

USO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS Y QUÍMICAS PARA LA REMEDIACION DE SUELOS INUNDADOS POR EL TSUNAMI DE 2010 EN LA ZONA DE TOMÉ, CHILE

USE OF ORGANIC AND CHEMICAL AMENDMENTS FOR THE REMEDIATION OF SOILS FLOODED BY THE 2010 TSUNAMI IN THE AREA OF TOMÉ, CHILE

Celerino Quezada^{1*}, Marco Sandoval¹, Neal Stolpe¹, y Demy Olmos¹

¹ Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Av. Vicente Méndez 595, Chillán, Chile

* Autor para correspondencia E-mail: cequezad@udec.cl

RESUMEN

La inundación por efecto del tsunami que afectó la costa de Chile en 2010 provocó daños en los suelos usados para la producción agrícola. El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de enmiendas orgánicas y químicas en la recuperación de la capacidad productiva de los suelos afectados. El ensayo se realizó en condiciones de invernadero, aplicando un diseño experimental completamente al azar con 9 tratamientos y tres repeticiones, utilizando ballica inglesa (*Lolium perenne* L.). Los tratamientos fueron: CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso), compost, lavado, yeso + lavado, AG Sil 21, PERL HUMUS 60 G, DISPER Alghum GS. Se evaluó materia seca, conductividad eléctrica (CE), concentración de Na^+ y pH. Compost, yeso + lavado y DISPER Alghum GS presentaron los mejores resultados en la producción de materia seca. Lavado, AG Sil 21 y PERL HUMUS 60 G disminuyeron la conductividad eléctrica bajo el nivel crítico que afecta a los cultivos. Además, el tratamiento de yeso + lavado mostró la mayor disminución de la concentración de sodio. Esta investigación concluyó que la producción agrícola de los suelos inundados por el tsunami se puede recuperar en menor tiempo con la aplicación de enmiendas orgánicas y yeso + lavado. Sin embargo, se requieren estudios de campo para validar estos resultados y determinar cuál enmienda presenta el mejor comportamiento.

Palabras claves: materia seca, conductividad eléctrica, sodio intercambiable, lavado de suelos

ABSTRACT

Flooding by the 2010 tsunami that affected south-central coasts of Chile damaged the soils used for agricultural production. The aim of this study was to evaluate the effect of organic and chemical amendments on the reclamation of the production capacity of the soils post-tsunami. The study was performed in a greenhouse experiment using a completely randomized design with 9 treatments and three replicates using ryegrass (*Lolium perenne* L.). The treatments were: CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ (gypsum), compost, leaching, gypsum + leaching, AG Sil 21, PERL HUMUS 60 G, DISPER Alghum GS. Dry matter production, soil electrical conductivity (EC), exchangeable Na^+ and soil pH were measured. The results showed that the highest dry matter production was obtained with the application of compost, gypsum + leaching and DISPER Alghum GS. Soil leaching, AG Sil 21 and PERL HUMUS 60 G decreased the EC, reaching salinity levels below the threshold values that affect agricultural production. Besides, gypsum + leaching recorded the highest Na^+ . It can be concluded that the agricultural production in soils flooded by the 2010 tsunami can be restored more quickly

with the application of organic amendments and gypsum + leaching . However, field studies are required to validate these results and determine which of these amendments presents the best performance.

Key words: dry matter, Na^+ exchangeable, electrical conductivity, soil leaching.

INTRODUCCION

Chile es uno de los países del mundo que ha sido afectado por los más grandes terremotos por estar ubicado en una zona de subducción del Océano Pacífico en la interfase de ruptura entre las placas Sud-americana y de Nazca (Madariaga et al., 2010). El 27 de febrero del 2010, un terremoto con intensidad 8,8 grados en la escala de Richter afectó las regiones del Maule y Bío-bío, con epicentro en el Océano Pacífico, a 115 km al noroeste de la ciudad de Concepción ($35^{\circ}54'32''$ S, $72^{\circ}43'57''$ O). Este fenómeno telúrico originó un tsunami con olas superiores a 15 m que provocaron graves daños en las costas chilenas (Vigny et al., 2011).

Los tsunamis son perturbaciones originadas en el mar producto de un terremoto, lo que origina movimientos del fondo marino y traslaciones de masas de agua y ondas oceánicas que se propagan radialmente en todas direcciones y a una velocidad superior a 700 km h^{-1} , causando enormes daños en las costas continentales (Vigny et al., 2011). El tren de olas marinas inundó suelos agrícolas en posición de terrazas marinas, con pérdida total de la producción de los cultivos de papas y praderas, debido a contaminación por agua salada y depositación de arena.

La toxicidad por sales es uno de los principales factores edáficos que afecta la producción de los cultivos y una limitante para la sustentabilidad de la agricultura en suelos salinos y/o sódicos a través del mundo (Lobell et al., 2007), llegando a ser importante cuando la concentración de sales en la solución del suelo excede el nivel de tolerancia del cultivo (Güler et al., 2014). La sodicidad del suelo es un peligro para la agricultura y el medio ambiente, por su efecto negativo en la estabilidad estructural del suelo y en la conductividad hidráulica, ya que disminuye la permeabilidad del suelo y aumenta la erosión (Amezketá, 2007). El mejoramiento de los suelos sódicos necesita una fuente de Ca^{2+} que reemplace el exceso de Na^+ en el complejo de intercambio y mejore en la zona radicular la absorción de agua y nutrientes por el cultivo (Qadir et al., 2007).

La concentración de sales del agua de mar es del orden de 35 g de sal por kg, de los cuales cerca de 19 g por kg es cloruro, además es alta en Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} , y baja en K^+ y Ca^{2+} , lo que provoca el deterioro de la estructura del suelo

que puede durar años si no se aplican medidas apropiadas de manejo de suelos (Raats, 2015). Por otra parte, los problemas de salinidad por inundación de agua de mar o intrusión en las zonas costeras son completamente diferentes de los que se presentan en zonas áridas y semiáridas (Raats, 2015) El mejoramiento de estos suelos para hacerlos aprovechables para la agricultura depende de la comprensión de la dinámica del sodio e interacciones químicas que rigen la disponibilidad de nutrientes (Vukadinovic y Rengel, 2007)

El proceso de recuperación de los suelos salinos se puede acelerar mediante la aplicación de enmiendas y el lavado de sales desde la zona radical mediante la aplicación de un exceso de agua, siendo recomendable aplicar yeso, materiales orgánicos y residuos de cultivos, para disminuir el efecto negativo de aguas con sodio en las propiedades del suelo (Choudary et al., 2011). Según Mahmoodabadi et al. (2013) la aplicación de yeso mejora la estabilidad de agregados, permitiendo aumentar la eficiencia de lixiviación de sales. Además, algunos nutrientes minerales pueden mitigar los efectos adversos del estrés salino, tales como silicio (Si), que proporciona beneficios significativos a las plantas en distintas fases de crecimiento (Ali et al., 2012). Al respecto, Mahmoodabadi et al. (2013) determinaron que la aplicación de yeso junto con enmiendas orgánicas podrían aumentar los efectos sinérgicos sobre la solubilidad de K^+ y concentración de Na^+ .

La aplicación de materia orgánica en suelos salinos acelera la lixiviación de Na^+ , y disminuye la conductividad eléctrica (CE) (Aydin et al., 2012). Al respecto, Tejada et al. (2006) determinaron que la aplicación de compost y guano de pollo mejoraron las propiedades físicas, químicas y biológicas, favoreciendo la aparición de vegetación, lo que puede ser una buena estrategia para remediación de suelos salinos. Por su parte, Aydin et al. (2012) reportan que los ácidos húmicos son muy efectivos como acondicionadores de suelos para mejorar la tolerancia de los cultivos a condiciones salinas.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de diferentes tratamientos de remediación en la recuperación de la capacidad productiva de los suelos inundados por el tsunami, utilizando enmiendas orgánicas, enmiendas químicas y lavado de suelo.

MATERIALES Y METODOS

Sitio experimental

El ensayo se realizó bajo condiciones de invernadero en la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, entre los meses de junio a diciembre del 2010. Las muestras de suelos fueron obtenidas en la profundidad de 0-20 cm en el valle de Pudá (36°37' S; 72°57' O, 5 m.s.n.m.), Comuna de Tomé, provincia de Concepción, Chile.

El suelo se clasifica como Ultisol, Serie Tomé, Typic Palexerults, de topografía suavemente ondulada, permeabilidad lenta y escurrimiento superficial moderado, textura franco arcillo limosa, profundos, y drenaje moderado (Stolpe, 2006). Las características físicas del suelo analizadas fueron: densidad aparente (Dap) 1,42 g cm⁻³ por el método del cilindro, capacidad de campo (CC) 22,4% humedad base suelo seco (hbss), punto de marchitez permanente (PMP) 13,8% hbss por el método de olla y plato a presión. El análisis granulométrico por el método del hidrómetro de Bouyoucos determinó 51,1% arena, 38,2% limo y 10,6% arcilla, que corresponde a la clase textural franco a franco arenosa según el sistema USDA (Sandoval et al., 2012). Además, se determinó materia orgánica (1,17 %), nitratos N-NO₃ (11,6 mg kg⁻¹), fósforo Olsen (11,8 mg kg⁻¹) y potasio disponible (17,5 mg kg⁻¹). Los análisis físicos y químicos fueron realizados en los Laboratorios de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Chillán.

El clima corresponde al Agroclima Concepción, con temperatura media anual de 12-13°C, temperatura mínima en julio (5-6,5°C) y temperatura máxima en enero (23-24°C). La precipitación anual fluctúa entre 1.000 y 1.200 mm, y el período libre de heladas es de 4 meses, siendo las sumas térmicas base 5°C de 2.600 grados día y la evapotranspiración potencial entre 900 y 1000 mm (Del Pozo y Del Canto, 1999).

Diseño experimental

El diseño experimental aplicado fue completamente al azar, conformado por 9 tratamientos y tres repeticiones. Las enmiendas aplicadas y sus dosis fueron: carbonato de calcio CaCO₃ (6 t ha⁻¹); yeso CaSO₄ × 2H₂O (6 t ha⁻¹); compost 20% MO (12 t ha⁻¹), y los productos comerciales: AG Sil 21 (100 mg kg⁻¹ SiO₂ y 48 mg kg⁻¹ de K₂O) (6 kg ha⁻¹); PERL HUMUS 60 G (60% de ácidos húmicos) 200 kg ha⁻¹; y DISPER Alghum GS (10% extracto de algas, 15% de ácidos fúlvicos, 60% de ácidos húmicos y 14% de K₂O) 2 kg ha⁻¹.

El lavado de suelo consistió en simular una precipitación de 400 mL, parcializada en ocho días consecutivos, aplicando 4 L de agua por maceta.

Los tratamientos aplicados a las macetas fueron los siguientes: T1: Testigo; T2: CaCO₃ (7,8 g maceta⁻¹); T3: Yeso (7,8 g maceta⁻¹); T4: Compost (15,6 g maceta⁻¹); T5: Lavado de suelo (4 L maceta⁻¹); T6: Yeso (7,8 g maceta⁻¹) + Lavado; T7: AG Sil 21 (0,0078 g maceta⁻¹); T8: PERL HUMUS 60 G (0,26 g maceta⁻¹), y T9: DISPER Alghum GS (0,0195 g maceta⁻¹)

Macetas

Las macetas contenían 1,18 kg de suelo. Se sembraron 200 semillas de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) en cada una, el 20 de julio del 2010. El ensayo se efectuó en condiciones de invernadero con temperatura de 16 ± 2°C y humedad relativa del 60%. La humedad del suelo en las macetas se mantuvo a capacidad de campo mediante gravimetría y riego manual cada 5 días.

Evaluaciones

Materia seca

La producción de materia seca se evaluó mediante tres cortes hasta 1,5 cm de altura, cada 30 días. Las muestras se almacenaron en bolsas de papel y se pesaron en fresco en una balanza de alta precisión (Mettler-Toledo®, BB2440, Greifensee, Suiza) y se secaron en un horno deshidratador (Memmert®, 854 Schwabach, Alemania) durante 72 h a temperatura de 60°C.

Propiedades químicas del suelo

Las características químicas determinadas fueron: acidez (método suelo:agua 1:2,5), CE (método suspensión 1:2,5) y Na⁺ (acetato de amonio 1M pH 7, espectrofotómetro de absorción atómica (Sadzawka et al., 2006). El análisis se realizó en muestras compuestas por tratamiento al término del ensayo.

Análisis estadístico

Los resultados de producción de MS fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA) y las medias de los tratamientos se compararon aplicando el test de Tukey con 95% de nivel de significancia, utilizando el programa InfoStat (Balzarini et al., 2008). Además se verificó el supuesto de normalidad con el test de Shapiro-Wilks modificado. Las propiedades químicas del suelo fueron evaluadas mediante análisis descriptivo y de regresión entre Na⁺ intercambiable y CE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia seca

La producción de materia seca (Tabla 1) presentó diferencias significativas ($p \leq 0,05$), con incrementos entre el primer y tercer corte en la mayoría de los tratamientos, destacando los tra-

tamientos de compost (2,42 g), yeso + lavado (2,34 g) y DISPER Alghum GS (2,30 g). Esto se puede explicar, según Lakhdar et al. (2010) porque la aplicación de enmiendas orgánicas mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente el contenido de carbono y nitrógeno. Además, en suelos salinos la aplicación de sustratos orgánicos aumenta la actividad y biomasa microbiana (Yan y Marschner, 2012) y la biomasa aérea y radicular (Ghollorata y Raiesi, 2007). Sin embargo, Rousk et al. (2011) determinaron que otros factores pueden afectar el crecimiento bacteriano como el régimen de humedad, los ciclos

de humedecimiento-secado y el potencial osmótico. Esto sugiere que en presencia de sustratos orgánicos, las poblaciones microbianas se pueden ajustar a fluctuaciones en salinidad en el campo debido a lavado, riego o nivel freático (Asghar et al., 2012). La menor producción de materia seca del suelo control puede ser explicada, según Setia et al. (2011), debido a que la salinidad tiene efectos negativos en la descomposición de la materia orgánica y en la mineralización de C, N, S y P en suelos arenosos por el bajo contenido de agua y potencial osmótico.

La producción de MS del primer corte (Fig. 1)

Tabla 1. Producción de materia seca por corte y total (g MS maceta⁻¹) en un suelo Typic Paleixerults inundado por el tsunami de 2010 bajo diferentes tratamientos de remediación.

Table 1. Dry matter production per cut and total (g DM pot⁻¹) in a Typic Paleixerults soil flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

Tratamiento	1er. corte	2o. corte	3er. corte	Total
T1: Testigo	0,09	0,13	0,55	0,77 a
T2: CaCO ₃	0,11	0,33	0,78	1,22 b
T3: Yeso	0,33	0,60	0,94	1,87 c
T4: Compost	0,48	0,89	1,05	2,42 g
T5: Lavado	0,85	0,58	0,52	1,95 c
T6: Yeso + Lavado	0,92	0,62	0,80	2,34 f
T7: AG Sil 21	0,65	0,77	0,73	2,15 d
T8: PERL HUMUS 60 G	0,52	0,88	0,81	2,21 e
T9: DISPER Alghum GS	0,48	0,92	0,90	2,30 e

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test de Tukey.

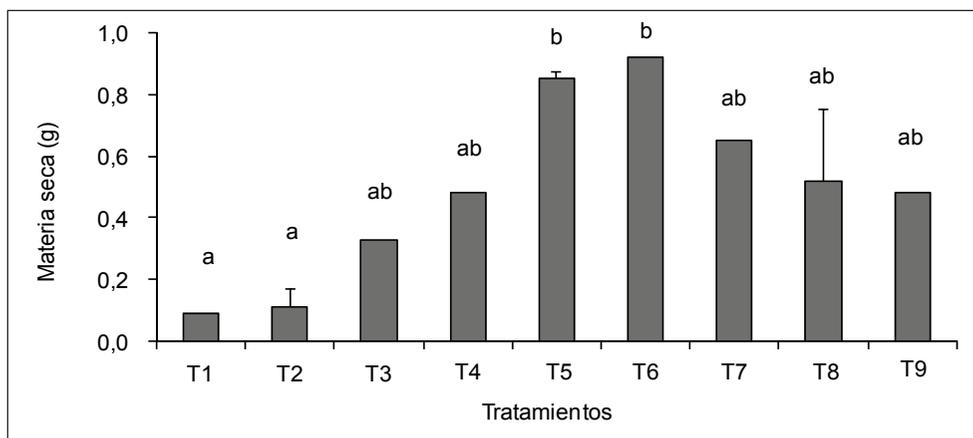


Fig. 1. Producción de materia seca del primer corte de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) en un suelo Typic Paleixerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 1. Dry matter production of first cut of ryegrass (*Lolium perenne* L.) in an Typic Paleixerults soil flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO₃; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test de Tukey.

indica que los tratamientos de lavado de suelo (T5) y yeso + lavado (T6) obtuvieron los mayores resultados, con 0,85 g y 0,92 g, respectivamente. La menor producción se obtuvo con CaCO_3 debido a la gran cantidad de sales presentes en el medio y la lentitud en el efecto del CaCO_3 como enmienda química. Los tratamientos con compost y productos en base a ácidos húmicos y silicatos tuvieron buenos resultados, pero la producción de MS fue menor que la obtenida con los manejos de lavado.

La producción de MS del segundo corte (Fig. 2) presenta diferencias significativas ($p \leq 0,05$), ya que los mayores resultados se logran con la aplicación de compost (0,89 g) y DISPER Alghum GS (0,89 g) con respecto al suelo salinizado (0,13 g). Según Clark et al. (2007) las enmiendas orgánicas pueden mejorar la fertilidad del suelo y la actividad biológica, de tal modo que la aplicación de compost y compuestos húmicos cumplen una doble función de remediación y mejoramiento de la fertilidad. El mejoramiento de la producción de MS con el producto AG Sil 21 (T7) está asociada con una reducción de la absorción de Na^+ por la planta y un aumento del contenido de potasio en el suelo (Ali et al., 2012).

La producción de MS del tercer corte (Fig. 3) no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), destacando los tratamientos de yeso + lavado (T6) con 0,94 g, y compost (T4) con 0,87g. El lavado (T5) obtiene la menor producción de MS (0,52 g) lo que puede estar asociado a la baja fertilidad

del suelo. En este caso las enmiendas químicas y orgánicas muestran resultados similares, debido a que aportan nutrientes y estimulan el crecimiento microbiano en la rizósfera (Lakhdar et al., 2010).

La MS total (Fig. 4) producida por el testigo (T1) con 0,77 g fue significativamente más baja que el resto de los tratamientos de remediación. Esto indica el efecto tóxico de las sales, ya que el agua de mar por el alto contenido de Na^+ causa desplazamiento de Ca^{2+} desde el complejo de intercambio (Raats, 2015), y probablemente demorará un mayor tiempo en recuperar su capacidad productiva en condiciones naturales. En cambio, los tratamientos de compost (T4), yeso + lavado (T6) y los compuestos húmicos y fúlvicos (T7, T8 y T9) presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo. Por otra parte, la aplicación de yeso (T3) con 1,87 g MS y lavado de suelo (T5) con 1,95 g MS exhibieron valores similares, pero significativamente inferiores a T6 (yeso + lavado) lo que demuestra el bajo efecto de la aplicación de yeso solo en la restauración de suelos salinosódicos (Chaganti et al., 2015). Probablemente el bajo peso total de MS obtenido en T2 se debe a que la tasa de disolución del CaCO_3 es demasiado lenta para proveer adecuada cantidad de Ca^{2+} intercambiable (Mahmoodabadi et al., 2013)

La mayor producción se obtuvo con la aplicación de compost (T4) con 2,42 g debido a su mayor contenido de humus, formado principalmente por ácidos húmicos y un bajo

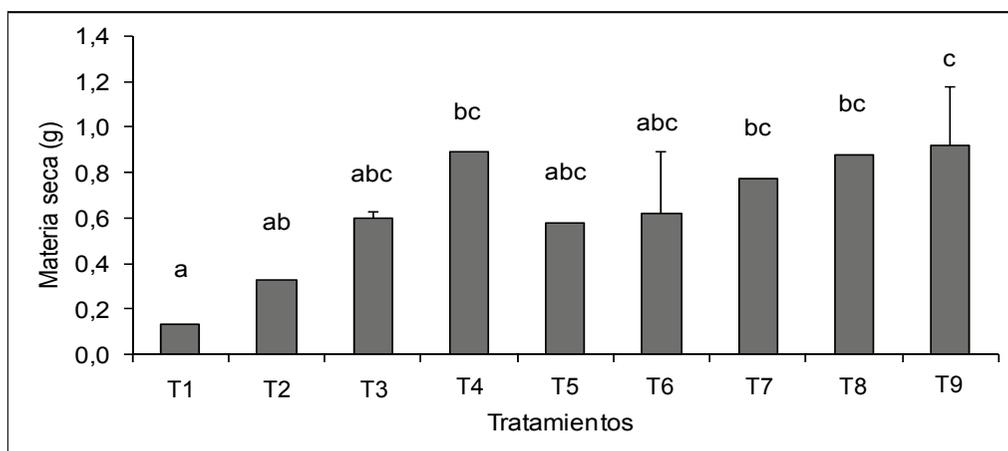


Fig. 2. Producción de materia seca del segundo corte de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) en un suelo Typic Palexerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 2. Dry matter production of second cut of ryegrass (*Lolium perenne* L) in a Typic Palexerults soil flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO_3 ; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test de Tukey.

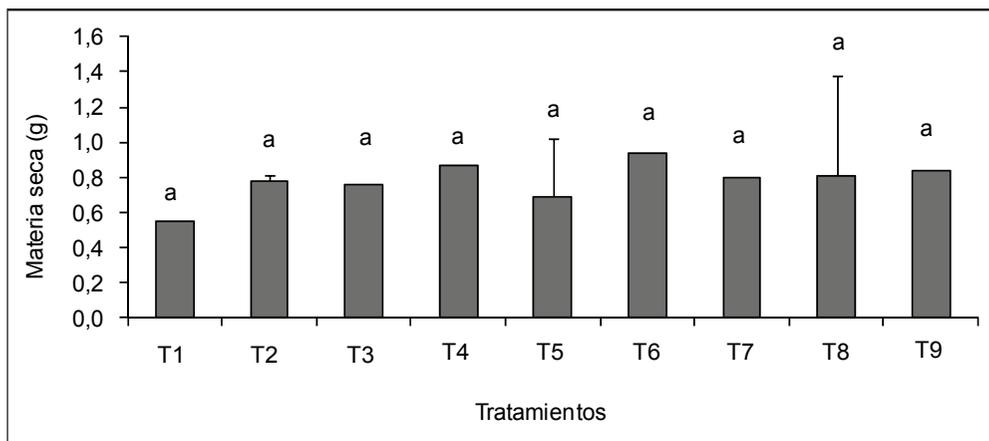


Fig. 3. Producción de materia seca del tercer corte de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) en un suelo Typic Paleixerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 3. Dry matter production of third cut of ryegrass (*Lolium perenne* L.) in an Typic Paleixerults soil flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO₃; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test de Tukey.

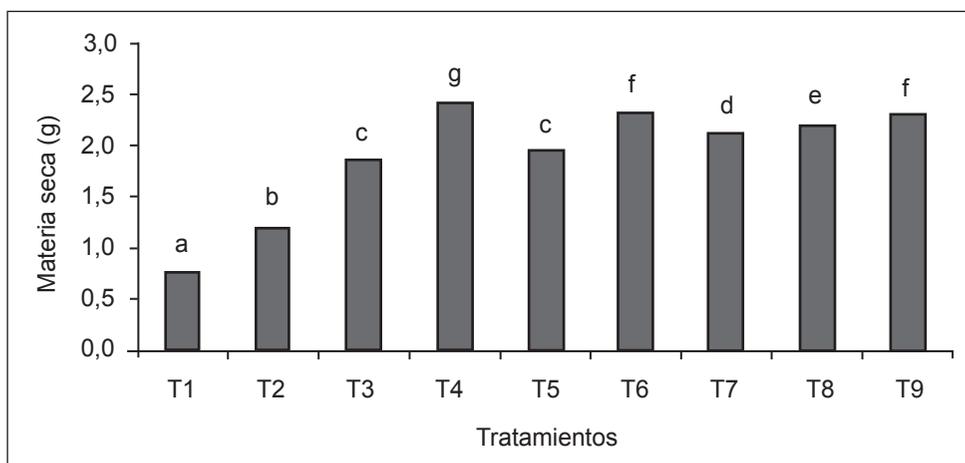


Fig. 4. Materia seca total de ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) en un suelo Typic Paleixerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 4. Total dry matter production of ryegrass (*Lolium perenne* L.) in a Typic Paleixerults soil flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO₃; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según test de Tukey.

porcentaje de ácidos fúlvicos. Según Tejada et al. (2006) los ácidos húmicos aumentan la biomasa microbiana del suelo, la respiración del suelo, la estabilidad estructural del suelo y promueven la floculación de minerales de arcillas, que es una condición esencial para la agregación de las partículas del suelo. Además, en suelos salinos

incrementan los contenidos de nitrógeno y fósforo foliar, aumentando el crecimiento de raíces y peso seco de brotes en los cultivos (Aydin et al., 2012)

Conductividad eléctrica

El análisis de regresión (Fig. 5) entre Na⁺ intercambiable y CE muestra una correlación alta ($R^2 =$

0,911), ya que el aumento de la concentración de Na^+ eleva el potencial osmótico, lo que reduce la disponibilidad de agua para las plantas con efectos negativos sobre el crecimiento y desarrollo vegetal (Aydin et al., 2012).

La conductividad eléctrica disminuyó en todos los tratamientos de remediación de suelos en comparación a la CE inicial de $2,3 \text{ dS m}^{-1}$, destacando lavado de suelo (T5), AG Sil 21 (T7) y PERL HUMUS 60 G (T8), con valores similares a los suelos de la región (Fig. 6). Sólo los tratamientos CaCO_3 (T2), yeso (T3) y DISPER Alghum GS (T9) presentaron valores sobre $0,89 \text{ dS m}^{-1}$ que pueden

disminuir la producción de biomasa y aumentar la resistencia estomática (Amer, 2010). Esto se puede explicar por la baja solubilidad del CaCO_3 ($0,14 \text{ mmol L}^{-1}$) y la poca efectividad del yeso solo para recuperar suelos salino-sódicos (Qadir et al., 2007; Mohajer, 2012; Mahmoodabadi et al., 2013). En el caso de DISPER Alghum GS con 60% de ácidos húmicos, estos resultados no concuerdan con Aydin et al. (2012) quienes reportaron que los ácidos húmicos reducen la conductividad eléctrica.

El análisis comparativo de CE permite concluir que la mayor diferencia con el testigo se logró con lavado de suelo (T5) y AG Sil 21 (T7), con valores

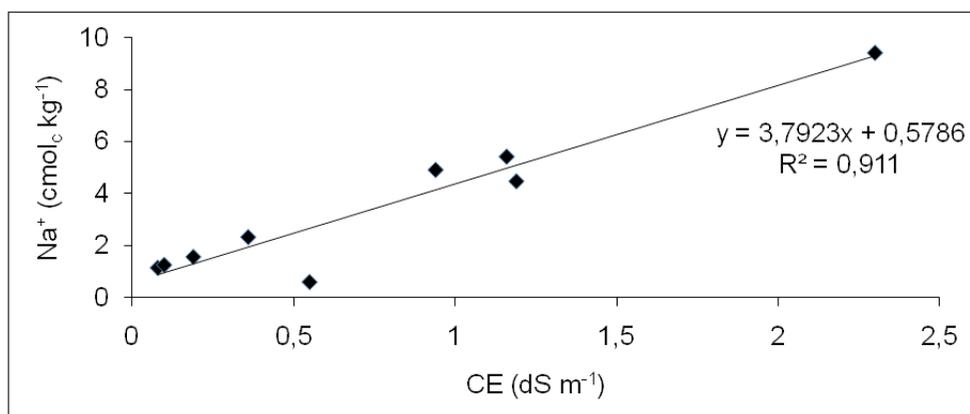


Fig. 5. Relación entre Na^+ intercambiable y conductividad eléctrica en un suelo Typic Palexerults inundado por el tsunami de 2010.

Fig. 5. Relationship between exchangeable Na^+ and electrical conductivity in an Typic Palexerults soil flooded by the 2010 tsunami.

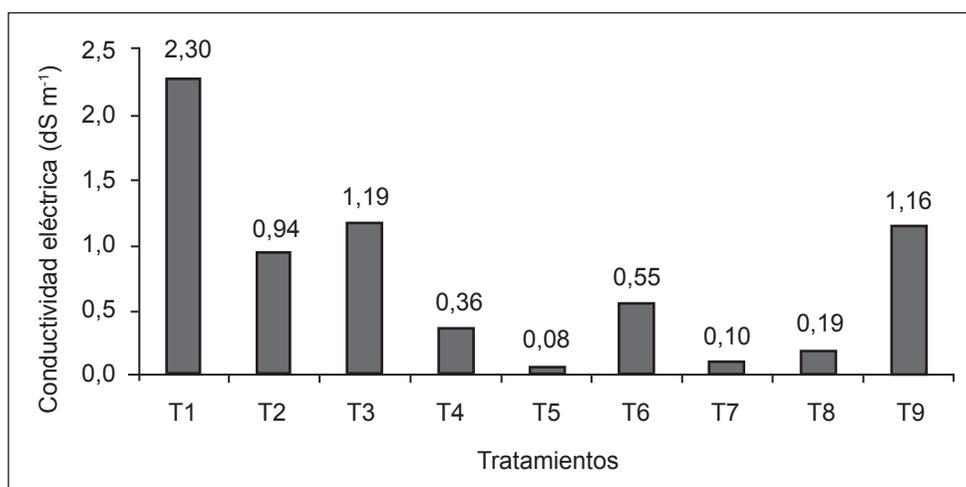


Fig. 6. Conductividad eléctrica en un suelo Typic Palexerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 6. Electrical conductivity in a Typic Palexerults soil flooded by the 2010 tsunami under different remediation treatments.

de 0,08 y 0,10 dS m⁻¹, respectivamente, indicando que son estrategias adecuadas para remediar problemas de salinidad. También se obtiene baja CE con aplicaciones de PERL HUMUS 60 G (0,19 dS m⁻¹) y compost (0,36 dS m⁻¹), lo que concuerda con Tejada et al. (2006), quienes determinaron una menor CE en suelos con aplicación de materia orgánica. Esto es concordante con lo obtenido por Chaganti et al. (2015) quienes determinaron en condiciones de campo que el compost y lavado de sales disminuyeron la CE de 20 a 4 dS m⁻¹ en un suelo Vertic Haplocambids

Sodio intercambiable

La variación del contenido de sodio intercambiable con los diferentes tratamientos de remediación (Fig. 7) indica que se produce una disminución del orden del 50 a 80%, siendo los de mejor comportamiento: lavado de suelo (T5), yeso + lavado (T6), AG Sil 21 (T7) y PERL HUMUS 60 G (T8). En cambio las aplicaciones de CaCO₃ (T2), yeso (T3) y DISPER Alghum (T9) no mostraron una disminución considerable de Na⁺, probablemente por una tasa de disolución demasiado lenta para proveer adecuada cantidad de Ca²⁺ intercambiable (Mahmoodabadi et al., 2013)

La disminución de la concentración de Na⁺ por efecto del yeso + lavado y compuestos húmicos se explica porque las enmiendas orgánicas pueden ser una fuente importante de Ca²⁺ y Mg²⁺, que facilitan el intercambio del sodio desde los sitios de intercambio, disminuyendo la relación de adsorción de sodio; además el uso del yeso

junto con enmiendas orgánicas tiene un efecto sinérgico en la remediación de la sodicidad del suelo (Chaganti et al., 2015). Sin embargo, el efecto positivo del yeso + lavado requiere mejorar la macroporosidad del suelo y disponer de un buen sistema de drenaje.

Acidez del suelo

Respecto a la acidez del suelo (Fig. 8) todos los tratamientos aumentaron el pH del suelo en comparación al testigo (pH 4,17), cambiando su clasificación de suelo ácido a ligeramente ácido con valores entre pH 5 a 6. El tratamiento con CaCO₃ presentó el valor más alto de pH en el suelo, esto se explicaría mediante la reacción química que involucra el intercambio de protones (H⁺) desde la superficie coloidal de la matriz del suelo y el catión Ca²⁺ proveniente del CaCO₃ que aumenta en la solución del suelo (Mahmoodabadi et al., 2013).

Con respecto a la variación de pH en el resto de los tratamientos, como lavado de suelo (T5), suelo + AG Sil 21 (T7) y suelo + PERL Humus 60 G (T8), es posible atribuirlos al efecto de lixiviación y acción de los ácidos húmicos.

En relación al efecto de la materia orgánica y humus, la presencia de funciones ácidas en las moléculas de la fracción húmica, favorece un efecto tampón, ayudando al mantenimiento del pH del suelo, lo que permite explicar la variación a suelos menos ácidos en los tratamientos de remediación T7, T8 y T9, porque la retención de cationes es función de las cargas negativas en las

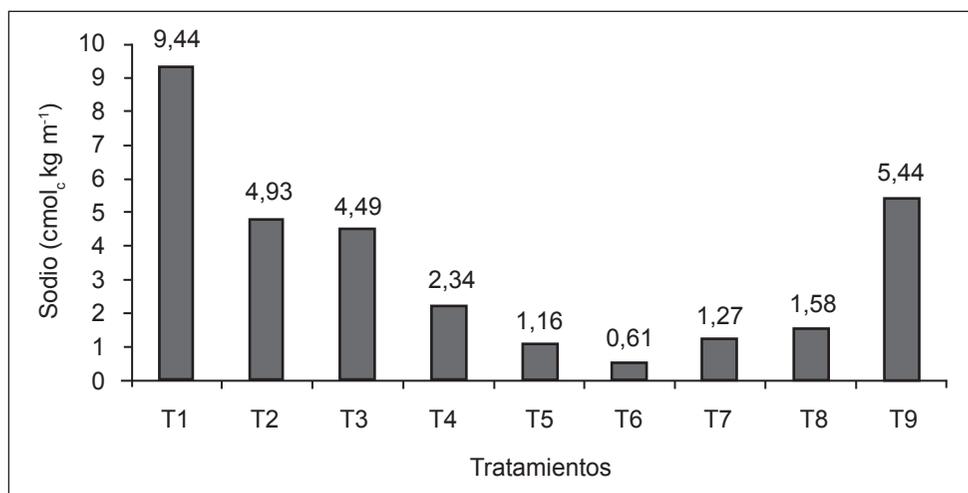


Fig. 7. Concentración de Na⁺ (cmolc kg⁻¹) después de aplicado los tratamientos en un suelo Typic Paleixerults inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 7. Na⁺ concentration (cmolc kg⁻¹) in a Typic Paleixerults soil flooded by the 2010 tsunami under different remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO₃; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

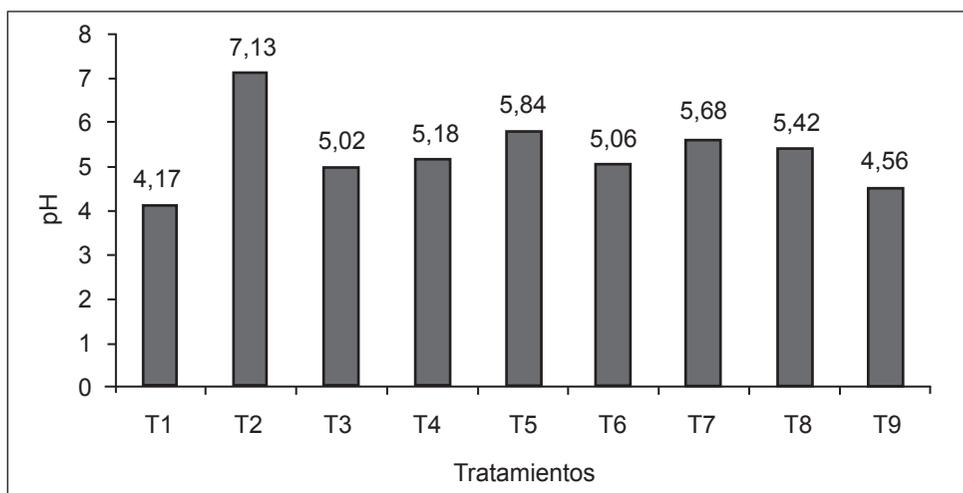


Fig. 8. Acidez del suelo (pH) en un Typic Palexeruls inundado por el tsunami de 2010 con diferentes tratamientos de remediación.

Fig. 8. Soil acidity (pH) in a Typic Palexerults flooded by the 2010 tsunami under different soil remediation treatments.

T1: Testigo; T2: CaCO_3 ; T3: Yeso; T4: Compost; T5: Lavado; T6: Yeso + Lavado; T7: AG Sil 21; T8: PERL HUMUS 60 G y T9: DISPER Alghum GS.

partículas del suelo, derivadas de la disociación de iones H^+ desde grupos OH^- de la materia orgánica (Zhang et al., 2007). En el caso de AG Sil 21, este contiene silicato de potasio que ayuda a las plantas a aumentar la tolerancia a la sal por mayor absorción de potasio, mejorando la relación K^+/Na^+ en las células de las plantas (Lai et al., 2014).

CONCLUSIONES

Los tratamientos de remediación aplicados en un suelo inundado por el tsunami mostraron efectos positivos en la producción de biomasa y propiedades químicas. El compost, yeso + lavado y DISPER Alghum GS presentaron los mejores resultados en la producción de materia seca. Lavado, AG Sil 21 y PERL HUMUS 60 G disminuyeron la conductividad eléctrica, bajo el nivel que afecta la producción agrícola. El tratamiento de yeso + lavado presentó la mayor disminución de la concentración de sodio. Esta investigación demuestra que la producción agrícola de los suelos afectados por el tsunami se pueden recuperar en menor tiempo con aplicación de enmiendas orgánicas, lavado y yeso + lavado. Sin embargo, se requieren estudios de campo para validar estos resultados evaluando las enmiendas de mejor comportamiento.

LITERATURA CITADA

- Ali, A., S. Basra, S. Hussain, and J. Iqbal. 2012. Increased growth and changes in wheat mineral composition through calcium silicate fertilization under normal and saline field conditions. *Chilean J. Agric. Res.* 72(1):98-103.
- Amezketta, E. 2007. Use of an electromagnetic technique to determine sodicity in saline-sodic soils. *Soil and Use Management* 23(3):278-285.
- Asghar, H.N., R. Setia, and P. Marschner. 2012. Community composition and activity of microbes from saline soils and non-saline soils respond similarly to changes in salinity. *Soil Biology and Biochemistry* 47:175-178
- Aydin, A., C. Kant, and M. Turan. 2012. Humic acid application alleviate salinity stress of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants decreasing membrane leakage. *African J. Agric. Res.* 7(7):1073-1086.
- Balzarini, M.G., L. González, M. Tablada, F. Casanoves, J.A. Di Rienzo, y C.W. Robledo. 2008. Infostat: software estadístico: manual del usuario. Versión 2008. Brujas. Córdoba, Argentina.
- Chaganti, V.N., D.M. Crohn, and J. Simunek. 2015. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agric. Water Manage.* 158:255-265.

- Choudary, O.P., B.S. Ghuman, Bijay-Singh, N. Thuy, and R.J. Buresh. 2011. Effects of long-term use of sodic water irrigation, amendments and crop residues on soil properties and crop yields in rice-wheat cropping systems in a calcareous soil. *Field Crop Res.* 121(3):363-372.
- Clark, G.J., N. Dodgshun, P.W.G. Sale, and C. Tang. 2007. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 39(11):2806-2817.
- Del Pozo, A., y P. del Canto. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N° 113. INIA Quilamapu, Chillán, Chile.
- Ghollorata, M., and F. Raiesi. 2007. The adverse effects of soil salinization on the growth of *Trifolium alexandrinum* L. and associated microbial and bicochemical properties in a soil from Iran. *Soil Biology and Biochemistry* 39(7):1699-1702.
- Güler, M., H. Arslan, B. Cernek, and S. Ersahin. 2014. Long-term changes in spatial variation of soil electrical conductivity and exchangeable sodium percentage in irrigated mesic ustifluvents. *Agric. Water Manage.* 135:1-8.
- Lai, D., Y. Mao, H. Zhou, F. Li, M. Wu, J. Zhang, et al. 2014. Endogenous hydrogen sulfide enhances salt tolerance by coupling the reestablishment of redox homeostasis and preventing salt-induced K⁺ loss in seedlings of *Medicago sativa*. *Plant Science* 225:117-129.
- Lakhdar, A., R. Scelza, R. Scotti, M.A. Rao, N. Jedidi, L. Gianfreda, et al. 2010. The effect of compost and sewage sludge on soil biologic activities in salt affected soil. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 10(1):40-47.
- Lobell, D.B., J.I. Ortiz-Monasterio, F. Cajigas, and L. Valenzuela. 2007. Identification of saline soils with multiyear remote sensing of crop yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(3):777-783.
- Madariaga, R., M. Métois, C. Vigny, and J. Campos. 2010. Central Chile finally breaks. *Science* 328(5975):181-182.
- Mahmoodabadi, M., N. Yazdanpanah, L. Rodriguez, E. Pazira, and A. Meshat. 2013. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (1) Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agric. Water Manage.* 120:30-38.
- Mohajer, P. 2012. Influence of leaching and chemical amendments on chemical properties of a heavy textured saline-sodic soil. *Annals of Agrarian Science* 10(1):48-53.
- Qadir, M., J.D. Oster, S. Schubert, A.D. Noble, and K.L. Sahrawat. 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Adv. Agron.* 96:197-247.
- Raats, P.A.C. 2015. Salinity managements in the coastal region of the Netherlands: A historical perspective. *Agric. Water Manage.* 157:12-30.
- Rousk, J., F.K. Elyaagubi, D.L. Jones, and D.L. Godbold. 2011. Bacterial salt tolerance is unrelated to soil salinity across an arid agroecosystem salinity gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9):1881-1887.
- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores, y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: revisión 2006. Serie Actas INIA N° 34. INIA La Platina, Santiago, Chile.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físico de suelos. 80 p. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile.
- Setia, R., P. Marschner, J. Baldock, D. Chittleborough, P. Smith, and J. Smith. 2011. Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9):1908-1916.
- Stolpe, N. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile. 84 p. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Tejada, M., C. García, J.L. González, and M.T. Hernández. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38(6):1413-1421.
- Vigny, C., A. Socquet, S. Peyrat, J.C. Ruegg, M. Métois, R. Madariaga, et al. 2010. The 2011 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored GPS. *Science* 332(6036):1417-1421.
- Vukadinovic, V., and Z. Rengel. 2007. Dynamics of sodium in saline and sodic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38(15-16):2077-2090.
- Yan, N., and P. Marschner. 2012. Response of microbial activity and biomass to increasing salinity depends on the final salinity, not the original salinity. *Soil Biology and Biochemistry* 53:50-55.
- Zhang, J-E., Y. Ouyang, and D-J. Ling. 2007. Impacts of simulated acid rain on cation leaching from Latosol in south China. *Chemosphere* 67:2131-2137.