo, en el mes de septiembre de 2007. Previo a la aplicación de los tratamientos se decidió una remoción superficial de la cobertura vegetal presente (*Cynodon dactylon*) mediante un arado de disco, para permitir una adecuada incorporación de las enmiendas al suelo. Seguidamente se aplicaron las enmiendas Y y BF, las cuales fueron entremezcladas con el suelo mediante el pasaje de un arado de disco. La enmienda BT, dado a su estado líquido, fue aplicada mediante riego superficial.

2.2.2.2. Cobertura vegetal generada

Una vez aplicadas las enmiendas, se procedió a la instalación de cultivos de cobertura en la mitad de cada una de las parcelas, con el objetivo de generar abundante biomasa radical en cortos períodos de tiempo (factor adicional en el modelo matemático de efectos). Debido a que *T. ponticum* es una especie perenne de lento crecimiento inicial (lenta implantación), se la reemplazó por dos cultivos anuales tolerantes a salinidad de suelo: *Hordeum vulgare* L y *Sorghum sudanense* (Maas y Hoffman, 1977).

De esta manera, el 26 de marzo de 2008, se sembró un cultivo de *H. vulgare L.* La siembra se realizó utilizando una densidad de 143 Kg ha⁻¹ en líneas distanciadas a 20 cm. Una vez culminado el ciclo de *H. vulgare L.*, el 16 de noviembre de 2008 se sembró un cultivar comercial de Sorgo para silaje (*S. sudanense*). La siembra se realizó utilizando una densidad de 25 Kg ha⁻¹, en líneas distanciadas a 54 cm.

2.2.2.3. Determinaciones

En suelo:

Se realizaron dos muestreos de suelo posteriores a la aplicación de las enmiendas. El primero se realizó transcurridos seis meses (17 de marzo de 2008) y el segundo a los doce meses (25 de septiembre de 2008). Ambos muestreos fueron realizados diferenciando la presencia o ausencia de cobertura vegetal, como subtratamientos. Las profundidades evaluadas fueron 0-10 y 10-20 cm. Cada muestra consistió de 15 submuestras tomadas al azar para cada profundidad. Las propiedades químicas de suelo evaluadas en cada muestreo fueron:

- Conductividad eléctrica de extractos (CE) en el extracto de saturación del suelo.
- pH en solución, relación suelo/agua 1:2,5 (Thomas, 1996).
- Fósforo extractable (Olsen y Sommers, 1982)
- Sodio intercambiable, por desplazamiento de cationes con solución de acetato de amonio. Determinación del Na⁺ (cmol kg⁻¹ suelo seco) por espectrofotometría de llama.
- Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), en base al cociente entre la concentración de Na⁺ intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), expresados en cmol kg⁻¹ suelo seco.

En planta:

Luego de la implantación de cada uno de los cultivos (*H. vulgare L.* y *S. sudanense*) se planificó cuantificar la producción de MS total de forraje (Kg ha⁻¹) mediante cortes con marco de 50 x 50 cm. Los cortes se realizarían una vez registrado el inicio de senescencia de las hojas basales. Se planificó realizar tres cortes por unidad experimental que serían promediados para obtener la observación de cada unidad experimental.

2.2.2.4. Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue en Bloques Completos Aleatorizados con tres repeticiones por tratamiento para las variables en planta y con un arreglo en parcela

dividida para las variables en suelo. Los tratamientos fueron asignados al azar (parcela principal) cuya superficie fue de 100 m² (10 m x 10 m) y los subtratamientos fueron aleatorizados dentro de la parcela principal y estuvieron conformados por la presencia o ausencia de cobertura.

2.2.2.5. Análisis estadístico

Los datos de las propiedades químicas de suelo fueron analizados según un modelo lineal mixto. Los factores fijos fueron las enmiendas, la cobertura (con y sin cobertura vegetal), los meses de muestreo (marzo y septiembre) y las profundidades de muestreo (0-10 y 10-20 cm). El factor bloque y sus interacciones fueron considerados aleatorios.

El procedimiento empleado fue el PROC MIXED del programa SAS (SAS Institute Inc., 2004).

2.2.2.6. Datos climáticos

Se presentan a continuación los registros de precipitación por trimestre (Tabla 2.4) y temperaturas medias mensuales (Tabla 2.5).

Tabla 2.4. Precipitaciones por trimestre (mm). Valores registrados por la estación meteorológica del INTA EEA General Villegas.

Año	E-F-M	A-M-J	J-A-S	O-N-D	Total
2007	492,6	63,4	89,4	177,3	822,0
2008	215,2	26,6	60,0	271,0	572,8
Promedio 1974-2006	353,0	147,6	88,8	333,1	905,0

Tabla 2.5. Temperaturas medias mensuales (°C). Valores registrados por la estación meteorológica del INTA EEA General Villegas.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Promedio
2007	23,0	22,0	20,0	18,0	10,0	7,8	7,0	7,9	15,0	18,0	20,0	23,0	15,85
2008	23,0	23,0	21,0	16,0	13,0	9,2	12,0	11,0	14,0	17,0	24,0	23,0	17,1
Promedio 1974-2006	23,0	21,8	19,7	15,3	12,2	8,8	8,2	10,1	12,6	16,1	19,1	22,0	15,8

2.2.2.7. Muestreo de suelo sectorizado en el cultivo de *S. sudanense*

Debido a la heterogeneidad observada en el logro y desarrollo de individuos de *H. vulgare L.* y *S. sudanense* entre las unidades experimentales, que no permitieron realizar las mediciones comentadas en 2.2.2.3 (en planta), se realizó un agrupamiento de poblaciones de plantas de *S. sudanense* en base a altura y logro de individuos dentro de cada unidad experimental, quedando delimitadas tres situaciones de estado del cultivo: *individuos no logrados*, *individuos de mediano desarrollo* e *individuos de gran desarrollo* (con respecto a la altura promedio del híbrido).

En las tres situaciones de estado del cultivo, se realizaron determinaciones en el horizonte A y B del suelo y en las plantas. En el horizonte A se determinó la CIC (cmol Kg^{-1}), la CE en el extracto de saturación (dS m^{-1}), el pH actual (Thomas, 1996), la concentración de Na^+ intercambiable (cmol Kg^{-1}), se calculó el PSI y se midió el espesor del horizonte A (cm.). En el horizonte B del suelo, se determinó el espesor (cm), la humedad (%) y el pH actual (Thomas, 1996). En las situaciones *individuos de mediano desarrollo* e *individuos de gran desarrollo* se determinó la producción de MS (Kg. ha^{-1}).

Los datos fueron analizados según un modelo de regresión múltiple, mediante el procedimiento de selección de variables Stepwise del programa SAS (SAS Institute Inc., 2004). Se determinó la mejor ecuación de predicción para la MS de *S. sudanense*, utilizando PSI, CIC, Espesor del horizonte A y Espesor, humedad y pH del horizonte B, es decir aquellas variables que no presentaron correlación significativa ($p > 0.05$).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1. Experimento en invernáculo

3.1.1. Biomasa aérea

En todas las enmiendas probadas, las plantas de *T. ponticum* fueron más pesadas que aquellas del tratamiento testigo (Figura 3.1). Sin embargo, estadísticamente, sólo BF superó a T ($p < 0.10$), produciendo 26 veces más. La biomasa aérea total (acumulada desde la siembra hasta el primer corte) varió entre 4,19 g MS/planta (para el tratamiento BF) y 0,16 g MS/planta (para el tratamiento T). Aunque la producción de biomasa aérea total de BF no se diferenció del resto de las enmiendas ($p > 0,10$), éste tratamiento duplicó el crecimiento respecto de las aplicaciones de BT y Y, en tanto que en T la biomasa producida fue mínima.

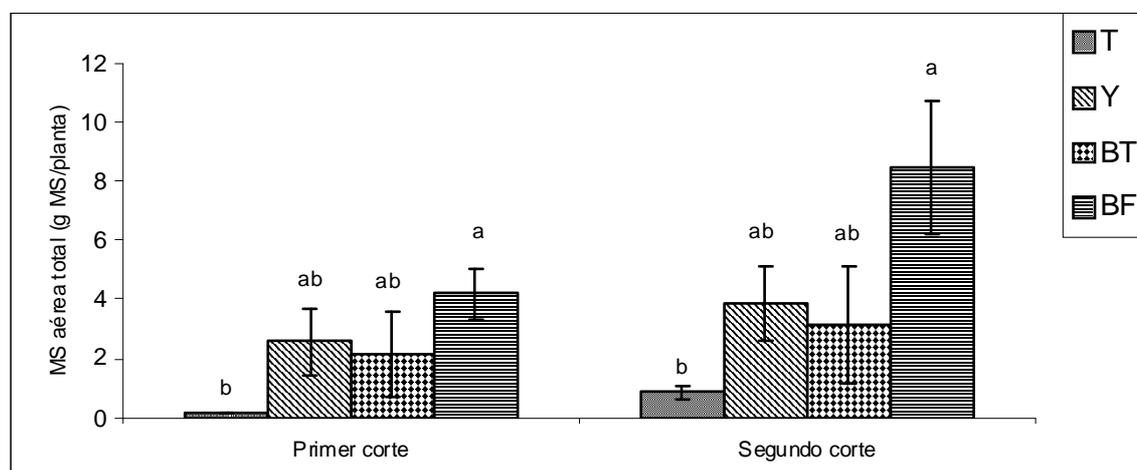


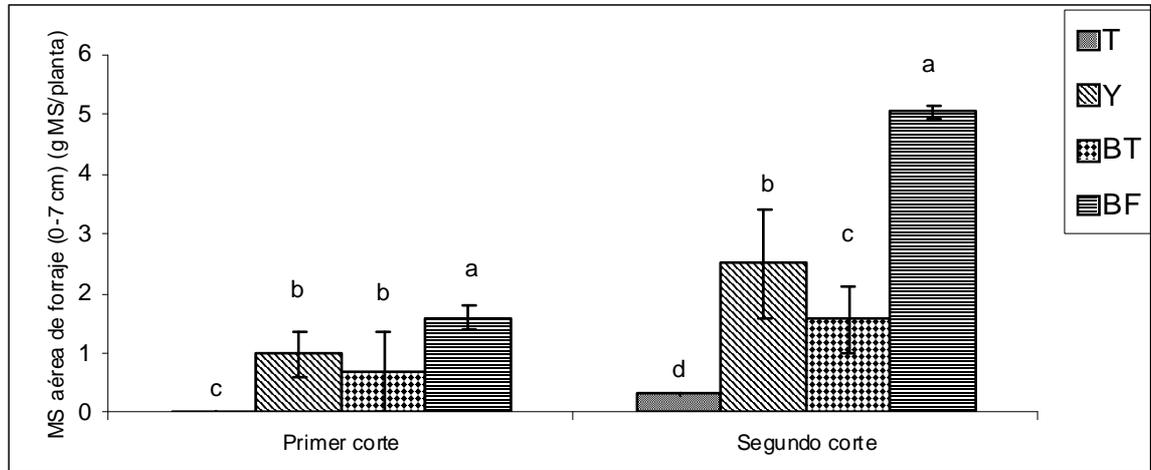
Figura 3.1. Materia seca aérea total de forraje al primer y segundo corte (g MS/planta). MS=Materia Seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

El segundo corte se realizó a los 55 días de efectuado el primero (primer rebrote). La biomasa aérea total de *T. ponticum* varió entre 8,47 g MS /planta (para el tratamiento BF) y 0,86 g MS /planta (para el tratamiento T) (Figura 3.1). De manera similar a lo ocurrido en el primer corte, sólo BF se diferenció estadísticamente de T ($p < 0.10$), produciendo casi 10 veces más biomasa aérea total, aunque la producción de MS de BF no se diferenció de la producida por las restantes enmiendas ($p > 0,10$).

Al primer corte, la distribución vertical de la biomasa total fue diferente según la enmienda considerada (Fig. 3.2), y mayor que el T ($p < 0,1$). En el estrato de 0 a 7 cm (Fig. 3.2 a), la biomasa acumulada en el tratamiento BF más que duplicó al tratamiento BT y fue 60% mayor que con la aplicación de Y. En el estrato mayor a 7 cm (Figura 3.2 b), la aplicación de enmiendas incrementó la biomasa acumulada, pero sin diferenciarse entre sí ($p > 0,1$). Este estrato con respecto a la biomasa aérea total, representó el 68% en

BF, el 61% en BT e Y, mientras que en T fue del 94%. Los tratamientos BT e Y presentaron los mayores coeficientes de variabilidad.

(a)



(b)

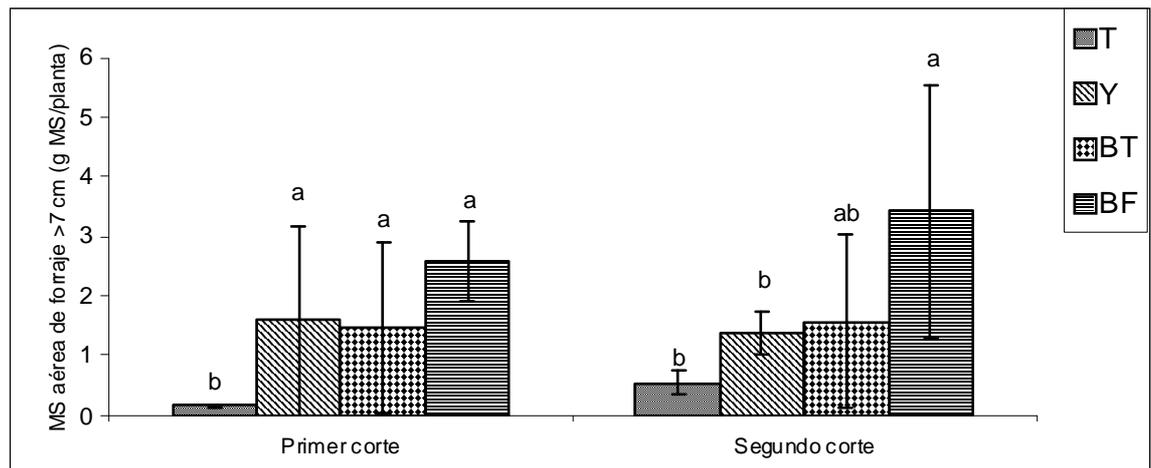


Figura 3.2. Materia seca aérea de forraje (0-7 cm y > 7 cm) al primer y segundo corte.

(a) Materia seca aérea de forraje (0-7 cm) (g MS/planta). (b) Materia seca aérea de forraje > 7 cm (g MS/planta). MS=Materia Seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

De manera similar a lo ocurrido en el primer corte, al segundo corte (primer rebrote) la distribución vertical de la biomasa aérea total fue diferente según la enmienda considerada (Fig. 3.2). En el estrato de 0 a 7 cm (Fig. 3.2 a), en general se comprobó una menor desviación estándar de las medias en todos los tratamientos en comparación con las registradas en la variable biomasa aérea mayor a 7 cm (Fig. 3.2 b). En el estrato 0 a 7 cm (Fig. 3.2 a), la biomasa cosechada fue diferente en todos los tratamientos probados ($p < 0,10$), siendo el tratamiento BF mayor (5.04 g MS/planta) y T el menor (0.32 g MS/planta). En el estrato mayor a 7 cm (Fig. 3.2 b), a diferencia de lo hallado al primer corte, en donde todas las enmiendas superaron a T en la biomasa producida, en el segundo corte sólo la enmienda BF (3.43 g MS/planta) superó al T (0.54 g MS/planta). Además, BT, Y y T no se diferenciaron entre sí ($p > 0,1$).

El tamaño de las hojas (evaluado a través de la longitud de láminas y vainas) al primer corte, estuvo asociada positivamente con la aplicación de enmiendas (Fig. 3.3 a y b), y superaron en más del 50% a las producidas en el tratamiento T. Todas las enmiendas se diferenciaron de T ($p<0,1$), produciendo láminas y vainas de mayor longitud, aunque las enmiendas no se diferenciaron entre sí ($p>0,1$).

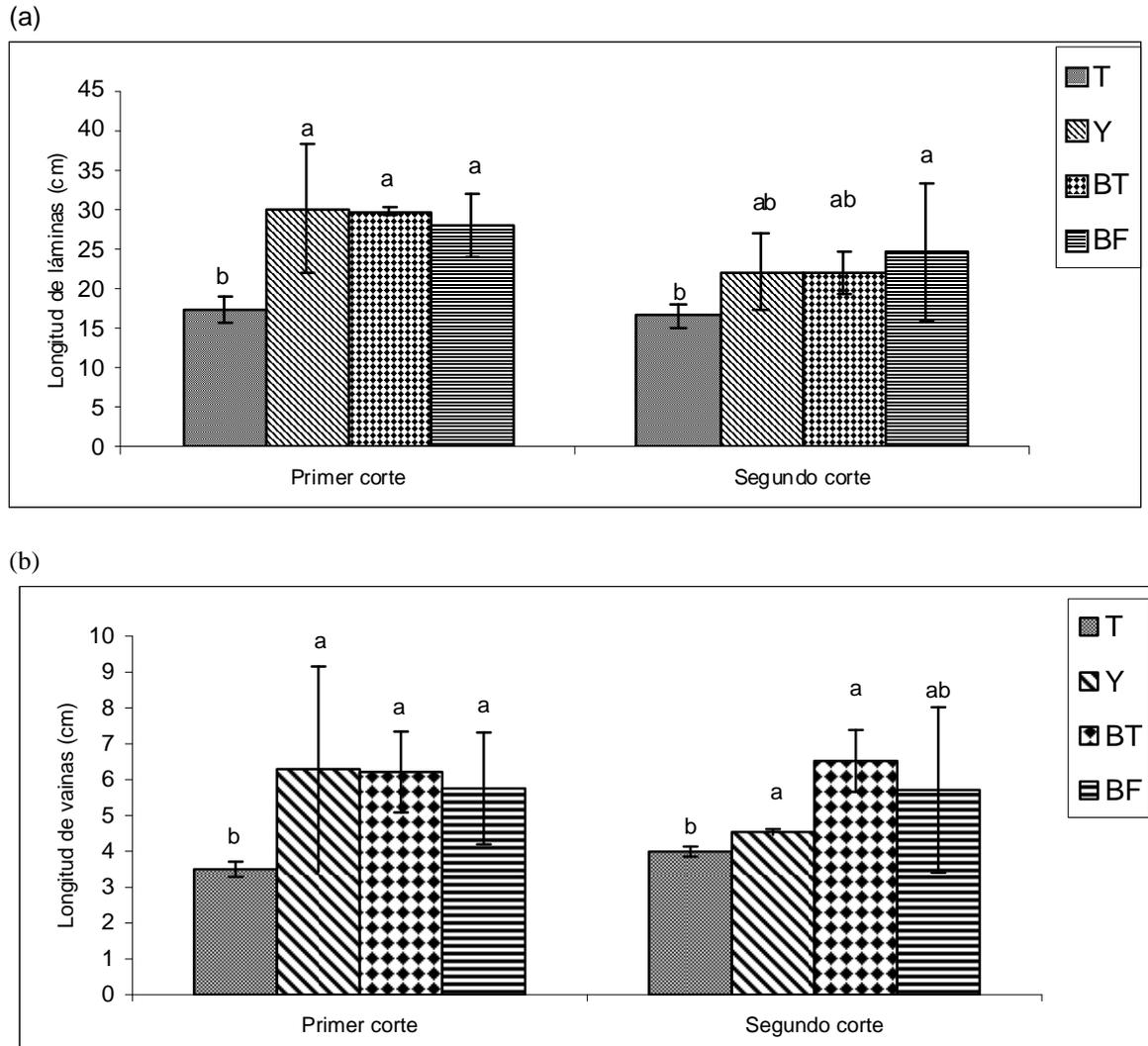


Figura 3.3. Longitud de láminas y longitud de vainas al primer y segundo corte.

(a) Longitud de láminas (cm). (b) Longitud de vainas (cm). BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,10$).

En el segundo corte sólo en BF se registraron láminas de mayor longitud que el T ($p<0,10$) (Fig. 3.3 a), y no hubo diferencias entre la longitud de láminas de BT, Y y T. A diferencia de lo hallado en la variable longitud de laminas, la longitud de vainas (Fig. 3.3 b) producida por las enmiendas BT y Y superaron al T, en cambio los BF no lograron incrementar la longitud de vainas con respecto a T ($p<0,10$).

La aplicación de enmiendas promovió el macollaje de *T. ponticum* al primer corte, incrementando consistentemente el número de macollos por planta). En el primer corte todas las enmiendas probadas se diferenciaron de T ($p<0,1$) (Fig. 3.4). Las proporciones variaron entre 6 y 10 veces. Aunque sin diferenciarse entre sí, las aplicaciones de Y y BF incrementaron el número de macollos en mayor magnitud que BT. Al segundo corte, sólo las enmiendas BF y Y produjeron mayor número de macollos que T (45 y 36 vs 11, respectivamente) ($p<0,10$) (Fig. 3.4).

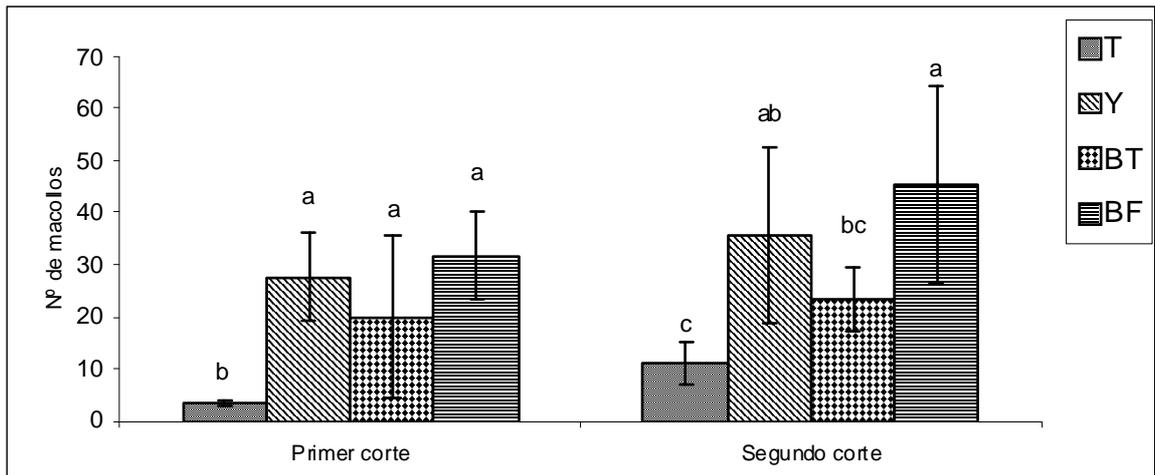


Figura 3.4. Número de macollos por planta al primer y segundo corte. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,10$).

La biomasa por macollo en el primer corte varió entre 198.1 mg MS (para el tratamiento BF) y 90.58 mg MS (para el tratamiento T) ($p<0,10$) y BT y Y mostraron valores intermedios (Fig. 3.5). En el segundo corte, el peso de estos macollos más que duplicó al de T (Fig. 3.5). La biomasa por macollo varió entre 134,5 mg MS/planta (para el tratamiento BF) y 46,6 mg MS/planta (para el tratamiento T). Sin embargo, solamente BF incrementó significativamente la biomasa por macollo (Fig. 3.5) con respecto a T ($p<0,1$), y no se diferenció de BT y Y, los cuales tampoco se diferenciaron de T.

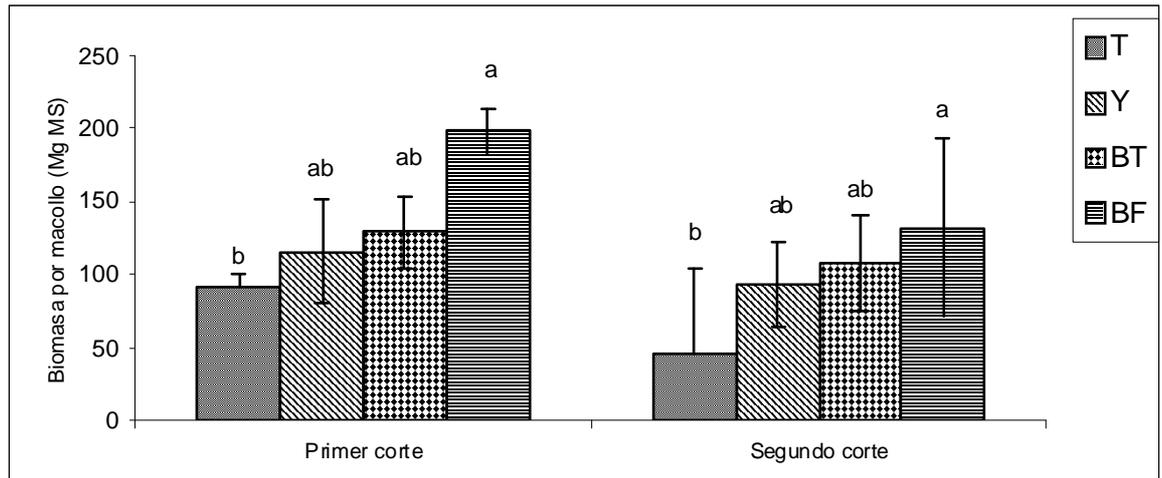


Figura. 3.5. Biomasa por macollo al primer y segundo corte (mg MS). MS= Materia seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

3.1.2. Biomasa radical

Las enmiendas probadas afectaron positivamente el desarrollo radical de *T. ponticum*. La biomasa radical total al primer corte (Fig. 3.6) varió entre 7,45 g MS raíz/planta (para el tratamiento BF) y 0,12 g MS raíz/planta (para el tratamiento T). Sin embargo, la elevada variabilidad de los datos indicó que sólo BF y Y lo hicieran significativamente ($p < 0,1$). La mayor producción de raíces se obtuvo con BF. Si bien BT produjo en promedio una mayor producción de raíces que T (2,73 vs 0,12 g MS raíz/planta), no se diferenció estadísticamente ($p > 0,1$).

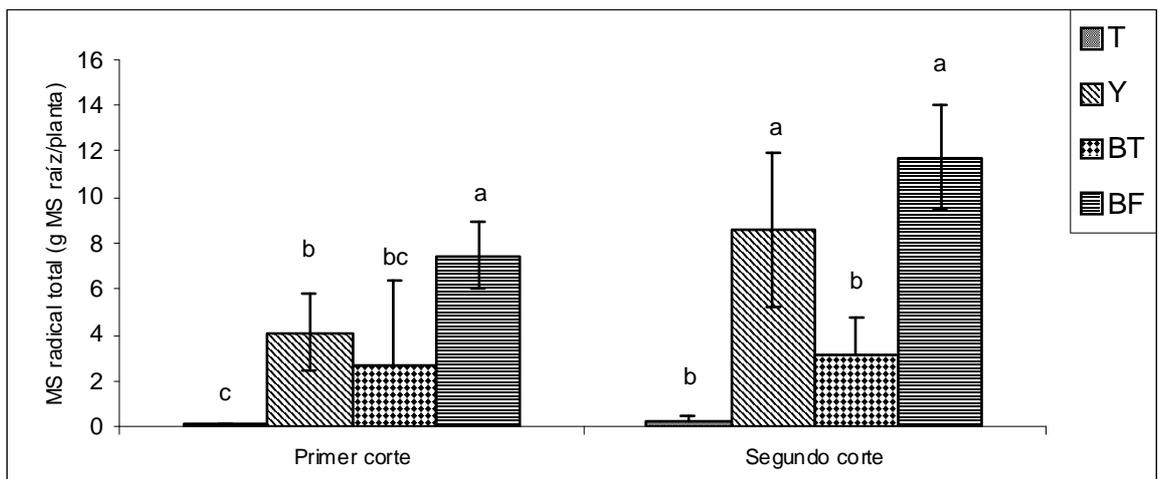


Figura. 3.6. Materia seca radical total al primer y segundo corte (g MS raíz/planta). MS=Materia Seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada corte indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

A los 55 días del primer corte, la biomasa radical total (expresada en g MS raíz/planta) varió entre 11.73 (para el tratamiento BF) y 0.26 (para el tratamiento T) (Fig. 3.6). Sólo BF y Y incrementaron el desarrollo radical ($p < 0,1$) aunque no se diferenciaron entre sí. Estos resultados indican que el incremento de biomasa radical entre cortes (primer rebrote) fue de 60% para BF y T, 100% para Y y de sólo 20% para BT.

La distribución de raíces por estratos fue diferente según la enmienda aplicada (Fig. 3.7). Hasta el primer corte, las plantas ubicaron alrededor del 40% de sus raíces en los 10 primeros cm de profundidad y ocuparon los tres estratos considerados. Las raíces del T sólo exploraron el primer estrato y su desarrollo fue mínimo. BF siempre presentó mayor desarrollo radical en todas las profundidades con respecto a BT ($p < 0,1$). La distribución de BT y Y fue similar ($p > 0,1$).

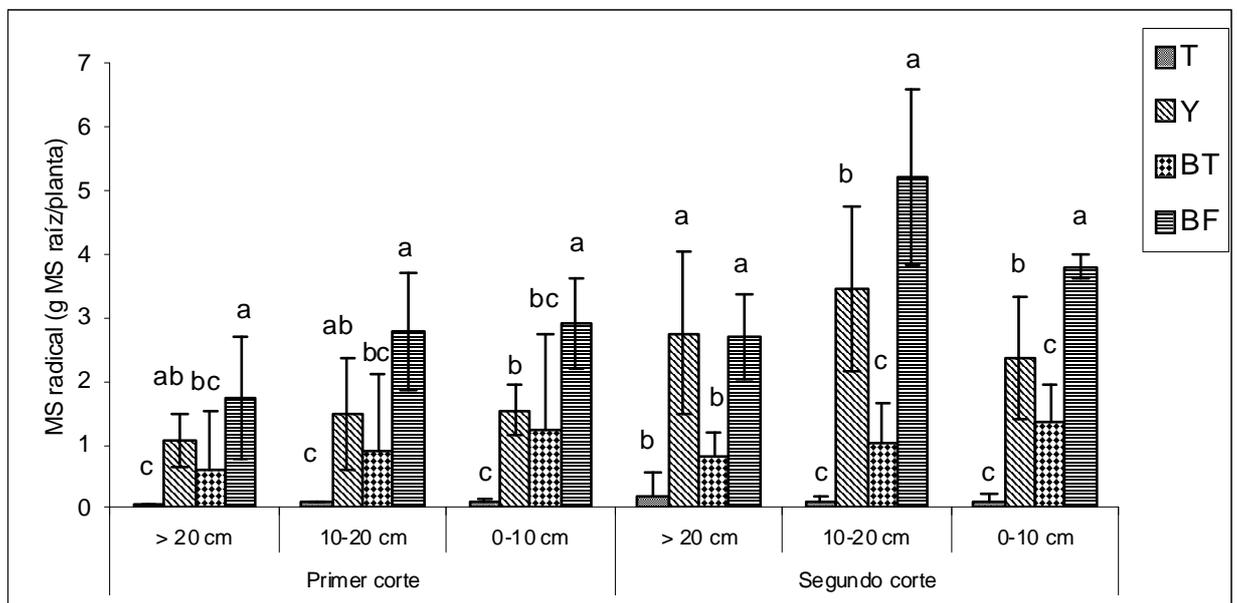


Figura. 3.7. Materia seca radical por estratos de profundidad (0-10cm, 10-20 cm y > 20 cm) al primer y segundo corte (g MS raíz/planta). MS=Materia Seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas dentro de cada estrato de profundidad indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

La distribución de raíces no varió entre cortes (0-10 cm, 10-20 cm y más de 20 cm, Fig. 3.7), excepto el tratamiento T, que exploró los tres estratos, aunque su desarrollo fue mínimo y ubicó el 60% de la biomasa en los 10 primeros cm de profundidad. Al segundo corte BF y Y superaron la biomasa radical producida por T en los tres estratos evaluados ($p < 0,10$), en tanto que BT no se diferenció de T ($p > 0,1$).

3.1.3. Relaciones biomasa aérea/biomasa radical y biomasa aérea/biomasa total

Al primer corte la aplicación de enmiendas redujo la BA:BR (Tabla 3.1), aunque no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos impuestos ($p > 0,1$). T exhibió la mayor partición al componente aéreo (la duplicó). Es de destacar que BF

presentó mayor biomasa aérea y radical, mayor número de macollos y más grandes, y no modificó la partición aéreo radical. Con respecto a BA:BT, solamente hubieron diferencias entre BF y T ($p < 0.10$). El tratamiento T destinó casi el 60% al desarrollo de biomasa aérea (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Relaciones entre biomasa aérea, radical y total al primer y segundo corte. BA:BR=Relación biomasa aérea/biomasa radical. BA:BT=Relación biomasa aérea/biomasa total. MS= Materia seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo.

Corte	Tratamientos	BA: BR (g MS/g MS)	BA: BT (mg MS/mg MS)
Primer corte	BF	0,56 a	0,36 b
	BT	0,79 a	0,44 ab
	Y	0,63 a	0,39 ab
	T	1,33 a	0,57 a
Segundo corte	BF	0,73 b	0,41 bc
	BT	1,04 b	0,49 b
	Y	0,50 b	0,32 c
	T	5,38 a	0,79 a

Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos por corte ($p < 0,1$).

En el segundo corte la aplicación de enmiendas redujo la BA:BR (Tabla 3.1), aunque no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre las enmiendas ($p < 0,1$). T, a diferencia de lo hallado al primer corte, se diferenció estadísticamente de las enmiendas evaluadas ($p < 0.10$), exhibiendo la mayor partición de fotoasimilados al componente aéreo.

Con respecto a la relación BA:BT, se comprobó que T destinó el mayor porcentaje de fotoasimilados al desarrollo de biomasa aérea (casi el 80 %), diferenciándose estadísticamente del resto de las enmiendas ($p < 0.10$) (Tabla 3.1).

3.1.4. Biomasa aérea acumulada

La biomasa aérea acumulada sobre los 7 cm en los dos cortes realizados (Fig. 3.8), mostró una tendencia similar a lo obtenido en el segundo corte, sólo BF acumuló más biomasa que Y y T ($p < 0,1$). Por otra parte, BT no se diferenció de BF ni de Y y T.

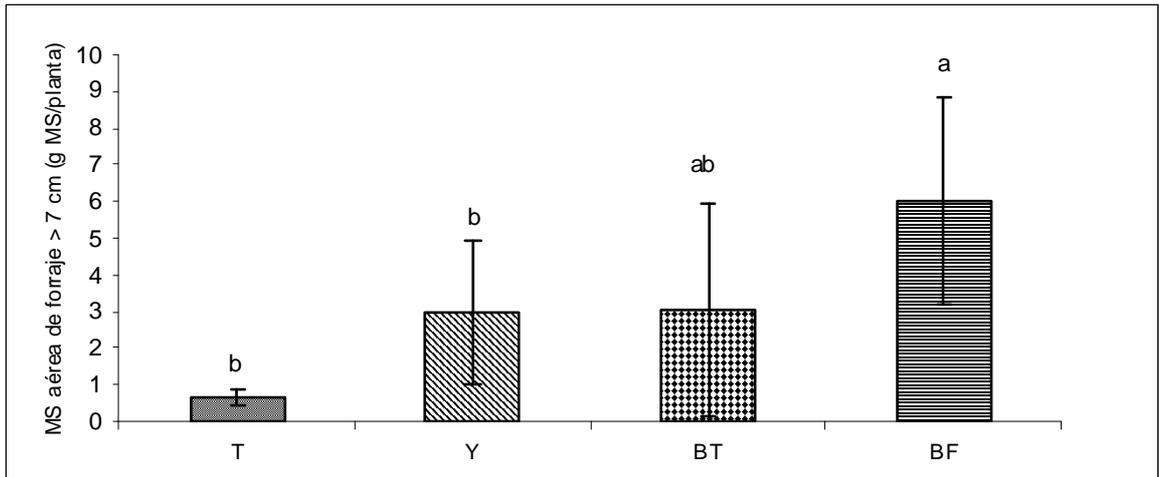


Figura 3.8. Materia seca aérea de forraje (> 7 cm) acumulada en los dos cortes (g MS/planta). MS=Materia Seca. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. Las barras de error indican el desvío estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$).

3.1.5. Concentración de minerales en la MS aérea y radical

La concentración de minerales (Calcio, Sodio, Fósforo, Magnesio y Potasio) se determinó sobre la biomasa aérea y radical por separado (Tabla 3.2). La concentración de Ca^{++} en la MS aérea fue mayor con la aplicación de Y y en T, aunque T no se diferenció de BF y BT. La acumulación de Na^+ fue mayor en T y en BT y menor en BF y en Y. Las enmiendas probadas redujeron la concentración de P de las plantas respecto de T. Las concentraciones de Mg^{++} y K^+ mostraron un patrón similar, siendo mayores en BF y en T.

Tabla 3.2. Concentración de minerales en la MS aérea y radical de *T. ponticum* al segundo corte (%). MS= materia seca. Trat.=Tratamientos. BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=Yeso; T=Testigo. nd= no determinado.

MS	Trat.	Ca^{++}	Na^+	Mg^{++}	K^+	$H_2PO_4^-$
Aérea	BF	0,29 ± 0,01 b	0,93 ± 0,22 bc	0,21 ± 0,02 a	2,41 ± 0,01 a	0,30 ± 0,03 b
	BT	0,27 ± 0,02 b	1,26 ± 0,11 ab	0,18 ± 0,01 b	2,05 ± 0,26 b	0,31 ± 0,01 b
	Y	0,47 ± 0,03 a	0,66 ± 0,15 c	0,16 ± 0,04 b	2,08 ± 0,34 ab	0,29 ± 0,03 b
	T	0,38 ± 0,09 ab	1,66 ± 0,53 a	0,19 ± 0,01 ab	2,16 ± 0,19 ab	0,39 ± 0,05 a
Radical	BF	0,58 ± 0,29 a	1,35 ± 0,23 c	0,29 ± 0,01 a	0,95 ± 0,23 c	nd
	BT	0,28 ± 0,02 b	1,86 ± 0,03 b	0,20 ± 0,03 bc	1,26 ± 0,03 b	nd
	Y	0,55 ± 0,17 a	0,89 ± 0,03 d	0,20 ± 0,04 b	0,91 ± 0,10 c	nd
	T	0,17 ± 0,02 b	3,38 ± 0,02 a	0,16 ± 0,03 c	1,91 ± 0,10 a	nd

Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos por corte ($p < 0,1$).

En la MS radical la concentración de Ca^{++} fue notablemente mayor en BF y en Y, superando en dos veces a BT y en tres veces a T. La concentración de Na^+ fue marcadamente más elevada en T, siendo el doble o mayor que BF y BT y cuatro veces mayor que Y. La concentración de Mg^{++} fue menor en T y la de K^+ se redujo con las enmiendas aplicadas, siendo menor en BF y en Y.

3.2. Experimento a campo

3.2.1. Efecto de los tratamientos sobre las propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo evaluadas no variaron entre tratamientos para las diferentes profundidades y época del año. Se registró una elevada variabilidad en las medias ajustadas para las propiedades químicas de suelo para todos los tratamientos probados, lo cual indica una gran heterogeneidad espacial en las propiedades químicas evaluadas (Tabla 3.3). Se estima que esta elevada variabilidad en las medias ajustadas fue el principal factor que impidió encontrar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Por ello, las enmiendas no tuvieron efecto en ninguna de las propiedades químicas del suelo. A manera de ejemplo, puede observarse que, pese a que en valores absolutos el tratamiento Y presentó un valor un 20% más bajo de sodio intercambiable ($3,89 \pm 1,03 \text{ cmol Kg}^{-1}$) con respecto a los restantes tratamientos, esta diferencia no pudo ser detectada por su alto coeficiente de variación (27%).

Tabla 3.3. Valores promedio (para las dos profundidades evaluadas y los dos meses de muestreo) de las propiedades químicas de suelo para cada tratamiento, con y sin cobertura vegetal.

Propiedad química	Cobertura vegetal	Tratamientos			
		BF	BT	Y	T
C.E (dS m ⁻¹)	C/C	3,34 ± 0,82	4,18 ± 1,84	4,42 ± 1,23	4,23 ± 2,01
	S/C	3,86 ± 1,29	4,43 ± 1,40	6,99 ± 1,61	4,96 ± 1,37
Na interc. (cmol Kg ⁻¹)	C/C	3,83 ± 0,30	4,24 ± 0,82	3,18 ± 0,57	4,31 ± 1,25
	S/C	4,39 ± 0,74	4,73 ± 0,99	4,61 ± 0,88	4,86 ± 1,07
PSI (%)	C/C	28,80 ± 8,51	37,04 ± 11,92	22,77 ± 6,68	33,63 ± 14,51
	S/C	30,24 ± 7,33	28,59 ± 5,25	39,85 ± 16,18	41,03 ± 19,27
Magnesio (cmol Kg ⁻¹)	C/C	1,33 ± 0,22	1,42 ± 0,57	0,85 ± 0,16	1,48 ± 0,52
	S/C	1,20 ± 0,42	0,97 ± 0,38	1,18 ± 0,37	1,28 ± 0,19
Fósforo (mg Kg ⁻¹)	C/C	25,59 ± 4,36	22,03 ± 3,77	21,13 ± 3,01	22,09 ± 3,65
	S/C	26,36 ± 4,88	21,67 ± 4,89	21,43 ± 2,98	22,43 ± 3,42
pH	C/C	9,04 ± 0,09	9,20 ± 0,07	8,19 ± 0,12	9,18 ± 0,08
	S/C	9,00 ± 0,09	9,11 ± 0,09	8,57 ± 0,06	9,16 ± 0,04

BF=Biosólidos de Feedlot; BT=Efluentes de Tambo; Y=yeso; T=testigo; CE=Conductividad Eléctrica; Na interc.=Sodio intercambiable; PSI=Porcentaje de Sodio Intercambiable; Mg=Magnesio; P=Fósforo; C/C=con cobertura; S/C=sin cobertura.

La elección del área experimental se había realizado teniendo en cuenta la homogeneidad en cuanto a cobertura vegetal. Sin embargo, la implantación posterior de los cultivos de cobertura (*H. vulgare L.* y *S. sudanense*) reveló la existencia de una alta

variabilidad entre unidades experimentales, expresada como porcentaje de individuos logrados para cada cultivo y unidad experimental (Tabla 3.4), y grados de desarrollo de los individuos dentro de las unidades experimentales (Imagen 3.1).

Tabla 3.4. Porcentaje de individuos logrados en cada una de las unidades experimentales, por cultivo y para cada tratamiento: T=testigo; Y=Yeso; BT=Efluentes de Tambo; BF=Biosólidos de Feedlot.

Tratamientos	Especie	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3
T	<i>Sorghum sudanense</i> .	85	60	10
	<i>Hordeum vulgare L.</i>	95	50	10
Y	<i>Sorghum sudanense</i>	100	70	40
	<i>Hordeum vulgare L.</i>	100	45	50
BT	<i>Sorghum sudanense</i>	80	20	100
	<i>Hordeum vulgare L.</i>	75	20	85
BF	<i>Sorghum sudanense</i>	95	95	40
	<i>Hordeum vulgare L.</i>	95	95	35

La heterogeneidad observada de individuos logrados de cebada y posteriormente de sorgo fueron hechos inesperados. La combinación de las enmiendas aplicadas con la escasez de precipitaciones posiblemente contribuyó en esta oportunidad. Para verificar cuál/es variables de suelo se asociaban con la cobertura del cultivo de sorgo se realizó un análisis de regresión.

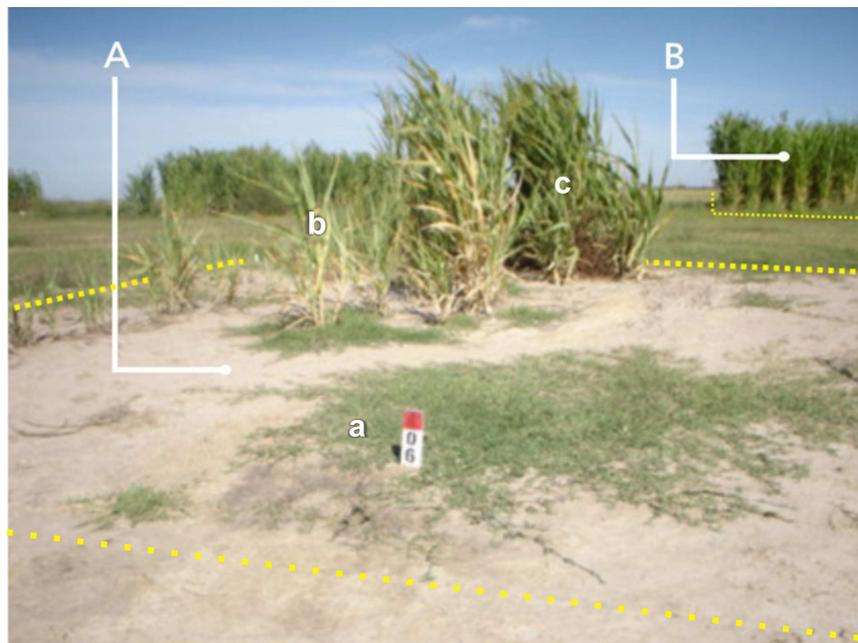


Imagen 3.1. A. Unidad experimental con sectores sin logro de individuos (a), con individuos de mediano desarrollo (b) y con individuos de gran desarrollo (c). B. Unidad experimental con 100% de individuos logrados, todos ellos de gran desarrollo.

Estos resultados sugirieron la existencia de diferencias a nivel de los perfiles de los suelos, como causantes de la diferente respuesta en cobertura, independientemente de los tratamientos impuestos. Esta presunción condujo a realizar un *muestreo de suelo*

sectorizado en el cultivo de *S. sudanense* (metodología descrita en el punto 2.3.7), con el objetivo de encontrar variables de suelo que permitieran explicar la variabilidad en logro y grado de desarrollo de individuos.

Se obtuvo un modelo con un coeficiente de determinación moderado ($r^2 = 0.496$) en el cual la producción de MS de *S. sudanense* se explicó por las variables independientes PSI y Espesor del horizonte A. En esta relación, el aumento del PSI tuvo una relación negativa con la producción de MS y el incremento del Espesor del horizonte A se relacionó positivamente con la producción de MS. De la variación explicada por el modelo, el PSI tuvo una contribución del 35% (Coeficiente de determinación parcial: 0.3517), mientras que el Espesor del horizonte A explicó un 14% (Coeficiente de determinación parcial: 0.1452).

La ecuación de predicción encontrada fue:

$$\text{MSs} = 2458.02 - 118.18 \text{ PSI} + 307.6 \text{ Esp. A}$$
$$R^2 = 0.496$$

donde:

MSs: Materia seca de *S. sudanense* (Kg ha^{-1})

PSI: Porcentaje de sodio intercambiable

Esp. A: Espesor del horizonte A (cm)

Estos resultados prueban la importancia de definir estas dos variables (PSI y espesor del A) para caracterizar el ambiente y realizar comparaciones en ambientes equivalentes.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN

4.1. Experimento en invernáculo

La aplicación de BF, BT y Y mejoraron las variables estructurales y funcionales de *T. ponticum*, verificando la hipótesis puesta a prueba en este capítulo de la tesis, ya que incrementaron la productividad primaria neta de *T. ponticum*. Ésta es una gramínea templada perenne de regular valor forrajero, pero valiosa especialmente en suelos salino-sódicos (Maddaloni y Ferrari, 2001), que ha sido considerada como una alternativa de recuperación de las propiedades químicas de suelos sódicos, como se define a la *Fitoremediación* o *Biorremediación con especies vegetales*, basada en los cambios generados en el suelo a través del crecimiento de especies vegetales tolerantes a condiciones de salinidad y sodicidad (Molina, 1969; Mazzanti et al., 1992; Zamolinski, 2001). Otro mecanismo asociado al efecto anterior consiste en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo (estructura) como resultado del crecimiento y actividad radical.

La aplicación de enmiendas orgánicas (BF y BT) tuvieron un efecto diferencial sobre las variables aéreas y radicales de *T. ponticum* evaluadas. Si bien las dosis aplicadas fueron iguales para los BT y BF (8000 Kg. de MS ha⁻¹), los BF tuvieron un mejor comportamiento, superando ampliamente al tratamiento sin enmiendas en casi la totalidad de las variables bajo estudio y en los dos cortes evaluados. Ejemplo de ello son los incrementos hallados de hasta 15 veces en la biomasa aérea y de 60 veces en la biomasa radical de *T. ponticum*, con respecto al tratamiento T. En cambio, los BT superaron al tratamiento sin enmiendas en todas las variables aéreas al primer corte pero, al segundo corte, los BT sólo superaron a T en las variables longitud de vainas y biomasa aérea comprendida entre los 0 y 7 cm.

Estas diferencias en la respuesta estructural y productiva entre los BF y BT podrían atribuirse a los distintos contenidos de MO presente en las enmiendas (715 g Kg⁻¹ para BF y 357 g Kg⁻¹ para BT) traduciéndose en una mayor aplicación de MO al suelo con la enmienda de feedlot, BF, que con la de tambo, BT (5.7 t. de MO ha⁻¹ vs. 2.8 t. de MO ha⁻¹, respectivamente). La aplicación de sólo 2.8 t. de MO ha⁻¹ con los BT, podría haber sido la causa de su baja efectividad, ya que varios trabajos encuentran respuestas positivas a la aplicación de MO (More, 1994; Wahid et al., 1998; García-Orenes et al., 2005; Tejada et al., 2006; Gill et al., 2009). En todos ellos, las dosis aplicadas fueron superiores a las 5 t de MO ha⁻¹, y lograron incrementar en tres veces la biomasa de raíces, el área foliar y el rendimiento en grano de plantas individuales, encontrando también incrementos de más del 50 % en el número de hojas por planta de trigo. En similar nivel de importancia deben considerarse además, los valores elevados de pH (9,1), CE (52) y sodio (90) de BT, que determinaron una menor respuesta al momento del primer corte, a los 214 días desde la siembra. Las variables registradas a los 269 días desde la siembra (primer rebrote) mostraron menor respuesta en el crecimiento aéreo y radical de las plantas. Estos resultados demuestran la existencia de efectos residuales negativos por la aplicación de BT, atribuibles a sus características constitutivas que probablemente limitaron la efectividad de la rehabilitación del suelo Natracuol bajo estudio.

Los incrementos hallados en el crecimiento derivados de la aplicación de MO fresca (More, 1994; Wahid et al., 1998; García-Orenes et al., 2005; Tejada et al., 2006; Gill et al., 2009) pueden atribuirse a que su descomposición provee una fuente de

nutrientes disponibles, especialmente nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y micronutrientes, los cuales mejoran el status nutricional de las plantas que crecen bajo condiciones de salinidad (Qadir et al., 2001). Teniendo en cuenta que la solubilidad del fósforo en suelos salinos es muy baja, la provisión de fósforo por la MO podría incrementar los niveles de fósforo en los tejidos vegetales, con la consecuente estimulación del crecimiento (Grattan y Grieve, 1992). Además, el aporte de nitrógeno (como nitratos) a suelos salinos, incrementa el crecimiento de los cultivos, al disminuir la absorción y acumulación en los tejidos de iones tóxicos como los cloruros (Grattan y Grieve, 1999). Por otro lado, la MO incrementa la actividad biológica del suelo, deprimida por el exceso de sales (Rao y Pathak, 1996). La adición de MO, incrementa la actividad de enzimas del suelo como ureasas y fosfatasas las cuales incrementan la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo para las plantas, estimulando la producción de biomasa aérea y radical (Liang et al., 2003; Clark et al., 2007). No debe descartarse además un efecto acidificante, por la liberación de dióxido de carbono por la mayor actividad microbiana (Stewart et al., 2000).

La aplicación de Y también fue eficaz en incrementar el crecimiento radical y aéreo de *T. ponticum*, ya que la biomasa radical total se incrementó en más de 30 veces con respecto al tratamiento T en los dos cortes evaluados. Además, la biomasa aérea (>7 cm) superó al tratamiento T en más de 10 veces al primer corte. Coincidentemente con lo hallado, se ha comprobado que la aplicación de yeso produce mejoras en la implantación de los cultivos e incrementa el crecimiento y la profundización de las raíces (Carter y Pearen, 1986; Bajwa y Josan, 1989). Ello se debe a que la suficiencia de calcio soluble en suelos salinos juega un rol esencial en la preservación de la integridad estructural y funcional de las membranas celulares, estabilizando las estructuras de las paredes celulares, regulando la selectividad de iones y su transporte, y controlando el intercambio iónico como así también la actividad enzimática de las paredes celulares (Marschner, 1995). Además, el aporte de calcio soluble, podría incrementar la selectividad de absorción de iones potasio sobre iones sodio en los vegetales, disminuyendo los efectos tóxicos derivados de la absorción y acumulación en los tejidos de iones sodio y cloruros (Munns, 1993).

El crecimiento de la hoja es una de las principales variables que se reducen bajo estrés salino, este efecto es similar al producido por el estrés hídrico (Munns y Tester, 2008). Por otra parte, en gramíneas, el macollaje se reduce bajo estrés salino, y este es un componente importante de la acumulación de biomasa (Maas et al, 1994), que define la persistencia de las plantas en especies perennes. El crecimiento de las hojas y la capacidad de macollaje de *T. ponticum* fueron mejoradas con la aplicación de enmiendas. Sin embargo, si bien BT se destacó del testigo, no mostró crecimiento entre los dos cortes, esto podría deberse a las características del biosólido que presentaba elevados valores de pH y contenido de sodio, ya comentados. El número de macollos, en estados tempranos de crecimiento, es una variable que se propone como criterio de selección indirecta para el mejoramiento genético de la tolerancia a salinidad de *Elymus scabrifolius* (agropiro criollo) (Zabala et al, 2011). La asociación entre tolerancia a salinidad y macollaje ya había sido estudiada en otras gramíneas forrajeras templadas como *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne* y *Festuca rubra* (Ashraf et al, 1986) y en cultivos como arroz, cebada y trigo (en Zabala et al, 2011).

Estas respuestas morfológicas y productivas de *T. ponticum* a las enmiendas biológicas y químicas probadas se asociaron parcialmente con el contenido de minerales de los tejidos aéreo y radical. Los resultados hallados muestran que, si bien el aporte de nutrientes disponibles al suelo con el agregado de BT podrían haber generado un incremento en el crecimiento de *T. ponticum*, los elevados contenidos de sodio de esta

enmienda podrían haber provocado un aumento aún mayor en la concentración de sodio soluble del suelo, con el consiguiente incremento en la absorción y acumulación en los tejidos de este mineral, imponiendo limitaciones al crecimiento aéreo y radical de *T. ponticum*. Las reducciones del crecimiento ocurren como resultado de un acortamiento del tiempo de vida de las hojas, resultando en una reducción de la productividad neta (Munns, 2002). La elevada concentración de Na hallada en la MS aérea y principalmente en raíces de BT sería otra prueba del efecto nocivo de la aplicación de este tipo de efluentes a suelos que ya poseen un nivel importante de Na intercambiable.

Las mejoras en las variables aéreas y radicales de *T. ponticum* halladas con la aplicación de Y, podrían deberse a una mayor disponibilidad, absorción y acumulación de calcio en los tejidos. La suficiencia de calcio soluble en suelos salinos es importante para preservar la estructura y la funcionalidad de las membranas celulares y para regular la selectividad de iones y su transporte (Marschner, 1995).

Se ha demostrado que la aplicación de materia orgánica a suelos salinos incrementa el crecimiento de plantas que crecen bajo condiciones de salinidad (Wahid et al., 1998; Gill et al., 2009). Estos incrementos en el crecimiento aéreo podrían asociarse a una mayor disponibilidad y concentración en los tejidos de iones potasio y fósforo (Walker y Bernal, 2008). Sin embargo, si bien la aplicación de BF en este trabajo incrementó la MS aérea y radical de *T. ponticum*, no se ha podido establecer una relación clara entre incrementos de MS (aérea y radical) y la concentración en los tejidos de iones potasio y fósforo (Tabla 2.6 y Tabla 2.7). Por otro lado, se han registrado menores acumulaciones de sodio en los tejidos aéreos y radicales de *T. ponticum* con la aplicación de BF en comparación con T (Tabla 2.6 y tabla 2.7), lo que indicaría una menor toxicidad en sus tejidos y su relación con la mayor acumulación de MS aérea y radical.

4.2. Experimento a campo

La aplicación de enmiendas químicas y biológicas BT y BF no tuvo a campo efecto alguno sobre las propiedades químicas del suelo. Esta respuesta no coincide con la hipótesis formulada en este capítulo de la tesis, que planteaba que la aplicación de enmiendas químicas y biológicas (BT, BF y Y) generan cambios en las propiedades químicas en superficie. Esta falta de efecto contrasta con los resultados del experimento en invernáculo, y también con lo hallado por otros autores que comprobaron disminuciones de la sodicidad y la salinidad del suelo como resultado de la aplicación de diversas fuentes de materia orgánica (MO). Choudhary et al. (2004) y Yaduvanshi y Swarup (2005), comprobaron que la aplicación de MO proveniente de estiércol de corral, disminuyó el PSI y el pH del suelo e incrementó el rendimiento de los cultivos evaluados.

Se ha comprobado la eficacia de la MO en la lixiviación de sodio con la consecuente disminución del PSI o RAS del suelo, ya sea a campo o en laboratorio bajo columnas de lixiviación (Qadir et al., 2001; Jalali y Ranjbar, 2009). Estas disminuciones en la sodicidad del suelo fueron atribuidas a la capacidad de la MO aplicada de solubilizar el calcio proveniente del carbonato de calcio nativo y de otros minerales que poseen calcio (Choudhary et al., 2002). De esta manera, luego de ser intercambiado con el calcio, el sodio es lixiviado por el agua de irrigación junto con el exceso de sales solubles lográndose la recuperación. Además, las mejoras comprobadas en las

propiedades físicas derivadas de la aplicación de MO, como la estabilidad estructural del suelo y las tasas de infiltración (Lax et al., 1994; Qadir et al., 2001) incrementan la lixiviación de sodio y sales con la consecuente disminución de la CE y del PSI.

Un denominador común a los trabajos anteriormente citados que muestran resultados positivos es la aplicación de riego, condición que permite la lixiviación del sodio intercambiado por el calcio y el exceso de sales solubles, lográndose de esta manera la recuperación (Abrol et al., 1988). La ausencia de riego en el estudio de campo pudo haber sido el factor que impidió la lixiviación del sodio intercambiado y el exceso de sales solubles, limitando así las posibilidades de recuperación. En el presente ensayo, la alternativa del riego fue descartada debido a la mala calidad y la poca disponibilidad de agua para dicho fin. Por otra parte, no hubiera tenido ninguna aplicabilidad real en el sistema productivo basado en ganadería en pastoreo.

Tecnológicamente, esta limitante podría sortearse anticipando la aplicación de enmiendas al momento de mayor probabilidad de lluvias. En el caso particular del presente estudio, las lluvias ocurridas durante el período experimental fueron escasas, siendo los registros inferiores al promedio de los últimos 32 años (Tabla 2.4). En esta condición, las probabilidades de lixiviación de sodio y sales solubles, con la consecuente disminución de la sodicidad y salinidad del suelo, podrían haber resultado casi nulas. Estas condiciones ambientales extremas condicionaron los resultados obtenidos a campo en esta tesis.

La aplicación de Y es uno de los métodos más probados y difundidos para la recuperación de suelos sódicos (Chand et al., 1977; Ilyas et al., 1993; Ilyas et al., 1997; Qadir et al., 1996). Sin embargo, en este trabajo su aplicación a campo no fue efectiva en la disminución de la sodicidad del suelo. Pese a que en valores absolutos, la sodicidad del suelo fue menor con la aplicación de Y en comparación con T ($3,89 \pm 1,03$ vs. $4,58 \pm 1,52$ cmol Kg^{-1}), la ya comentada elevada variabilidad en profundidad del suelo no permitió encontrar diferencias estadísticas significativas. Como es sabido, cuando se aplica yeso deben acompañarse medidas de drenaje y a veces también la aplicación de riegos excesivos. Esto se debe a que el sodio reemplazado por el calcio proveniente del Y junto con el exceso de sales solubles, debe ser removido de la zona radical para lograr su recuperación (Abrol et al., 1988). De esta manera y de forma similar a lo que podría haber ocurrido con las enmiendas orgánicas, la falta de apertura de canales de drenaje y la aplicación de riego serían las causas por las cuales el Y no fue efectivo en la remediación de la sodicidad del suelo.

El análisis de regresión de las propiedades químicas con la MS del cultivo de *S. sudanense* reveló que un 49 % de la variabilidad de la producción de MS se explicó por el PSI del suelo y el Espesor del horizonte A. Del mismo modo, el PSI del suelo también fue una variable que explicó los rendimientos de caña de azúcar en un experimento llevado a cabo en Australia (Nelson y Ham 2000). Además, estos investigadores hallaron que el PSI y la salinidad del suelo explicaron un 79 % la variabilidad en los rendimientos, estando estas dos variables altamente correlacionadas.

La cobertura vegetal original de *C. dactylon*, era total y homogénea al inicio del experimento de campo, revelando que la variabilidad espacial de las propiedades químicas (PSI) y físicas (espesor del horizonte A) del suelo quedó enmascarada por la alta tolerancia de esta especie a dichas condiciones. Este trabajo demuestra la necesidad de cuantificar estas dos variables, ya que condicionan la expresión de los cultivos.

De los resultados del ensayo, se infiere la inconveniencia de laborear el suelo para implantar cultivos en esta región, dado el evidente riesgo de salinización superficial del suelo al producirse la decobertura superficial del suelo. El proceso se

atribuye al flujo ascendente de sales solubles desde el agua subterránea y el fondo del perfil salinizados (Lavado y Taboada, 1988).

Por consiguiente, otra conclusión importante que se desprende de este análisis es la necesidad de recurrir a cultivos perennes que impliquen una cobertura de suelo que evite la evaporación en momentos de déficit hídrico y el ascenso de sales desde horizontes más profundos.

CAPÍTULO 5. SUMARIO DE RESULTADOS, CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS AGRONÓMICAS

El objetivo principal de esta tesis fue investigar posibles estrategias de rehabilitación de suelos salino-sódicos, a través de la aplicación de enmiendas biológicas (BT, BF) y químicas (Y), y de la evaluación de sus efectos sobre las propiedades químicas de suelos Natracuoles y la producción de MS de gramíneas forrajeras adaptadas, en dos escalas de análisis diferentes: bajo condiciones controladas en invernáculo y a campo.

- *Sumario de resultados*

Los principales hallazgos de esta tesis fueron:

1- Todas las enmiendas probadas incrementaron el crecimiento aéreo y radical de *T. ponticum*, especie tolerante a condiciones salino-sódicas de suelo, bajo condiciones controladas (en invernáculo). Una mayor disponibilidad de nutrientes con los BF y un aporte de calcio soluble por el Y, podrían explicar la mejor performance en el crecimiento aéreo y radical de *T. ponticum* de estas dos enmiendas. Si bien los BT también aportaron nutrientes disponibles, los contenidos elevados de sodio podrían haber impuesto limitaciones al crecimiento aéreo y radical de *T. ponticum*.

Los resultados obtenidos mostraron una elevada variabilidad en las respuestas a los tratamientos evaluados en los dos cortes realizados y en el análisis de la biomasa aérea acumulada. Pese a esto, las enmiendas incrementaron el crecimiento aéreo y radical de *T. ponticum*, especie con mayor tolerancia a condiciones de salinidad y sodicidad que los cultivos de cobertura evaluados a campo. Coincidentemente con lo hallado en esta escala de trabajo, varios autores también han comprobado respuestas satisfactorias en el crecimiento aéreo y radical de otras especies, al evaluar adiciones de materia orgánica a suelos con problemas de salinidad y sodicidad (More, 1994; Wahid et al., 1998; García-Orenes et al., 2005). Estas respuestas se deberían a un aporte de nutrientes disponibles a partir de la descomposición de la materia orgánica, y al consecuente incremento de la actividad biológica del suelo (Grattan y Grieve, 1992; Qadir et al., 2001).

2- La evaluación de las enmiendas en el campo se realizó con el propósito de validar lo hallado bajo condiciones controladas. De este modo, la aplicación de estas enmiendas permitiría generar recomendaciones tecnológicas para mejorar los sistemas productivos de ganadería bajo pastoreo que se desarrollan sobre estos suelos. Sin embargo, la aplicación de las enmiendas a campo no tuvo efecto alguno sobre las propiedades químicas del suelo.

La principal causa fue la gran variabilidad en forma de “parches” en profundidad de suelo y en sodicidad, que no eran evidentes cuando se inició el ensayo. Por otra parte, el laboreo del suelo para implantar los cultivos generó decobertura del suelo y procesos de salinización superficial. Esta falta de efectividad de las enmiendas fue evidenciada por los elevados valores de desviación estándar que presentaron las medias de tratamientos para las propiedades químicas de suelo evaluadas (Tabla 3.3), lo que no

permitió encontrar diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Como consecuencia, los cultivos utilizados como cobertura (*H. vulgare L.* y *S. sudanense*) presentaron alta heterogeneidad en el logro y crecimiento de individuos.

La variabilidad edáfica fue explicada en un 49 % por la profundidad del horizonte A y el PSI del suelo, y determinó la presencia o no de cobertura vegetal. En los sectores de mayor profundidad del horizonte A, la cobertura lograda con el cultivo de Sorgo (*S. sudanense*) fue homogénea, con alta población de individuos y de gran producción de biomasa, no siendo así en los sectores de poca profundidad, en donde se comprobó una baja densidad de individuos con escasa acumulación de biomasa, hasta llegar al caso de la existencia de sectores sin logro de individuos.

3- El período seco ocurrido durante el transcurso del experimento a campo (Tabla 2.4), habría limitado la efectividad de las enmiendas en la recuperación de las propiedades químicas del suelo, sobre todo en la efectividad del Y en la reversión de la sodicidad del suelo. Ya varios autores habían comprobado la eficacia de la MO en la lixiviación de sodio con la consecuente disminución del PSI o RAS del suelo, ya sea a campo o en laboratorio bajo columnas de lixiviación (Qadir et al., 2001; Jalali y Ranjbar, 2009). Estas disminuciones en la sodicidad del suelo fueron atribuidas a la capacidad de la MO aplicada de solubilizar el calcio proveniente del carbonato de calcio nativo y de otros minerales que poseen calcio (Choudhary et al., 2002). De esta manera, luego de ser intercambiado con el calcio, el sodio es lixiviado por el agua de irrigación junto con el exceso de sales solubles lográndose la recuperación. Como fue comentado, la gran sequía registrada durante el período experimental podría haber limitado las posibilidades de recuperación.

4- Los efectos de los BT sobre la productividad de *T. ponticum* en invernáculo y su relación con las características constitutivas de esta enmienda (exceso de sodio y sales) no la harían apta para su aplicación a campo en suelos salino-sódicos. Por el contrario, se sugiere un manejo *in situ* (dentro del establecimiento) con acumulación en sitios de disposición final, con control de lixiviados y de gases, de tal forma que no presenten riesgos de contaminación del suelo y cursos de agua superficiales y subterráneos, hasta tanto no se genere información que demuestre su utilización segura.

- Conclusiones

Los principales aportes de esta tesis han sido la generación de información sobre el uso de enmiendas biológicas y químicas como estrategia de rehabilitación de suelos salino-sódicos y el mejoramiento de la productividad primaria de *T. ponticum*, en respuesta a dichas enmiendas. Si bien esta gramínea es una forrajera muy utilizada en la provincia en los suelos bajo estudio, hasta hoy no existían datos regionales del efecto de diferentes enmiendas biológicas y químicas sobre su rendimiento.

Los resultados sobre los cambios morfológicos de las plantas generados por las enmiendas probadas también son destacables ya que, no se contaba con antecedentes de *T. ponticum*. Además, los incrementos de la productividad primaria

neta derivados de la aplicación de todas las enmiendas, permitieron aceptar la hipótesis planteada en el capítulo 2 de esta tesis.

Si bien la aplicación de enmiendas biológicas y químicas (BT, BF y Y) no tuvieron a campo efecto alguno sobre las propiedades químicas del suelo, respuesta que condujo a rechazar la hipótesis planteada para este experimento, es de destacar la valoración de la información sobre la variación espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos salino-sódicos de la región y la importancia de su conocimiento cuando se evalúen oportunidades y posibilidades de mejoramiento, datos poco observados en la literatura.

Los resultados también permiten concluir que la decobertura del suelo por las labranzas para incorporar enmiendas y/o abonos fue la causa principal de salinización superficial del suelo, independientemente del tratamiento considerado.

- Implicancias agronómicas

Una cuestión de fondo que queda pendiente es analizar posibles escenarios en que las enmiendas puedan demostrar su efecto beneficioso también en el campo. De los factores condicionantes, hay uno de ellos que no se puede cambiar que es la variabilidad en “parches” de los suelos. Los factores restantes –el laboreo y decobertura superficial– son obviamente manejables. Si bien un tema pendiente es probar la efectividad de las enmiendas –en particular BF y Y– prescindiendo de la incorporación al suelo, resulta evidente la inconveniencia de laborear los suelos en estos ambientes con aguas subterráneas altamente salinizadas. Existe un riesgo muy alto de salinización superficial en épocas de elevada demanda atmosférica por evaporación, como las acaecidas durante el estudio.

De disponerse de BF y Y, la aplicación a campo puede ser también una práctica viable si se seleccionan especies forrajeras con alta tolerancia a condiciones de salinidad-sodicidad como *T. ponticum*. Además, la aplicación de Y podría disminuir la sodicidad del suelo, de presentarse buenas condiciones de precipitación.

Para el caso en que se decidan implantar especies con menor tolerancia a salinidad-sodicidad, como los cultivos anuales evaluados en este trabajo (Cebada forrajera y Sorgo para silaje), la cobertura vegetal será condicionada por la alta variabilidad edáfica, principalmente la profundidad del horizonte A y el PSI, lo que determinará áreas de mayor densidad de individuos y de alta acumulación de biomasa (buen espesor del horizonte A y bajos valores de PSI), áreas de baja densidad de individuos y de escaso desarrollo (altos valores de PSI y poca profundidad del horizonte A) y áreas sin logro de individuos (alto PSI con muy poca profundidad del horizonte A).

Los resultados conducen a no recomendar la labranza en estos suelos con napas freáticas salinas. Por el contrario, la preservación de la cobertura vegetal superficial con prácticas de interseembra o siembra directa de especies forrajeras perennes tolerantes a condiciones salino-sódicas de suelo, puede ser la mejor práctica a recomendar, combinado con la adición de abonos que puedan ser incorporados con la pezuña de los animales, como por ejemplo los BF. Además, mediante la interseembra o siembra directa de especies forrajeras perennes, se lograría una estabilidad de la cobertura vegetal y por ende el mejoramiento de las condiciones físicas y químicas del suelo. Por otra parte, deberían considerarse especies nativas, de hábitats salinos, como recursos potencialmente adaptados y aptos para mejorar estos suelos (Zabala et al., 2011).

El éxito de la biorremediación de la gramínea empleada en este ensayo podría incrementarse si se incluyeran leguminosas en las siembras. Es ampliamente aceptado que las leguminosas al fijar nitrógeno liberan H^+ en la rizosfera (Marschner et al., 1995). Qadir et al. (2003) hallaron que el H^+ liberado por cultivos que fijan N_2 podría incrementar la tasa de remoción de Na^+ de suelos calcáreos.

Asimismo, deberán evaluarse los problemas potenciales de contaminación asociados con el uso de BF y BT (Bolton et al., 2004). Deberán considerarse programas de control que prevean manejo de efluentes, infiltración a la napa freática, escurrimiento de contaminantes y emisión de gases. Al presente son escasos los trabajos conducidos en nuestro país tendientes a evaluar el impacto ambiental que se asocia al uso de biosólidos (Bolton et al., 2004).

PERSPECTIVAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

Los resultados hallados en esta tesis originan nuevas preguntas relacionadas con los efectos de las enmiendas biológicas y químicas sobre rehabilitación de suelos salino-sódicos:

1- Si se hubiese presentado una condición de precipitación más húmeda que la ocurrida durante el período experimental de esta tesis, las enmiendas evaluadas a campo en este trabajo, ¿podrían haber disminuido la salinidad y el sodio intercambiable del suelo? Deberían realizarse estudios con mayor duración para cubrir la variabilidad climática, que puede afectar marcadamente los procesos involucrados en las enmiendas y en el crecimiento de los cultivos.

2- Dada la comprobada heterogeneidad espacial en las propiedades químicas de los suelos Natracuoles, ¿cuál o cuáles serían los diseños experimentales y modelos de efectos más adecuados a implementar para la conducción de ensayos de este tipo, tanto en la escala espacial (para controlar la heterogeneidad edáfica de estos sitios experimentales) como en la escala temporal (para realizar muestreo mas completos con clara definición de los momentos elegidos para su realización)?

3- Otro aspecto importante a considerar serían los plazos de análisis y evaluación de los efectos de estas enmiendas sobre las propiedades físico-químicas de estos suelos, así como la residualidad.

4- ¿Cuál sería la efectividad de las enmiendas cuando se las esparce sobre el suelo, sin incorporar?

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Abrol IP, Yadav JSP, Massoud FI (1988) Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin 39. FAO. Land and Water Development Division, Roma. 143 p.

Adhikari M, Paudel KP, Martin Jr. NR, Gauthier WM (2005) Economic of dairy waste use as fertilizer in Central Texas. *Waste Manage* 25: 1067-1074.

Ahmad N, Qureshi RH, Qadir M (1990) Amelioration of calcareous saline-sodic soils by gypsum and forage plants. *Land Degrad. Rehabil.* 2: 277-284.

Akhter J, Murray R, Mahmood K, Malik A, Ahmed S (2004) Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with Kallar grass (*Leptochloa fusca*). *Plant Soil* 258: 207-216.

Alexandratos N (1999) World food and agriculture: outlook for the medium and longer term. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96(11): 5908-5914.

Altamore RE, Torres RF, Lavado RS (1983) Efecto del subsolado sobre un suelo salino sódico del oeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 1(1): 45-51.

Analytical Software (2000) Statistix 8. Tallahassee, FL. USA.

Ashraf M, Mcneilly T, Bradshaw AD (1986) The response of selected salt-tolerant and normal lines of four grass species to NaCl in sand culture. *New Phytologist* 104: 453-461.

Bajwa MS, Josan AS (1989) Effect of gypsum and irrigation water on soil and crop yields in a rice-wheat rotation. *Agric. Water Manage.* 16: 53-61.

Berone GD, Lattanzi FA, Agnusdei MG, Bertolotti N (2008) Growth of individual tillers and tillering rate of *Lolium perenne* and *Bromus stamineus* subjected to two defoliation frequencies in winter in Argentina. *Grass Forage Sci.* 63(4): 504-512.

Bolton A, Studdert GA, Echeverría HE (2004) Utilización de estiércol de animales en confinamiento como fuente de recursos para la agricultura. *Rev. Arg. de Prod. Animal* 24(1-2): 53-73.

Carter MR, Pearen JR (1986) Influence of calcium on growth and root penetration of barley seedlings in a saline-sodic soil. *Arid Soil Res. Rehabil.* 2: 59-66.

Cassman, KG (1999) Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96(11): 5952-5959.

Chand M, Abrol IP, Bhumbla DR (1977) A comparison of the effect of eight amendments on soil properties and crop growth in a highly sodic soil. *Indian J. Agr. Sci.* 47: 348-354.

Choudhary OP, Josan AS, Bajwa MS (2002) Role of organic materials in mobilizing intrinsic calcium carbonate to ameliorate sodic irrigations. Proc. 17th World Congress Soil Sci., Symposia N°34, Abstract vol. III (symposia 22-36): 1162

Choudhary OP, Josan AS, Bajwa MS, Kapur ML (2004) Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions. *Field Crop Res.* 87: 103-116.

Clark GJ, Dodgshun N, Sale PWG, Tang C (2007) Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biol. Biochem.* 39(11): 2806-2817.

Colabelli M (1996) Intersiembra de especies forrajeras en la Pampa Deprimida Bonaerense. *Boletín Técnico* N° 137. INTA, Balcarce.

Costa JL, Godz P (1998) The effects of gypsum applied to a Natraquoll of the flooding pampas of Argentina. *Soil Use Manag.* 14: 246-247.

Darab K (1981) The role of sodium compounds in the formation and properties of salt affected soils. *Agrokemia es Talajtan* (30) Sup. 105-120.

De Luca M, García Seffino L, Grunberg K, Salgado M, Cordoba A., Luna C, Ortega L, Rodríguez A, Castagnaro A, Taleisnik E (2001) Physiological causes for decreased productivity under high salinity in Boma, a tetraploid *Chloris gayana* cultivar. *Aust. J. Agr. Res.* 52: 903–910.

Eck HV, Stewart BA (1995). Manure. En: Rehcigl, J.E. (Ed.). *Soil Amendments and Environmental Quality*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp.169-198.

FAO. Land and Plant Nutrition Management Services (2000a) Bio-Physical, Socio-Economic and Environmental Impacts of Salt-affected Soils. Disponible en: <http://www.fao.org/AG/aGL/agll/spush/topic3.htm> [Acceso 03/11/2008]

FAO. Land and Plant Nutrition Management Services (2000b) Extent and Causes of Salt-affected Soils in Participating Countries. Disponible en: <http://www.fao.org/AG/aGL/agll/spush/topic2.htm> [Acceso 03/11/2008]

García-Orenes F, Guerrero C, Mataix-Solera J, Navarro-Pedreño J, Gómez I, Mataix-Beneyto J (2005) Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil Till. Res.* 82: 65-76.

Gill JS, Sale PWG, Peries RR, Tang C (2009) Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic subsoil following incorporation of organic amendments. *Field Crop. Res.* 114(1): 137-146.

Grattan SR, Grieve CM (1992) Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environment. *Agr. Ecosyst. Environ.* 38: 275-300.

Grattan SR, Grieve CM (1999) Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae.* 78: 127-157.

- Gupta RK, Abrol IP (1990) Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production. *Adv. Soil Sci.* 131: 211-225.
- Ilyas M, Miller RW, Qureshi RH (1993) Hydraulic conductivity of saline-sodic soil after gypsum application and cropping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1580-1585.
- Ilyas M, Qureshi RH, Qadir M (1997) Chemical changes in a saline sodic soil after gypsum application and cropping. *Soil Tech.* 10: 247-260.
- INTA (1977) La Pampa Deprimida, condiciones de drenaje de sus suelos. Publicación N° 154. INTA, Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Departamento de Suelos, Castelar, Buenos Aires.
- INTA. CIRN (1988) Carta de suelos de la República Argentina, Hoja 3563-16, Serie Piedritas. INTA, Castelar.
- Jalali M, Ranjbar F (2009). Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. *Geoderma* 153: 194–204.
- Jomaa S, Shanableh A, Khalil W, Trebilco B (2003) Hydrothermal decomposition and oxidation of the organic component of municipal and industrial waste products. *Adv. Environ. Res.* 7: 647-653.
- Jones SB, Robbins CW, Hansen CL (1992) Sodic soil reclamation using cottage cheese (acid) whey. *Arid Soil Res. Rehabil.* 7: 51-61.
- Khan SA (2003) Studies on Sodic Soils (Problematic Soils) rehabilitation through agroforestry system for Central Plain Zone of Uttar Pradesh, India. XII World Forestry Congress, Québec, Canada. Disponible en www.fao.org/docrep/article/wfc/xii/1009-b5.htm [Acceso: 15/07/2008]
- Lal R, Kang BT (1982) Management of organic matter in soils of the tropics and subtropics. En: *Non-symbiotic nitrogen fixation and organic matter in the tropics. Symposia papers. 12th International Congress of the Soil Science Society.* Nueva Delhi, India, pp. 152-178.
- Lavado RS, Taboada MA (1988) Water salt and sodium dynamics in a Natraquoll in Argentina. *Catena* 15: 577-594.
- Lax A, Diaz E, Castillo V, Albaladejo J (1994) Reclamation of physical and chemical properties of a salinized soil by organic amendment. *Arid Soil Res. and Rehabil.* 8: 9-17
- Lehrsch GA, Robbins CW, Hansen CL (1993) Cottage cheese (acid) whey effects on sodic soil aggregate stability. *Arid Soil Res. Rehabil.* 8:19-31.
- Liang Y, Yang Y, Yang CH, Shen Q, Zhou J, Yang, L (2003) Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil. *Geoderma* 115: 149-160.

Maas EV, Hoffman GH (1977) Crop salt tolerance current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Division* 103:115-134.

Maas EV, Lesch SM, Francois LE, Grieve CM (1994) Tiller development in salt-stressed wheat. *Crop Sci.*34: 1594–1603.

Maddaloni J, Ferrari L (2001) Forrajeras y pasturas del ecosistema templado húmedo de la Argentina. INTA-UNLZ, Buenos Aires. 522 p.

Marschner H (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2a. ed. Academic Press, London, UK.

Martinez-Beltran J, Manzur CL (2005) Overview of salinity problems in the World and FAO strategies to address the problem. En: *Proceedings of the international salinity forum*, Riverside, California, April 2005, pp. 311-313.

Mazzanti A, Castaño J, Sevilla GH, Orbea JR (1992) Características agronómicas de especies y cultivares de gramíneas y leguminosas forrajeras adaptadas al sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Manual de descripción*. INTA, Balcarce, pp. 32-33.

Meyer D, Schwankl J (2000) Liquid dairy manure utilization in a cropping system: a case study. En: Dick, WA (Ed.) *Land application of agricultural, industrial and municipal by-products*. Book Series N° 6. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 409-423.

Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires (1987) El agua y el suelo en el noroeste bonaerense. *Boletín Técnico* N° 1. Ministerio de Asuntos Agrarios, Buenos Aires.

Mishra A, Sharma SD, Gupta MK (2003). Soil Rehabilitation through afforestation : evaluation of the performance of *Prosopis Juliflora*, *Dalbergia sissoo* and *Eucalyptus tereticornis* plantations in a sodic Environment. *Arid Land Res. Manag.* 17: 257-269.

Molina JS (1969) La recuperación de suelos sódicos por métodos biológicos [Rehabilitation of sodic soils by biological methods]. En: AACCS (Ed.) *Actas. 5a Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*, pp. 18–30.

More SD (1994) Effect of farm wastes and organic manures on soil properties, nutrient availability and rice-wheat grown on sodic vertisol. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42(2): 253-256.

Munns R (1993) Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ.* 16: 15-24.

Munns R (2002) Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.* 25: 239-250.

Munns R, Tester M (2008) Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology.* 59: 651-681.

- Nelson P, Ham G (2000) Exploring the response of sugar cane to sodic and saline conditions through natural variation in the field. *Field Crops Res* 66: 245-255.
- Olsen SR, Sommers LE (1982) Phosphorus. En: Page A. L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis*. Agronomy 9 part 2. ASA-SSSA, Madison, pp. 403-430.
- Perelman S (1984) Modelo de circulación de agua en una comunidad de pastizal de la depresión del Salado. CIC, La Plata, Argentina [Informe].
- Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G (2001) Use of saline-sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. *Agr. Waste Manag.* 50: 197-210.
- Qadir M, Qureshi RH, Ahmad N (1996) Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma* 74: 207-217.
- Qadir M, Qureshi RH, Ahmad N (1997) Nutrient availability in a calcareous saline-sodic soils during vegetative bioremediation. *Arid Soil Res. Rehabil.* 11: 343-352.
- Qadir M, Steffens D, Yan F, Schubert S (2003) Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation. *Land Degrad. Dev.* 14(3): 301-301.
- Rao DLN, Pathak H (1996) Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Land Res. Manag.* 10: 4. 311-319.
- Rengasamy P, Chittleborough D, Helyar K (2003) Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity. *Plant Soil.* 257: 249-260.
- Rodríguez MB, Maggi L, Etchepareborda M, Taboada MA, Lavado R (2003) Nitrogen availability for maize from Rolling Pampa soil after addition of biosolids. *J. Plant Nutr.* 26: 431-441.
- Ruan Y, Hu Y, Schmidhalter U (2008) Insights on the role of tillering in salt tolerance of spring wheat from detillering. *Environ. Exp. Bot.* 64: 33-42.
- SAGPyA, INTA (1989) Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. SAGPyA - INTA. Proyecto PNUD Arg/85/019, Buenos Aires.
- SAS Institute Inc. (2004). SAS/STAT 9.1. Cary, NC, USA.
- Shainberg I, Letey J (1984) Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* 52: 1-57.
- So HB, Alymore AG (1993) How do sodic soils behave? The Effects of sodicity on soil physical behaviour. *Soil Res.* 31: 761-77.
- Stewart BA, Robinson CA, Parker DB (2000) Examples and case studies of beneficial reuse of beef cattle by-products. En: Dick WA (Ed.) *Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products*. Book Series N° 6. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 387-407.

Sumner ME (1993) Sodic soils: New Perspectives. *Aust. J. Soil Res.* 31: 683-750.

Szabolcs I (1969) The influence of sodium carbonate on soil forming processes and on soil properties. *Agrokemia Es Talajtan* 18, Supl., 37-68.

Szabolcs I (1979) Review on Research of Salt Affected Soils. *Natural Resources Research XV*, UNESCO, Paris.

Szabolcs I (1994) Prospects of salinity for the 21st century. En: 15th world congress of soil science. The international society of soil science and the mexican society of science, pp. 123-142.

Taboada MA, Damiano F, Lavado, RS (2003) Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. Disponible en: http://www.agro.uba.ar/carreras/agronomía/materias/taller_II/taboada_damiano.pdf. Acceso: 20/11/2008

Taboada MA, Lavado RS (Ed.) 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. FAUBA, Buenos Aires. 160 p.

Taleisnik E, Grunberg K, Santa María G (2008) La salinización de suelos en la argentina: Su impacto en la producción agropecuaria. Editorial Universitaria de Córdoba, Córdoba. 118 p.

Taleisnik E, Peyrano G, Arias C (1997) Response of *Chloris gayana* cultivars to salinity. 1. Germination and early vegetative growth. *Tropical Grasslands* 31: 232-240.

Tejada M, García C, González JL, Hernández MT (2006) Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biol. Biochem.* 38: 1413-1421.

Tester M, Davenport R (2003) Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann. Bot.* 91: 503-527.

Thomas DSG, Middleton NJ (1993). Salinization: new perspectives on a major desertification issue. *J. Arid Environ.* 24: 95-105.

Thomas GW (1996) Soil pH and soil activity. En: Sparks DL (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. Book Series 5.* Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 475-490.

USDA. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* Agricultural Handbook No. 60. USDA, Washington,

USDA. Soil Survey Staff (1975) *Soil Taxonomy: A basic system for making in interpreting soil surveys.* Agr Handbook 436. SCS-USDA, Washington.

Viglizzo EF, Lértora F, Pordomingo AJ, Bernados JN, Roberto ZN, Del Valle H (2001) Ecological lesson and applications from one century of low external- input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83: 66-81.

Wahid A, Akhtar S, Ali I, Rasul E (1998) Amelioration of saline-sodic soils with organic matter and their use for wheat growth. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 29 (15): 2307-2318

Walker DJ, Bernal MP (2008) The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource Technology* 99: 396-403.

Wild A (2003) *Soils, land and food: managing the land during the twenty-first century.* Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Yaduvanshi NPS, Swarup A (2005) Effect of continuous use of sodic irrigation water with and without gypsum, farmyard manure, pressmud and fertilizer on soil properties and yields of rice and wheat in a long term experiment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73: 111-118

Zabala JM, Taleisnik E, Giavedoni JA, Pensiero JF, Schrauf GE (2011) Variability in salt tolerance of native populations of *Elymus scabrifolius* (Doll) J. H. Hunz from Argentina. *Grass Forage Sci.* 66: 109-122.

Zamolinski A F (2001) *Experiencias en recuperación de suelos salinizados.* Publicación Técnica N° 31. INTA, General Villegas. 16 p.