

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE UNA ENMIENDA CÁLCICA-ORGÁNICA EN
ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO Y AGUA DE RIEGO
AFECTADOS POR UN TSUNAMI EN LA REGIÓN DEL MAULE**

IRENE ANDREA OYARZÚN ROJAS

Santiago, Chile.

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE UNA ENMIENDA CÁLCICA-ORGÁNICA EN
ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO Y AGUA DE RIEGO
AFECTADOS POR UN TSUNAMI EN LA REGIÓN DEL MAULE**

**EFFECT OF THE APPLICATION OF A CALCIC-ORGANIC AMENDMENT IN
SOME CHEMICAL PROPERTIES OF A SOIL AND IRRIGATION WATER
AFFECTED BY A TSUNAMI IN THE MAULE REGION**

IRENE ANDREA OYARZÚN ROJAS

Santiago, Chile.

2013

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

**EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE UNA ENMIENDA CÁLCICA-ORGÁNICA EN
ALGUNAS PROPIEDADES QUÍMICAS DE UN SUELO Y AGUA DE RIEGO
AFECTADOS POR UN TSUNAMI EN LA REGIÓN DEL MAULE**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniera Agrónoma

IRENE ANDREA OYARZÚN ROJAS

	Calificaciones
ProfesoresGuías	
Sr. Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M.S.	6,7
Sr. Osvaldo Salazar G. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph.D.	6,7
ProfesoresEvaluadores	
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8
Sra. Paola Silva C. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc. Dr.	5,9

Santiago, Chile.

2013

AGRADECIMIENTOS

El cierre de un ciclo se acerca y no soy menos ni más por agradecer.

Agradecida estoy de la gente que me quiere, me ayuda y me guía.

Mi familia: mi mamá, mi papá, el Gonzalo (gran aporte al desarrollo de este trabajo), la Carmen, mis tres hermanos, mi abuela en el cielo y mi abuela en la tierra, les agradezco y les quiero.

Mis amigos que me acompañan y me enseñan, a la Pauli por sobre todo le agradezco. Mis amigos-tíos: La mono y el negro, tanto cariño y comprensión.

Por supuesto a mis profes, Osvaldo y Manuel, por su paciencia, apoyo, buena voluntad, tiempo y disposición.

A seres que aparecen de pronto y te ayudan, como Felipe y Patricio de AGRIMED.

Agradecida estoy, de ver, de oler, de escuchar, de aprender, de estar viva, sana y feliz.

INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
ANTECEDENTES PREVIOS DE SUELOS Y AGUAS	12
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
BALANCE HÍDRICO.....	16
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO.....	18
<i>Reacción del suelo</i>	19
<i>Conductividad eléctrica</i>	22
<i>Materia orgánica</i>	23
<i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	24
<i>Contenido de cationes solubles en los suelos</i>	26
<i>Calcio</i>	26
<i>Magnesio</i>	29
<i>Sodio</i>	29
<i>Potasio</i>	31
<i>Contenido de aniones en los suelos</i>	31
<i>Cloruro</i>	32
<i>Carbonatos</i>	34
<i>Bicarbonatos</i>	34
<i>Sulfatos</i>	34
<i>Relación de adsorción de sodio</i>	36
<i>Propiedades químicas del agua</i>	38
RECOMENDACIONES PARA LA REHABILITACIÓN DE UN SUELO AFECTADO POR TSUNAMI ...	41
CONCLUSIONES.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS	49
ANEXO I	50
<i>Composición de las enmiendas</i>	50
ANEXO II.....	51
<i>Propiedades físicas de los suelos</i>	51
ANEXO III.....	52

<i>Descripción morfológica general de los suelos</i>	52
ANEXO IV	53
<i>Análisis químicos de suelo realizados en 2010</i>	53
ANEXO V	54
<i>Rangos de interpretación de parámetros en estudio</i>	54
ANEXO VI	56
<i>Guía de interpretación de parámetros de calidad de agua para riego según FAO. (Ayers y Westcot, 1987)</i>	56
ANEXO VII.....	57
<i>Rangos normales de las propiedades evaluadas en aguas de riego(Ayers y Westcot, 1987).</i>	57
ANEXO VIII.....	58
<i>Comentarios acerca de constituyentes químicos de aguas(modificado de Duncan et al., 2009).</i>	58

RESUMEN

Los fenómenos de alza en los niveles de agua de mar generan salinización de suelos agrícolas, haciendo necesario realizar lavados y aplicación de enmiendas.

El estudio se realizó en Lipimávida, ubicado en la costa norte de la Región del Maule, Chile. Se evaluaron propiedades químicas y fisicoquímicas en el suelo y agua de pozo de un predio cultivado con papayos (*Vasconcellea cundinamarcensis* B.) afectado por el tsunami de Febrero de 2010. Se evaluaron tres situaciones de suelo (tratamientos) a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm): la situación testigo (T0) que corresponde al suelo no afectado por el fenómeno; el suelo inundado con agua de mar (T1) y el suelo inundado por el mar y con aplicación de enmienda y lavado (T2). La aplicación del acondicionador durante el año 2010, consistió en una enmienda cálcica-orgánica. Se realizaron previamente mediciones (año 2010) que se utilizan en este estudio para establecer la tendencia de los parámetros en el tiempo. Los resultados indican que T1, a dos años de la inundación, se encuentra restaurado en cuanto al nivel de sales y concentración de cationes, en comparación a T0. El tratamiento con enmiendas (T2) presentó en el intervalo 20-40 cm una RAS de 19,9, estableciendo problemas de sodicidad. Se sugiere que esta condición puede atribuirse a un efecto combinado del agua de riego y el manejo agrícola que lleva este tratamiento.

Palabras clave: Tsunami, enmienda orgánica-cálcica, propiedades químicas, RAS.

ABSTRACT

The phenomena of rising sea water levels generate salinization of agricultural soils, making necessary washing irrigations and amendments applications. The study was conducted in Lipimávida, located on the north coast of the Maule Region, Chile. There were evaluated chemical and physico-chemical properties in the soil and water well of a cultivated site with papaya (*Vasconcellea cundinamarcensis* B.) affected by the tsunami of February 2010. There were evaluated three situations of soil (treatments) at two depths (0-20 and 20-40 cm): the control situation (T0) corresponding to the soil unaffected by the phenomenon; the soil flooded with sea water (T1) and the flooded soil conditioned with amendments and washing irrigations (T2). The application in 2010 consisted of a calcium-organic amendment plus another purely organic. Measurements were previously performed (2010) and used in this study to determine the trend of parameters over time. The results indicate that T1, two years after the flood is restored in the level of salts and cations concentrations, compared to T0. Amendments treatment (T2) presented in the range 20-40 cm, a SAR of 19.9, setting sodicity problems. It is suggested that this condition is possible to attribute to a combined effect of the irrigation water and the agricultural management in this treatment.

Key words: Tsunami, calcic-organic amendment, chemical properties, SAR.

INTRODUCCIÓN

En Chile se verifican algunos de los terremotos más grandes del mundo; en promedio, un terremoto de magnitud 8 grados Richter se produce cada 10 años aproximadamente. Estos terremotos se producen en la zona de subducción, ya sea como rupturas interplaca en la interfase entre las placas de Nazca y Sudamericana o eventos intraplaca en la placa de Nazca subducida. Un par de veces en cada siglo, masivos terremotos rompen varios cientos de kilómetros en un solo choque de placas provocando riesgos de tsunami. En este sentido, Kulikov *et al.* (2005) y Rabinovich *et al.* (2001) estiman, en un estudio de riesgo de tsunami para Chile y Perú, que eventos de 13 m corresponden a un período de retorno de 50 años y uno de 25 m a un período de retorno de 100 años. Sin embargo, un estudio de Fritz *et al.* (2011) precisa que el tsunami del 2010 alcanzó un punto máximo de 29 m en un acantilado costero en Constitución, con variaciones significativas a escalas locales y regionales.

El terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010, alcanzó una magnitud de 8,8 grados Richter con epicentro en la Región del Maule. Ocurrió a una profundidad de 35 km, con una duración de 3 minutos (USGS, 2012) y un costo estimado de US\$30 bn (Kron, 2013). Esta Región había experimentado un terremoto de subducción importante en 1835, cuando Darwin visitó la zona como parte de su viaje en el Beagle. Su descripción del terremoto inspiró a muchos sismólogos e historiadores de los terremotos chilenos (Madariaga *et al.*, 2010). Asimismo en la historia, Chile ostenta el registro más elevado de eventos de este tipo, con una magnitud de 9,5 grados Richter el 22 de Mayo de 1960, cuyo tsunami alcanzó una altura de 25 m (Bryant, 2008).

El sismo del 2010 provocó un violento tsunami en la zona centro sur del país, devastando varias localidades y provocando cientos de muertes y damnificados. Además de afectar la actividad económica, afectó una indeterminada superficie de suelos con uso productivo debido al ingreso de agua de mar al territorio, lo cual acrecentó el problema de los damnificados dedicados a actividades silvoagropecuarias. En este sentido, Scheffers *et al.* (2012) señalan que las personas, la infraestructura y la economía de zonas costeras son potencialmente vulnerables a peligros naturales oceánicos tales como tormentas o tsunamis con efectos devastantes mostrados por el huracán Katrina en EUA (2005), el ciclón Yasi (Australia, 2011), el tsunami de India (2004) o el poderoso tsunami que azotó a Japón en Marzo del 2011.

Entre las consecuencias del ingreso de agua de mar en predios agrícolas, se destacan procesos de degradación del suelo y del agua (Casanova, 2010). En el suelo, los efectos van desde cambios en el perfil (sepultado con barro y escombros), a cambios en propiedades químicas, fisicoquímicas y físicas de los suelos. En este sentido, se han estudiado los depósitos dejados por el tsunami de Febrero de 2010, y en términos de espesor éstos tuvieron una media de 25 cm, llegando hasta 76 cm en la zona de Constitución (35°19'S 72°25'O), estando constituidos principalmente de partículas tamaño arena (Horton *et al.*, 2011; Morton *et al.*, 2011). Es importante destacar que los tsunamis no dejan depósitos en la totalidad del área que se inunda, pero inyectan al territorio arenas con altas concentraciones de potasio (K), magnesio (Mg) y sodio (Na) elemental (Shanmugam, 2012). Un estudio reciente realizado en Japón y en Chile (Yoshii *et al.*, 2012) comparó las propiedades químicas de suelos inundados con los sedimentos dejados por el tsunami y, en ambos casos, se evidenciaron este tipo de variaciones.

En términos químicos se ha informado un aumento en los contenidos de sales y particularmente de Na, incremento en los niveles de otros cationes, variaciones de pH, cambios en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cambios en los niveles de macronutrientes (N, P y K) en los suelos (Chaudhary *et al.*, 2006; McLeod *et al.*, 2010; Nayak *et al.*, 2010). También se evidencian variaciones en los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS), ya sea disminuciones debido al lavado del suelo provocado por la inundación (Chaudhuri *et al.*, 2009) o aumento debido a la depositación de sedimentos marinos.

En Chile, Sandoval *et al.* (2010, 2013) evaluaron en términos químicos un suelo de la Comuna de Coliumo (Región del BíoBío; 36°32'18"S 72°57'39"O) afectado por el tsunami del 2010. Los autores destacan un alza significativa en la conductividad eléctrica (CE), Na⁺ soluble y los contenidos de sulfato (SO₄²⁻), además de una disminución de pH, lo que en conjunto provocó la pérdida total de los cultivos de la zona. Demuestran además, a nivel de laboratorio, que es posible acelerar la habilitación de estos suelos con distintas enmiendas.

En términos físicos, debido al aumento de la concentración de Na, se estima que puede existir una degradación física de suelo, dado el efecto dispersante de arcillas y agregados por este ión, tanto en el suelo original como en los sedimentos dejados por el tsunami. Lo anterior puede generar una disminución de la conductividad hidráulica, una restricción en el drenaje y/o un posible anegamiento (Chaudhary *et al.*, 2006; Havlin *et al.*, 2005). Por otra parte, Morton *et al.* (2011) señalan que el tsunami en Chile, debido a la erosión y sedimentación, también provocó cambios en la topografía superficial de la costa, además de un desplazamiento de la ciudad de Concepción (36°49'S 73°3'O) de 3 m hacia el oeste (Yin *et al.*, 2011).

En cuanto a las características del agua usada para riego, en zonas afectadas por tsunamis, se ha informado una disminución en su calidad (Chaudhary *et al.*, 2006; Swamy *et al.*,

2006; Chandrasekharan *et al.*, 2008; Kumea *et al.*, 2009; Raja *et al.*, 2009). Las manifestaciones de esto se vinculan a un aumento de su salinidad y de iones específicos (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} y HCO_3^-), cambios en el pH, incremento en su turbiedad y decrecimiento de sus niveles de oxígeno; también se han observado incrementos en la concentración de varios otros elementos (As, Mn, Fe y B), así como de bacterias y coliformes.

En Chile, un país relativamente agrícola y proclive a desastres naturales de este tipo, se hace necesario contar con información específica del comportamiento de un suelo agrícola ante estos eventos de la naturaleza, que precise cómo cambian sus propiedades a través del tiempo, qué factores ayudan a su rehabilitación y qué opciones de manejo existen.

Cabe destacar que la velocidad de recuperación de un suelo afectado por sales está directamente relacionada con el tipo de suelo, principalmente relacionado con el movimiento de agua en el perfil (Havlin *et al.*, 2005). Las precipitaciones se vuelven fundamentales para el lavado de sales, así como también el agua de riego, que debe ser necesariamente de buena calidad. En India y en Tailandia, varios autores (Chandrasekharan *et al.*, 2008; Szczucinski *et al.*, 2007; Kumea *et al.*, 2009; Raja *et al.*, 2009) señalan que luego de uno a dos años de ocurrido el tsunami del año 2004, los niveles de sales iniciales de los suelos fueron restituidos debido a la alta pluviometría presente (1200 mm anuales); sin embargo, si bien se redujo la concentración de sales, no ocurrió lo mismo con la concentración de metales pesados dejados por el maremoto.

En conjunto con la alternativa de realizar un lavado artificial de sales, puede resultar necesaria la aplicación de algún tipo de enmienda cálcica, donde el calcio soluble induce una reacción de intercambio catiónico con el sodio, el cual es desplazado y luego lixiviado mediante drenaje interno (Benavides, 1991; Havlin *et al.*, 2005).

Otra opción de manejo agronómico es el establecimiento de especies resistentes a la salinidad (Reichenauer *et al.*, 2009). Los cultivos presentan distintas sensibilidades a un exceso de sales, es decir, diversa tolerancia a estas condiciones de degradación química de suelos. Rhoades *et al.* (1992) presenta la ecuación 1 para estimar el rendimiento relativo (*RR*) de cada especie, en función de la conductividad eléctrica (*CE*) del suelo.

$$RR = [(CEe - C_t) \cdot S] \quad (1)$$

Donde C_t es el valor de *CE* umbral o tolerado por la especie, *CEe* es el valor de salinidad promedio en la zona de raíces y *S* es la pendiente de la curva (Figura 1), que denota la sensibilidad de la especie a cambios en el contenido de sales, o bien, el porcentaje de rendimiento esperado que se reducirá por cada dS m^{-1} por sobre la C_t .

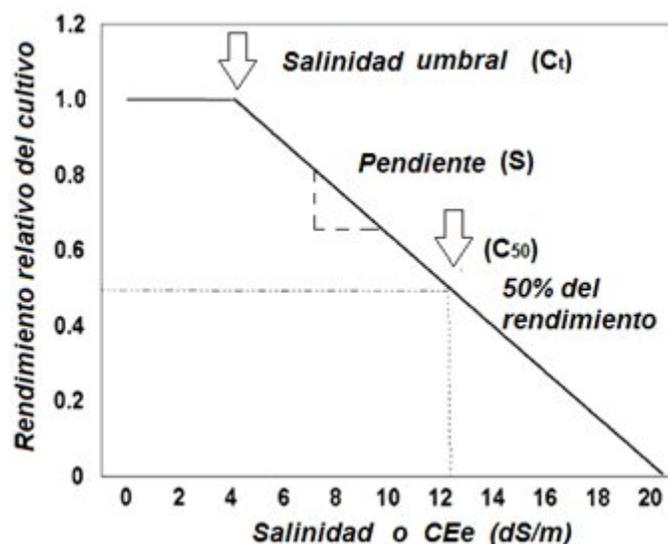


Figura 1. Respuesta de un cultivo a la salinidad (adaptada de Rhoades *et al.*, 1992)

Durante los últimos dos años se ha desarrollado un estudio piloto por el Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. En este estudio se han monitoreado varias propiedades de un suelo ubicado en la costa de la Región del Maule (Lipimávida; 34° 51' S y 72° 09' O), donde un pequeño productor perdió parte de su plantación de papayos (*Vasconcellea cundinamarcensis* B.) por arrastre del material vegetal al océano y, del que quedó en el predio por muerte de casi la totalidad de las plantas, además de un deterioro de la calidad de aguas de pozo.

Se plantea como hipótesis de esta memoria que un suelo afectado por un tsunami, en una región de clima Mediterráneo, recuperará más rápidamente sus propiedades químicas y fisicoquímicas originales por la aplicación *in situ* de una enmienda cálcica-orgánica que por efecto de las lluvias invernales.

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación combinada de una enmienda cálcica junto con las precipitaciones de dos inviernos, en las propiedades químicas y fisicoquímicas de un suelo afectado por tsunami.

Objetivos específicos

- Comparar y explicar los cambios ocurridos, en términos químicos, entre las tres condiciones de suelo: no afectado por tsunami, afectado por tsunami y afectado por tsunami con aplicación de enmiendas.
- Comparar los resultados de este estudio con los análisis previos de suelo y agua, para definir las tendencias de los parámetros medidos en el tiempo de acuerdo al tipo de manejo realizado.
- Caracterizar la calidad de aguas de pozo de la zona afectada por el tsunami y los cambios ocurridos a través del tiempo en sus propiedades químicas.
- Establecer la relevancia de la aplicación combinada de una enmienda cálcica-orgánica en el suelo afectado por tsunami, para establecer recomendaciones para la rehabilitación del suelo en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la localidad de Lipimávida (34° 51' S y 72° 09'O), comuna de Licantén, provincia de Curicó en la Región del Maule de Chile. Se evaluó el suelo y el agua de pozo de un predio ubicado a 100 m del borde costero, que fue inundado por el tsunami en Febrero de 2010. El predio presentaba una plantación de papayos (*Vasconcellea cundinamarcensis* B.) que en gran parte de su superficie fue seriamente afectada por el evento, determinando que el año 2011 el agricultor decidiera extraer los papayos de la zona afectada.

Los suelos del sector, según CIREN (1997), se posicionan cartográficamente en terrazas aluviales no diferenciadas con clase textural superficial franco arenosa, moderadamente profundas, planas y casi planas, con ligero microrelieve y drenaje excesivo.

El predio se encuentra dentro del distrito agroclimático Litoral Llico, que ocupa una faja litoral bastante estrecha al norte de la desembocadura del río Maule. Presenta un clima Mediterráneo con temperaturas promedio de 10 a 18°C y precipitaciones de 741 mm anuales, distribuidas principalmente entre los meses de mayo y septiembre. La evapotranspiración potencial (ET_0) anual es de 739 mm. Presenta una influencia marina muy marcada con una reducida oscilación térmica, donde la temperatura máxima media del mes más cálido es de 24 a 25°C. Así mismo, el período libre de heladas es de 365 días y la temperatura mínima media en invierno es de 5°C. Durante los meses de invierno la ET_0 decrece y las precipitaciones aumentan de modo que cubren el 100% de los requerimientos hídricos de los cultivos. Durante los meses estivales las precipitaciones son inferiores a la ET_0 apareciendo un déficit hídrico que limita los rendimientos si no se cuenta con riego (Santibañez *et al.*, 1979).

En este estudio se evaluaron tres situaciones (tratamientos) generadas por el efecto del tsunami y las prácticas de rehabilitación (Cuadro 1).

Las enmiendas empleadas son CUTSALT® (cálcica-orgánica) y SUPERSOIL® (orgánica), que fueron aplicadas durante el año 2010 en momentos y dosis detalladas más adelante. En Anexo I incluye las principales características de estos productos comerciales, acorde a su ficha técnica.

Cuadro 1. Características de los tratamientos evaluados en un suelo del litoral de la Región del Maule.

Tratamiento	Afectado por tsunami	Enmiendas	Uso/cultivo actual
T0	No	No	<i>Vasconcellea cundinamarcensis</i> B.
T1	Si	No	Barbecho
T2	Si	Si	<i>Solanum tuberosum</i>

En Junio de 2012 se recolectaron muestras de suelo a dos profundidades (0-20 y 20-40 cm) desde calicatas en tres puntos distintos dentro de cada tratamiento. Los análisis de suelo se realizaron en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, perteneciente al Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

En estas muestras de suelo se procedió a determinar el pH en agua (1:1), mediante potenciometría, utilizando un pHmetro digital (Hanna Instrument modelo HI3221), conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación mediante un conductivímetro (Hanna Instrument modelo HI4321) y los niveles de materia orgánica del suelo (MOS) por oxidación vía húmeda con $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$. Los contenidos de cationes solubles (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+) se obtuvieron mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) en el extracto de saturación, con Lantano para el Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) y con fometría de llama para el Sodio (Na^+) y Potasio (K^+). Los contenidos de carbonato y bicarbonato se determinaron también en el extracto de saturación por titulación potenciométrica con ácido sulfúrico. El contenido de cloruros se obtuvo del extracto de saturación y posterior determinación por titulación manual con nitrato de Plata, y los contenidos de sulfatos se determinaron desde el extracto de saturación mediante colorimetría con cromato de Bario. Todos estos análisis fueron realizados de acuerdo a los métodos propuestos por la Comisión Nacional de Acreditación de Laboratorios de Suelos (Sadzawka *et al.*, 2006).

Por otra parte, la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó con acetato de amonio a pH 7,01 y 1 M (Dewis y Freitas, 1970).

La relación de adsorción de sodio (RAS) es un parámetro que relaciona la concentración de Na^+ soluble y la concentración de cationes divalentes solubles, Ca^{+2} y Mg^{+2} , en la solución del suelo, permitiendo establecer si es que existen problemas de sodicidad en el suelo. Los suelos con una RAS mayor a 13, que por lo general tienen un pH superior a 8,5, son clasificados como sódicos (SSSA, 2008). La ecuación con la que se calcula (ecuación 2) utiliza las concentraciones de cationes solubles en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

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

Asimismo, se tomaron muestras de agua de (Junio de 2012) de los dos pozos ubicados en el huerto afectado. Se extrajo 1 lt de agua de cada pozo en botellas plásticas previamente lavadas, aptas para este fin, las que fueron refrigeradas y transportadas para ser analizadas en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de dicha Facultad. En estas muestras se determinó pH, CE, los contenidos de cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) y aniones (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^- y SO_4^-) solubles, de acuerdo a Sadzawka (2006). Además se evaluó la turbiedad por nefelometría (NTU) de acuerdo a EPA (1993) mediante un turbidímetro (Hanna Instrument modelo HI83414), mientras que los niveles de oxígeno disuelto se determinaron *in situ* con un medidor portátil (Hanna Instruments, HI9146.).

El carbonato de sodio residual (*CSR*) es un parámetro del agua que determina si existirá Ca^{+2} y Mg^{+2} en la solución suelo después de reaccionar con carbonatos y bicarbonato presentes en el agua o que, por el contrario, precipitarán por completo luego del riego (ecuación 3). Un *CSR* negativo significa que un exceso de Ca^{+2} y Mg^{+2} queda disponible para desplazar el Na^+ . En cambio, un *CSR* positivo significa que todo el Ca^{+2} y Mg^{+2} precipitan, quedando un exceso de carbonatos y bicarbonatos que pueden reaccionar con el Ca^{+2} añadido al suelo (enmiendas). Lo anterior, se traduce en una reducción de las concentraciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} soluble (asociado a carbonatos y bicarbonatos), dejando Na^+ soluble para crear condiciones sódicas en el suelo (Eaton 1950, citado por Duncan *et al.*, 2009).

$$CSR = (CO_3^{-2} + HCO_3^{-}) - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \quad (3)$$

En términos físicos, se determinó solo la densidad aparente del suelo (*Db*) con cilindros (Sandoval *et al.*, 2012), sin repeticiones, contándose con información previa para caracterizar el sitio (Anexo II).

Antecedentes previos de suelos y aguas

Se dispone de la información de análisis de suelo y aguas realizados con posterioridad al tsunami, en el año 2010. En el Cuadro 2, se detalla la fecha en que se realizaron, la

condición de suelo evaluada y los análisis efectuados. Se incluye en el Anexo III la descripción morfológica del perfil de los suelos del área en estudio.

Cuadro 2. Actividades y análisis en el tiempo realizados en un suelo y/o agua de riego de un predio del litoral de la Región del Maule.

Fecha	Actividad	Tratamiento	Análisis en laboratorio
Abril 2010	Descripción morfológica del suelo (Anexo III) y muestreo de horizontes genéticos.	T0 y T1	Suelo: pH, CE, MO, CIC, iones solubles
	Toma de muestras de agua de pozos		Agua: pH, CE, iones solubles
Abril-Julio 2010	Aplicación de CUTSALT (30 L ha ⁻¹) y SUPERSOIL (12 L ha ⁻¹), en 5 oportunidades (30/04, 11/05, 19/05, 28/05 y 07/06), vía riego.	T2	
Julio 2010	Toma de muestras de suelo a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad		Suelo: pH, CE, MO, CIC, iones solubles
Diciembre 2010	Toma de muestras de suelo a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad.	T0 y T2	Suelo: pH, CE, MO, CIC, iones solubles, textura, curvas pF, Db y Dp (Anexo II y IV)
	Toma de muestras de agua de pozos		Agua: pH y CE.

Para evaluar el efecto de las precipitaciones en el sitio estudiado, se utilizó la información (fecha y montos) de la estación meteorológica más cercana, durante el período 2010-2012. Esta estación pertenece a la Dirección General de Aguas y se ubica en Curicó en la Región del Maule (34°58'S, 71°14'O). Adicionalmente, se utilizaron datos climáticos de la estación Isla Marchant (34°56'1,6"S, 71°15'20,4"O) cercana a Curicó, para estimar la evapotranspiración de cultivo (ET_c) de acuerdo a ecuación 4 definida por Allen *et al.* (1998):

$$ET_c = ET_o \cdot kc \quad (4)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia estimada con la ecuación de Penman-Monteith (ecuación 5) y kc es el coeficiente del cultivo.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (5)$$

En esta fórmula Rn se refiere a la radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹), G indica el flujo de calor desde el suelo (MJ m⁻² día⁻¹), T es la temperatura media del aire

(°C) y u_2 es la velocidad del viento (m s^{-1}), ambos parámetros medidos a 2 m de altura. La expresión ($e_s - e_a$) es el déficit de presión de vapor (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) y γ se refiere a la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Para determinar el kc se consideró el ciclo de cada cultivo y las etapas de desarrollo, tanto de papas, como de papayos y de suelo desnudo¹.

Para estimar el volumen de agua aplicada como riego, se determinó mediante la diferencia entre ET_c y precipitación mensual (P), con una eficiencia de 0,9 para riego por goteo (papayos) y 0,45 para riego por surcos (papas).

Utilizando los aportes (precipitación y riego) y pérdidas (ET_c) de agua se estableció un balance hídrico en cada tratamiento, donde se asumió que dadas las propiedades y la posición en el paisaje del suelo en estudio, las salidas por escurrimiento superficial, el ascenso capilar y el flujo lateral subsuperficial eran despreciables. Así se utilizó un balance hídrico simplificado (ecuación 6) para estimar las pérdidas por percolación profunda (PP):

$$PP = P + R - ET_c \quad (6)$$

donde R es la tasa de riego mensual (mm). La percolación profunda PP (mm) se analiza para evaluar su efecto en los cambios ocurridos en las propiedades de suelo y la calidad de aguas ocurridas después del tsunami. Para estimar el volumen de agua que se utilizó para el lavado de sales en T2, se utilizó la ecuación 7 que entrega la fracción extra de agua necesaria para disminuir la salinidad del suelo según el cultivo establecido:

$$RL = \frac{CE_a}{5(CE_t) - CE_a} \quad (7)$$

donde RL son los requerimientos de lixiviación mínimos para controlar las sales dentro de la tolerancia del cultivo (CE_t en dS m^{-1}) y CE_a es la salinidad del agua de riego aplicada (dS m^{-1}). Luego se considera el volumen de agua aplicado normalmente como riego para agregarle la fracción obtenida previamente (ecuación 8).

$$PA = \frac{ET_c}{1 - RL} \quad (8)$$

¹Uribe, J.M. 2013. Coeficientes de cultivo papas, papayos y suelo desnudo. [Correo]. Departamento de Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile

donde PA es la lámina de agua aplicada (mm año^{-1}) y ET_c es equivalente a la demanda anual de agua del cultivo (mm año^{-1}).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para evaluar las posibles diferencias significativas entre los tratamientos, y cuando existieron diferencias significativas, se usó la prueba de Tukey, con un $p < 0,05$.

Para definir la tendencia entre los análisis realizados en 2012 y los efectuados en 2010, se realizó una regresión lineal. Si la pendiente de la regresión es significativa, se interpretó como una tendencia en el tiempo del parámetro estudiado. Esto para la condición de suelo tratado con enmienda (T2) y para la condición de suelo no afectado por tsunami (T0). Esta prueba no se realizó para la situación de suelo afectado sin enmienda (T1), ya que solo existieron dos mediciones en el tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos de las muestras de suelo y agua colectadas en Junio de 2012, los que se complementan con los resultados obtenidos por otros estudios realizados durante el año 2010. Es importante destacar que la rehabilitación de suelos afectados por tsunami depende directamente del balance hídrico, donde el agua que percola en el perfil de suelo puede desplazar las sales solubles depositadas durante el tsunami hacia estratas más profundas.

Balance hídrico

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del balance hídrico de los tres tratamientos evaluados, para el período de Marzo 2010 a Junio de 2012. En T0, tratamiento testigo que no fue afectado por el tsunami, con plantación de papayos con riego por goteo, se determinó un volumen de percolación profunda de 597 mm. En T1, tratamiento de suelo afectado sin aplicación de enmienda ni lavados, persistió la plantación de papayos hasta Marzo de 2011, luego el suelo no se cultivó hasta la última visita en Junio de 2012. Este tratamiento presentó el menor volumen de agua lixiviado, con un 50% menos que T0. Se podría esperar que dado el bajo volumen lixiviado, este tratamiento aún presente problemas en cuanto a contenido de sales.

En T2, en el que se le realizaron sucesivos lavados y aplicaciones de las enmiendas durante el año 2010, presentó un mayor volumen de percolación (86% más que T0). Esto significa que ha existido una mayor lixiviación de sales, que se debiera reflejar en una menor CE, un menor pH y una menor concentración de iones solubles, en comparación con los demás tratamientos. En este tratamiento se mantuvo la plantación de papayos hasta marzo de 2011, pero luego se arrancaron por no recuperar un rendimiento óptimo para el agricultor. Después se sembraron papas en septiembre de 2011, las cuales se regaban por surcos. Esta situación aumentó la percolación en el tratamiento debido a la ineficiencia de este tipo de riego.

Es importante destacar que durante el año 2011, periodo en cual no se realizaron muestreos, las condiciones de manejo variaron entre los tratamientos, lo que determinó en mayor medida las diferencias en cuanto a volumen de agua percolada. Aunque en el muestreo realizado en Diciembre de 2010, último muestreo previo a este estudio, no existían variaciones entre T0 y T1 en cuanto a volumen percolado (Cuadro 4), claramente sí existieron entre T0 y T2 debido a los lavados aplicados. Como en el muestreo de Diciembre de 2010 no se analizó T1, existió una falta de información importante para establecer la velocidad de recuperación de ese tratamiento.

Cuadro 4. Balance hídrico (2010-2012), según tratamiento, litoral de VII Región de Chile.

Fecha	P*	T0			T1			T2		
		R	ETc	PP	R	ETc	PP	R	ETc	PP
-----mm-----										
mar-10	0	0	162	-162	0	162	-162	0	162	-162
abr-10	0	0	88	-88	0	88	-88	0	88	-88
may-10	45	0	40	5	0	40	5	75	40	80
jun-10	146	0	31	115	0	31	115	59	31	174
jul-10	117	0	33	84	0	33	84	0	33	84
ago-10	26	38	60	4	38	60	4	38	60	4
sep-10	16	90	96	9	90	96	9	90	96	9
oct-10	15	132	133	13	132	133	13	132	133	13
nov-10	15	195	191	19	195	191	19	195	191	19
dic-10	22	182	186	18	182	186	18	182	186	18
ene-11	10	240	226	24	240	226	24	240	226	24
feb-11	0	199	180	20	199	180	20	199	180	20
mar-11	19	151	155	15	151	155	15	151	155	15
abr-11	58	23	79	2	0	21	37	0	21	37
may-11	8	36	41	4	0	11	-3	0	11	-3
jun-11	75	0	29	46	0	8	67	0	8	67
jul-11	77	0	32	45	0	8	68	0	8	68
ago-11	150	0	50	100	0	13	137	0	13	137
sep-11	10	100	100	10	0	27	-17	72	43	40
oct-11	10	153	148	15	0	39	-29	205	102	112
nov-11	8	190	179	19	0	48	-39	379	179	209
dic-11	0	236	213	24	0	57	-57	317	142	174
ene-12	0	228	205	23	0	55	-55	0	55	-55
feb-12	2	212	192	21	0	51	-50	0	51	-50
mar-12	0	193	174	19	0	46	-46	0	46	-46
abr-12	1	100	91	10	0	24	-23	0	24	-23
may-12	81	0	41	40	0	11	70	0	11	70
jun-12	166	0	24	142	0	6	159	0	6	159
Total	1077	2696	3176	597	1227	2005	299	2333	2301	1109

* Balance hídrico según ecuación 2, donde *P* es la precipitación, *R* es el riego, *ETc* es la evapotranspiración de cultivo y *PP* es la percolación profunda.

Propiedades químicas del suelo

La compilación de los resultados de los análisis químicos de suelo realizados el año 2010 se presenta en el Anexo IV, donde se colectó una muestra por tratamiento. A continuación se discuten los resultados obtenidos en cada propiedad de suelo analizada en el muestreo de 2012 y la tendencia de cada parámetro en el tiempo.

Cuadro 5. Propiedades químicas y físico-químicas generales de los suelos, a dos profundidades, y su evolución en el tiempo.

Profundidad (cm)	Tratamiento ¹		Abr-10	Jul-10	Dic-10	Jun-12 ²	
0-20	T0*	pH	6,2	-	6,9	7,12±0,02 ab	
	T1		5,5	-	-	7,41±0,04 a	
	T2*		-	7,7	7,5	6,53±0,37 b	
20-40	T0*		7,3	-	7,1	6,36±0,33 b	
	T1		5,9	-	-	7,66±0,19 a	
	T2		-	7,2	7,9	7,53±0,31 a	
0-20	T0*		CE (dS m ⁻¹)	0,8	-	0,6	0,63±0,10 a
	T1			12,6	-	-	0,39±0,10 b
	T2*			-	1,0	1,0	0,62±0,04 a
20-40	T0*	0,5		-	0,4	0,30±0,02 b	
	T1	8,6		-	-	0,31±0,12 b	
	T2*	-		4,8	0,9	0,52±0,02 a	
0-20	T0*	MO (%)		0,6	-	0,7	1,26±0,08 a
	T1			0,9	-	-	0,76±0,09 b
	T2*			-	1,3	1,0	0,88±0,33 b
20-40	T0*		0,1	-	0,2	0,41±0,10 a	
	T1		0,5	-	-	0,55±0,41 a	
	T2*		-	0,9	0,4	0,29±0,01 a	
0-20	T0*		CIC (cmol.kg ⁻¹)	5,0	-	6,6	7,65±1,34 a
	T1			7,0	-	-	6,74±1,05 a
	T2*			-	7,1	7,8	5,86±0,34 a
20-40	T0*	4,6		-	7,4	7,56±2,67 a	
	T1	6,1		-	-	3,72±3,31 a	
	T2*	-		6,9	10,4	3,55±0,51 a	

¹(*) Indica que regresión lineal es significativa ($p < 0,05$) como para establecer una tendencia en el tiempo.

² Valor corresponde a la media de las tres repeticiones ± la desviación estándar. Letras diferentes en una columna y a la misma profundidad indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Reacción del suelo

Resultados 2012. En las mediciones realizadas en el año 2012 (Cuadro 5) se encontró que el suelo no afectado (T0) tenía en el intervalo 0-20 cm un pH neutro y no presentaba diferencias significativas ($p > 0,05$) con los otros tratamientos. El suelo afectado sin enmienda (T1) presentó un pH ligeramente alcalino y el suelo con aplicación de enmienda (T2) mostró un pH ligeramente ácido con diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ellos. En profundidad (20-40 cm) se encontró que el T0 presentó un pH ligeramente ácido, mostrando diferencias significativas ($p < 0,05$) con los otros tratamientos, los que se encontraban en un rango ligeramente alcalino.

Es importante destacar que el suelo del estudio se caracterizó por tener una textura gruesa y estar libre de carbonatos, por lo tanto su capacidad tampón es baja, y en consecuencia está sujeto a cambios temporales y rápidos en el equilibrio de iones H^+/OH^- en el suelo debido a eventos de precipitación o riegos intensos y/o aplicación de fertilizantes y/o enmiendas. Así, al final del estudio (Junio de 2012) se encontró que el suelo afectado con enmienda (T2) superficialmente (0-20 cm) presentaba un pH más ácido que el suelo afectado sin enmiendas (T1). Este hecho se podría relacionar al efecto de: i) la aplicación de la enmienda orgánica en T2, donde durante la mineralización de formas orgánicas de N se pudieron liberar iones H^+ a la solución suelo y/o ii) al mayor volumen de agua percolada y de bases (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+) lixiviadas.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Al evaluar la tendencia de la reacción del suelo desde ocurrido el tsunami (Febrero de 2010), se observó en Abril de 2010 en el intervalo de 0-20 cm, un descenso en el pH del suelo desde 6,2 (T0) a 5,5 (T1), lo que estaría relacionado con el desplazamiento de las bases en el suelo dejando el complejo de coloides del suelo dominado por iones H^+ y Al^{+3} . En este sentido, Sandoval *et al.* (2010) encontró en Coliumo (Región del BíoBío) que el suelo afectado por el tsunami de Febrero de 2010 también presentó una acidificación después de la inundación de los campos. Por otra parte, Chandrasekharan *et al.* (2008) en India, encuentran lugares donde el pH bajó y otros en que subió, por lo que no concluyen un efecto determinante por parte del fenómeno. El estudio anterior también informó que, transcurridos 6 meses desde el evento, el suelo ya se encontraba restaurado en cuanto a sus valores de pH previos al tsunami.

La enmienda calcárea en base a óxido de Ca (CaO) aplicada en T2, reaccionó provocando un aumento del pH en Julio de 2010, respecto del T1 en Abril del mismo año en ambos intervalos de profundidad muestreados. Aunque el CaO presenta una de las capacidades más altas para alcalinizar suelos, con un equivalente de basicidad residual de 179% comparado con el $CaCO_3$ (Havlin *et al.*, 2005), seis meses después de aplicada la enmienda (Diciembre de 2010) se comienza a observar un descenso en el pH en el intervalo 0-20 cm en T2, tendencia que es significativa mediante regresión lineal. Este descenso se mantiene

en el tiempo, ya que en Junio de 2012, ya ha desaparecido el efecto alcalinizante de la enmienda en el primer intervalo (Figura 2).

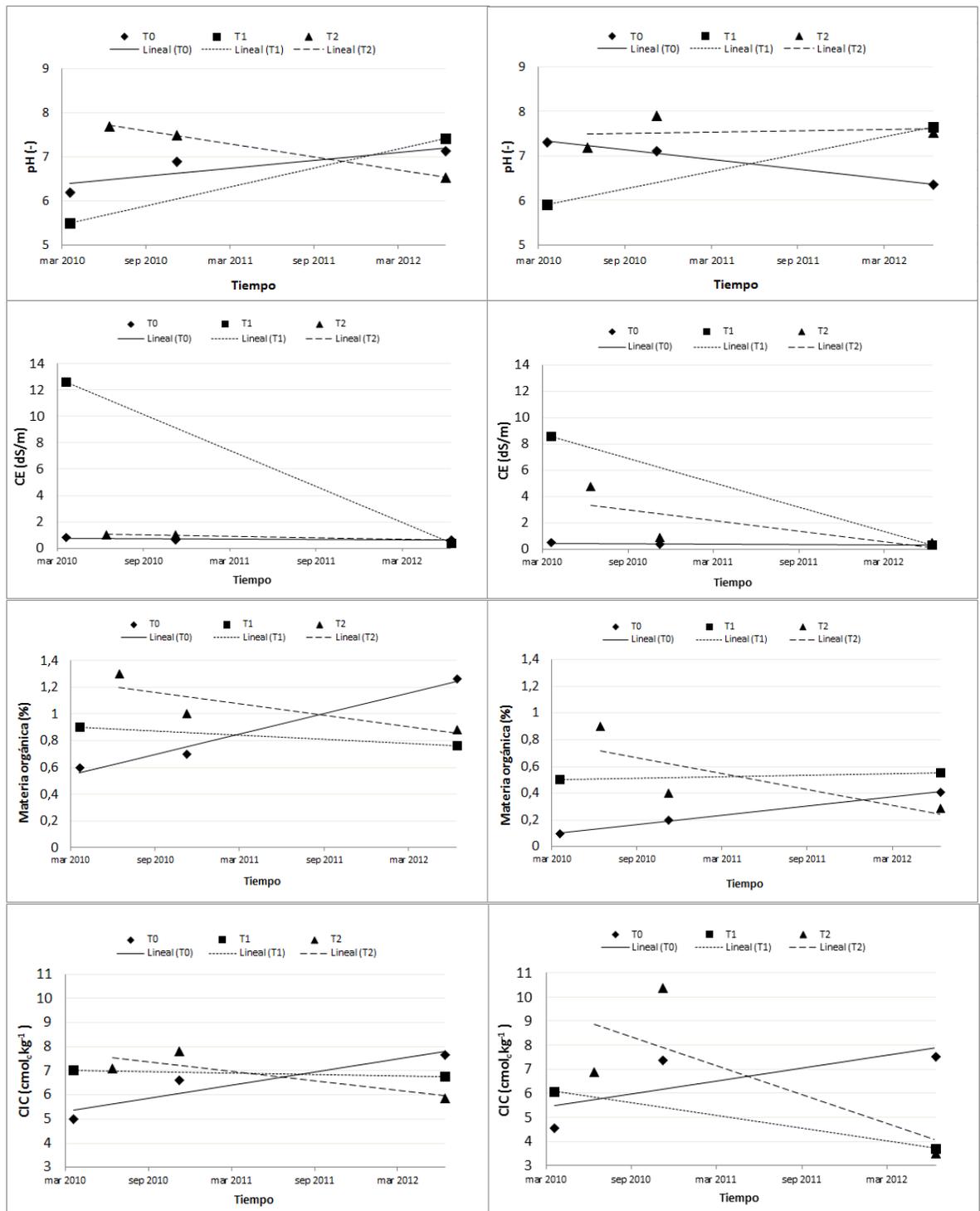


Figura 2. Variaciones en el tiempo y en profundidad, para los intervalos 0-20 cm (izquierda) y 20-40 cm (derecha), de algunas propiedades químicas y físicoquímicas de los suelos (CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónico).

Conductividad eléctrica

Resultados 2012. En las mediciones realizadas el año 2012 (Cuadro 5) se determinó que ninguno de los tratamientos presentaba problemas de salinidad ($CE < 0,75 \text{ dS m}^{-1}$; Anexo V). El suelo afectado sin enmienda (T1) en el intervalo 0-20 cm tenía la concentración más baja de sales ($0,39 \pm 0,1 \text{ dS m}^{-1}$) presentando diferencias significativas ($p < 0,05$) con los otros dos tratamientos. Esta situación contradice el supuesto de que T1, por tener un volumen bajo de agua percolada (299 mm), podría aún presentar problemas de sales. La explicación posible para esta situación, se relaciona con el agua de riego, ya que puede constituir un aporte de sales que T1 no está recibiendo en comparación con los otros dos.

En el intervalo de profundidad 20-40 cm, T2 mostró los valores más altos de CE ($0,52 \pm 0,02 \text{ dS m}^{-1}$), presentado diferencias significativas ($p < 0,05$) con T0 y T1. No obstante, estos niveles de salinidad son muy bajos.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Al evaluar la tendencia de la CE en el tiempo (Figura 2) se observó en T1 que en Abril de 2010 superficialmente (0-20 cm) hubo un aumento del contenido de sales desde niveles normales para la zona ($0,8 \text{ dS m}^{-1}$ en T0) a valores muy elevados (13 dS m^{-1}), lo que clasifica al suelo como salino. Lo anterior correspondió claramente al efecto de saturación y adsorción de cationes producto de la inundación con agua de mar. Sandoval *et al.* (2013) en una zona costera afectada por el mismo tsunami, encontró un aumento de la CE en el suelo inundado de 15,8 veces, desde 0,1 a $1,58 \text{ dS m}^{-1}$.

Sin embargo es importante destacar que en las mediciones realizadas en Julio 2010, T2 en superficie se encontraba prácticamente restaurado en cuanto a sus niveles de salinidad ($1,0 \text{ dS m}^{-1}$), lo cual se debió al efecto conjunto de la aplicación de enmiendas y el lavado de sales por riego y precipitaciones. Lo anterior concuerda con los niveles registrados en su intervalo inferior de profundidad, donde se encontraron valores más elevados ($4,8 \text{ dS m}^{-1}$) que indican movimiento de las sales en profundidad. El proceso de desplazamiento de sales se comprobó en la evaluación posterior (Diciembre de 2010), donde en ambos intervalos de profundidad se observaron descensos sostenidos de CE.

Así se evidenció que, transcurridos dos inviernos con una lluvia acumulada superior a 1000 mm, en los tratamientos T1 y T2 los valores de CE se encuentran en rangos normales para la zona ($< 1 \text{ dS m}^{-1}$). Sandoval *et al.* (2013) experimentaron con enmiendas y lavados de diferentes volúmenes de agua para recuperar el suelo y notaron que con 1100 mm ya no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE de los lixiviados del suelo sin aplicación de enmienda y los lixiviados de los suelos con aplicación.

Kumea *et al.* (2009) investigaron este efecto en suelos de la India y también registraron un aumento considerable de los niveles de salinidad, pero después de un año los valores se encontraron en niveles pre-tsunami, lo que se atribuyó también a las altas precipitaciones en la zona (1200 mm). Por otra parte, otros estudios realizados en India (Chandrasekharan *et al.*, 2008; Szczucinski *et al.*, 2007; Raja *et al.*, 2009) reportaron que el rango de tiempo que demorarían los suelos en recuperar sus niveles de sales pre-tsunami irían desde 6 meses a 2 años, dependiendo principalmente de la magnitud de las precipitaciones y de las condiciones sitio específicas.

El cultivo de papayo es moderadamente sensible a la salinidad del suelo, tolerando valores de CE de $3,7 \text{ dS m}^{-1}$ con una disminución de un 5% en su producción con respecto al rendimiento potencial (CIREN, 1989). Se establece como valor crítico $9,5 \text{ dS m}^{-1}$, ya que la producción disminuye a un 50% del rendimiento potencial (CIREN, 1989) (Figura 3). A su vez, el cultivo de papayo es sensible a mal drenaje, donde incluso períodos cortos de inundación (mayores a 8 h), pueden provocar la pudrición de la raíz y muerte de las plantas (Chan, 2009; CIREN, 1989). Estos antecedentes explicarían la muerte de los papayos después de ocurrido el evento de tsunami en esta zona el año 2010.

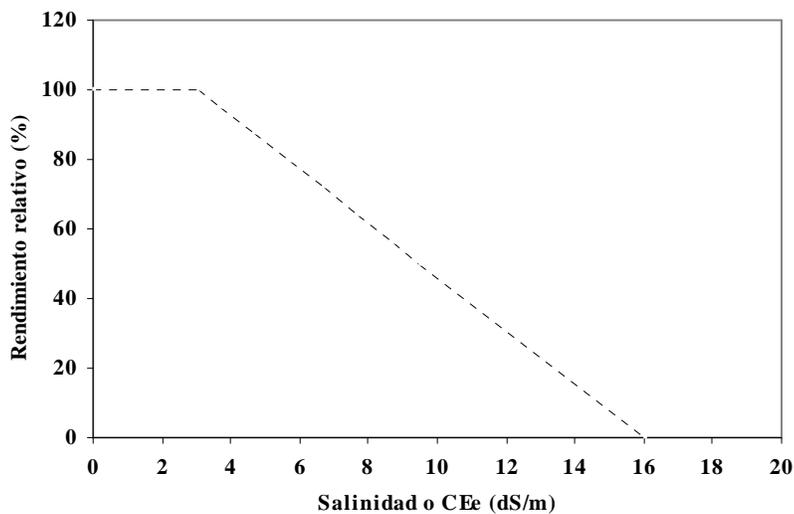


Figura 3. Rendimiento relativo del papayo (*Vasconcellea cundinamarzensis* B.) en función de la salinidad del suelo (CIREN, 1989).

Materia orgánica

Resultados 2012. Los resultados de las mediciones del año 2012 (Cuadro 5) muestran que en el intervalo de 0-20 cm el suelo no afectado (T0) es el que tenía el contenido de materia

orgánica (MO) comparativamente más alto (1,26%) pero sigue siendo un valor bajo (Anexo V), presentando diferencias significativas ($p < 0,05$) con los suelos afectados por el tsunami, que presentan valores muy bajos. Este mayor contenido de MO en superficie se explicaría porque en T0 ha persistido la plantación de papayos que aportan restos vegetales al suelo, generando un reciclaje permanente. En el intervalo de 20-40 cm, los tres tratamientos presentaron valores extremadamente bajos de MO ($< 0,7\%$), pero sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ellos.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Se observó que recién ocurrido el tsunami, se produjo un ligero aumento en el contenido de MO desde 0,6% (T0) a un 0,9% (T1). Otros estudios existentes sobre el efecto de un tsunami en el suelo en términos de contenido de MO arrojan resultados contradictorios, mientras unos reportan una disminución producto de la inundación y lavado de la fracción orgánica (Chaudhuri *et al.*, 2009) otros señalan un aumento producto de la deposición de sedimentos marinos (Chagué-Goff *et al.*, 2012). En este estudio el incremento en MO del suelo estaría relacionado al último caso mencionado, pero de todas formas correspondiendo a valores bajos.

En el testigo (T0) se evidenció un incremento de los niveles de MO en los primeros 20 cm del suelo desde 0,6% en Abril de 2010 a 1,26% en Junio de 2012 y se relacionó con el cultivo de papayos como se mencionó anteriormente.

El tratamiento con aplicación de enmienda orgánica (T2), aumentó el contenido orgánico un mes después de la aplicación, de 0,9% (Abril 2010) a 1,3% (Julio 2010), pero este aumento no se mantuvo en el tiempo debido a la mineralización de la MO, notándose ya en Diciembre de 2010 una disminución a 1% (Figura 2). Además, el aporte de MO de la enmienda (SUPERSOIL®) se puede considerar bajo dada la dosis a la que se aplica, no evidenciándose un aporte significativo en esta variable por el uso de este producto en los dos intervalos de profundidad analizados.

Capacidad de intercambio catiónico

Resultados 2012. Respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en las mediciones de esta fecha (Cuadro 5), no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos a ninguna profundidad, encontrándose en el suelo superficial valores bajos en esta propiedad mientras que en el intervalo 20-40 cm, los valores son muy bajos (Anexo V). Esto se explicaría por el contenido bajo de arcillas y los bajos niveles de MO presentes en este suelo, como se describió previamente.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Se observó que el tsunami provocó un leve aumento de la CIC, desde $5,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (T0) a $7,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (T1) en la medición realizada en Abril de 2010 (Figura 2), lo que se atribuyó al aumento en el contenido de MO que se generó debido al fenómeno.

Con la aplicación de la enmienda orgánica en T2, se produjo un ligero aumento ($0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) en la CIC superficial desde Julio a Diciembre de 2010, observándose en la medición siguiente una disminución en esta variable. La misma tendencia fue observada en el intervalo de profundidad de 20-40 cm. Por lo tanto, no se aprecia un efecto claro de la aplicación de las enmiendas, lo que se refleja en la falta de diferencias significativas en la comparación entre tratamientos en Junio de 2012 (Cuadro 8). Los resultados sugieren que las diferencias encontradas en el tiempo corresponderían a un efecto de variabilidad espacial de esta propiedad en el suelo. En este sentido, Chaudhuri *et al.* (2009) informan una leve disminución en esta propiedad luego de ocurrido el tsunami, atribuyéndola a la disminución en los niveles de MOS.

Contenido de cationes solubles en los suelos

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de los análisis de cationes básicos solubles (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+) en la solución suelo realizados a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) y su evolución en el tiempo (abril de 2010 a Junio de 2012).

Cuadro 6. Contenidos de cationes solubles en los suelos a dos profundidades y su evolución en el tiempo.

Profundidad (cm)	Tratamiento ¹		Abr-10	Jul-10	Dic-10	Jun-12 ²
0-20	T0*	Ca (mmol _c L ⁻¹)	1,0	-	1,2	1,17±0,5a
	T1		14,0	-	-	0,68±0,5a
	T2*		-	1,2	1,4	0,40±0,1a
20-40	T0*	Ca (mmol _c L ⁻¹)	0,6	-	0,6	0,44±0,2 a
	T1		17,8	-	-	0,46±0,1 a
	T2*		-	4,3	1,2	0,03±0,0 b
0-20	T0	Mg (mmol _c L ⁻¹)	1,6	-	1,5	1,66±0,3a
	T1		7,4	-	-	0,29±0,2c
	T2		-	1,0	0,6	1,12±0,2b
20-40	T0	Mg (mmol _c L ⁻¹)	0,3	-	0,7	0,51±0,1a
	T1		9,1	-	-	0,26±0,1b
	T2*		-	7,3	0,3	0,14±0,0 b
0-20	T0	Na (mmol _c L ⁻¹)	3,0	-	1,5	2,96±1,0 a
	T1		51,6	-	-	3,86±0,5a
	T2*		-	8,2	10,1	4,59±0,7 a
20-40	T0	Na (mmol _c L ⁻¹)	3,2	-	1,5	2,59±0,1 a
	T1		29,8	-	-	3,48±1,8a
	T2*		-	32,7	8,0	5,79±0,4 a
0-20	T0	K (mmol _c L ⁻¹)	1,2	-	33,7	1,35±0,3a
	T1		2,9	-	-	0,04±0,1b
	T2		-	0,3	34,0	0,94±0,2a
20-40	T0	K (mmol _c L ⁻¹)	0,2	-	23,8	0,0
	T1		1,0	-	-	0,0
	T2		-	0,2	17,4	0,0

¹(*) Indica que regresión lineal es significativa ($p < 0,05$) como para establecer una tendencia en el tiempo.

² Valor corresponde a la media de las tres repeticiones ± la desviación estándar. Letras diferentes en una columna y a la misma profundidad indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Calcio

Resultados 2012. Se encontró que en el intervalo 0-20 cm no existían diferencias significativas ($p > 0,05$) en sus concentraciones entre los tratamientos, determinándose valores bajos ($< 5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$; Anexo V) en las tres situaciones. A mayor profundidad (20-

40 cm), todos los tratamientos presentaron concentraciones bajas de Ca^{+2} , pero el suelo al cual se le aplicó una enmienda calcárea (T2) tuvo el menor valor, casi nulo, presentando diferencias significativas ($p < 0,05$) con los tratamientos T0 y T1. Los bajos valores de este catión se relacionan con la textura gruesa del suelo y las precipitaciones y/o riego que lo desplazan hacia estratas más profundas. Esto coincide con que T2 ha sido el tratamiento con mayor volumen de agua percolada durante el período en estudio.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. En el intervalo 0-20 cm de T1 se encontró en las muestras de Abril 2010 una concentración de Ca^{+2} notablemente superior al contenido encontrado en T0, lo cual se debe al ingreso del agua de mar. La misma tendencia ocurre en el intervalo 20-40 cm, encontrándose una concentración media del catión ($5 - 20 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$) Según Karleskint *et al.* (2010) el agua de mar presenta un 1,2% de ion Ca^{+2} , en base a masa, del total de iones disueltos.

En India, Chaudhary *et al.* (2006), encontraron incrementos en los contenidos de Ca^{+2} en la solución suelo después de ocurrido el tsunami. Sin embargo, Chaudhuri *et al.* (2009), en el mismo país, encontraron que el contenido de Ca^{+2} intercambiable no tuvo diferencias importantes luego de ocurrido el fenómeno.

En el muestreo de Julio 2010, en el suelo con aplicación de enmienda (T2) se observó un desplazamiento en el perfil de este catión, encontrándose una mayor concentración en el intervalo 20-40 cm (Figura 2). En Diciembre de 2010, ambas profundidades de muestreo presentaron valores bajos, demostrando un lavado efectivo del Ca^{+2} por parte de las precipitaciones y el riego (Cuadro 6).

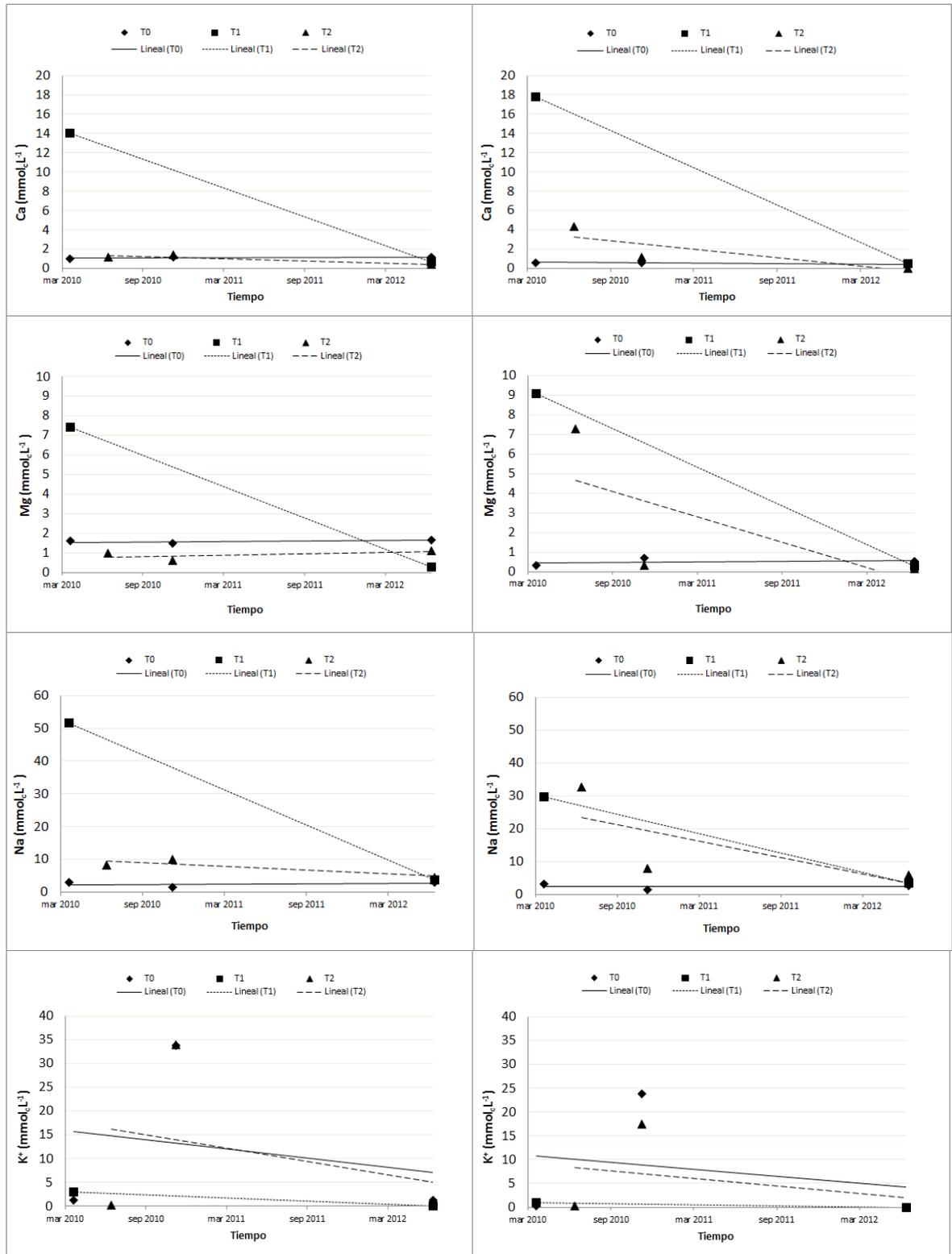


Figura 2. Variaciones en el tiempo y en profundidad, para los intervalos 0-20 cm (izquierda) y 20-40 cm (derecha), de la concentración de cationes en la solución suelo.

Magnesio

Resultados 2012. En los resultados del año 2012 (Cuadro 6), el contenido de magnesio (Mg^{+2}) en la solución suelo en el intervalo 0-20 cm, se encuentra dentro del rango normal para climas templados (Anexo V) en los tratamientos T0 y T2 ($0,4 - 4\text{mmol}_cL^{-1}$). El tratamiento del suelo afectado sin enmienda (T1) se encuentra bajo el rango normal. Los tres tratamientos presentaron diferencias significativas entre sí ($p < 0,05$).

A la profundidad de 20-40 cm, T0 presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) con los demás tratamientos que alcanzaron valores bajo el rango normal ($< 0,4 \text{mmol}_cL^{-1}$). Las deficiencias de este catión tienden a ocurrir en suelos arenosos, altamente lavados y con baja capacidad de intercambio catiónico (Havlin *et al.*, 2005).

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Observando los cambios ocurridos en el tiempo en la concentración de Mg^{+2} , se observa que recién ocurrido el tsunami en Abril de 2010, T0 presenta concentraciones dentro del rango normal, no así T1, que presentó una concentración mayor. Esto se explica por la inundación provocada por el mar, ya que esta agua contiene un 3,7% de Mg, en base a masa del total de sales disueltas (Karleskint *et al.*, 2010).

En India, Chaudhary *et al.* (2006), después de ocurrido el tsunami encontraron alzas en los contenidos de Mg^{+2} en la solución suelo. Esto concuerda con el estudio de Chaudhuri *et al.* (2009), que encontró que el contenido de Mg^{+2} intercambiable aumentó después del suceso, atribuyéndolo al contenido de este catión en el agua de mar.

Como consecuencia de los lavados reiterados en T2 y las precipitaciones ocurridas entre Abril y Julio de 2010 (308 mm), es que en el muestreo de Julio de ese año, este tratamiento presentó valores bajos de Mg^{+2} en el intervalo 0-20 cm y valores medios en profundidad (20-40 cm), debido al desplazamiento del catión en el perfil (Figura 2). En Diciembre del mismo año, el suelo presenta valores bajos en ambos intervalos.

Sodio

Resultados 2012. En cuanto al contenido de sodio (Na^+) soluble en el suelo, en ambos intervalos analizados no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos, presentado valores bajos en ambos intervalos estudiados (Anexo V y Cuadro

6). Valores de Na^+ entre 5 y 30 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ en el extracto de saturación presentan problemas severos para el desarrollo de hortalizas, pastizales y árboles frutales (Sierra *et al.*, 2001). Al respecto, T2 en el intervalo 20-40 cm se encuentra levemente por sobre los 5 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, limitando la elección de cultivos sensibles al sodio.

A dos años de ocurrido el tsunami, los niveles Na^+ en el suelo corresponden a valores normales para el predio, según el tratamiento testigo (T0).

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Al observar los cambios que ocurren en el tiempo en el contenido de Na^+ , se destaca que recién ocurrido el tsunami (Abril de 2010), T1 sufrió un alza notoria en la concentración del catión, constituyendo un problema severo para el desarrollo del cultivo y la estructura del suelo (Anexo V). Esto claramente fue consecuencia de la inundación con agua de mar, ya que el Na^+ constituye el principal catión disuelto en él, con un 30,6% (en base a peso) del total de las sales disueltas (Karleskint *et al.*, 2010).

En Coliumo, el mismo tsunami provocó un aumento en los niveles de Na^+ desde 0,1 a 8,27 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ (Sandoval *et al.*, 2013).

Chaudhary *et al.* (2006), midieron la concentración de Na^+ en el extracto saturado de suelos afectados por el tsunami en India y reveló que este ión fue el que se encontraba en mayor concentración, en un rango de 18,2 a 435 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$. Chaudhuri *et al.* (2009) midieron los cationes intercambiables en un suelo afectado y encontraron que el Na^+ había aumentado desde $10,9 \pm 1,5$ a $13,8 \pm 1,7$ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$.

En T2, un mes después de los lavados y de la aplicación de la enmienda (Julio 2010), se observa el efecto deseado, desplazar el catión en el perfil. Esto se manifiesta en que el intervalo de 0-20 cm presentó una concentración de Na^+ menor que el intervalo más profundo (20-40 cm). En Diciembre de 2010, en T2 ya no se percibe esta diferencia en cada intervalo, por lo que el catión ya ha sido desplazado hacia mayor profundidad. De todas formas, aún presenta una concentración que causa problemas ($> 5 \text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) en hortalizas, pastizales y árboles frutales (Sierra *et al.*, 2001).

Como no existen mediciones en T1 durante el transcurso del año 2010, solo la inicial en Abril, no se pudo establecer dentro del primer año qué tan relevante fue la enmienda para disminuir la concentración de Na^+ durante ese período, pero sí se puede concluir que transcurridos dos inviernos, las precipitaciones y el riego lograron recuperar el suelo a sus niveles normales de Na^+ sin la necesidad de la enmienda.

Potasio

Resultados 2012. La concentración de potasio (K^+) soluble encontrado en el intervalo 0-20 cm en los tratamientos T0 y T2 alcanzó valores medios (Anexo V), presentando diferencias significativas ($p < 0,05$) con T1 que presentó un valor bajo. En el segundo intervalo estudiado, no se detectaron niveles de K^+ en solución en los tres tratamientos (Cuadro 6). Es decir los suelos que actualmente están siendo cultivados presentan mayor contenido de K^+ que el suelo sin cultivar (T1), probablemente a que están siendo fertilizados. Esto se consultó con el agricultor, quien indicó que aplicó supernitro y urea, pero no especificó si el primero contenía K^+ o no, por lo que resulta difícil dar certeza a este supuesto.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. En la variación del contenido de K^+ en el tiempo, se observa (Figura 2) que recién ocurrido el tsunami, T0 tiene un valor de $1,2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ y T1 de $2,9 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ en el intervalo 0-20 cm, lo que sugiere un aumento en el contenido de este catión en el suelo. A su vez, en India, Chaudhuri *et al.* (2009), midieron los cationes intercambiables y notaron que el contenido de K^+ era mayor en los sitios no afectados por el tsunami. El agua de mar contiene un 1,1%, en base a peso, del total de sus iones disueltos correspondiente a K^+ (Karleskint *et al.*, 2010), pero al mismo tiempo, la inundación del suelo produce un lavado del catión. El aumento observado en la concentración de K^+ es leve, pudiéndose atribuir a variación espacial y no necesariamente a un efecto provocado por el tsunami.

Luego se observó una notoria alza del catión en Diciembre 2010 en T0 y T2, probablemente debido al supuesto de fertilización o a un efecto de variabilidad espacial. El agua de riego en esa fecha no registró valores de K^+ , por lo que se descarta como fuente de este elemento.

Contenido de aniones en los suelos

En el Cuadro 7 se muestran los resultados de los análisis de aniones solubles (Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-}) en la solución suelo realizados a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm) y su evolución en el tiempo desde abril de 2010 hasta Junio de 2012.

Cuadro 7. Contenido de aniones en los suelos a dos profundidades y su evolución en el tiempo.

Profundidad (cm)	Tratamiento ¹		Abr-10	Jul-10	Dic-10	Jun-12 ²
0-20	T0	Cl ⁻ (mmol _e L ⁻¹)	4,1	-	9,3	1,03±1,8a
	T1		115,6	-	-	1,73±2,8a
	T2		-	4,3	7,3	3,38±1,6a
20-40	T0	Cl ⁻ (mmol _e L ⁻¹)	1,3	-	4,0	0,0
	T1		67,4	-	-	1,67±2,3b
	T2		-	41	4,7	8,70±2,8a
0-20	T0*	HCO ₃ ⁻ (mmol _e L ⁻¹)	2,4	-	1,6	0,88±0,3 a
	T1		1,0	-	-	1,00±0,5a
	T2		-	1,5	4,9	0,28±0,2 a
20-40	T0*	HCO ₃ ⁻ (mmol _e L ⁻¹)	2,7	-	0,6	0,73±0,3 ab
	T1		1,2	-	-	1,38±0,5 a
	T2		-	0,4	1,9	0,28±0,1b
0-20	T0*	SO ₄ ⁼ (mmol _e L ⁻¹)	0,2	-	0,2	4,43±0,7a
	T1		5,7	-	-	4,43±1,7 a
	T2*		-	1,1	0,1	4,62±0,6a
20-40	T0*	SO ₄ ⁼ (mmol _e L ⁻¹)	0,2	-	0,0	4,06±1,1 a
	T1		3,4	-	-	8,55±7,8a
	T2		-	6,4	0,1	4,62±0,6a

¹(*) Indica que regresión lineal es significativa ($p < 0,05$) como para establecer una tendencia en el tiempo.

² Valor corresponde a la media de las tres repeticiones \pm la desviación estándar. Letras diferentes en una columna y a la misma profundidad indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Cloruro

Resultados 2012. En las mediciones del año 2012, en el intervalo superficial (0-20 cm) no existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos en cuanto a la concentración de cloruros solubles (Cl⁻) encontrándose valores bajos (Anexo V).

En el intervalo de 20-40 cm, el suelo con aplicación de enmienda, es decir T2, presentó la mayor concentración de este anión con diferencias significativas ($p < 0,05$) con los otros dos tratamientos, donde T1 presenta un valor bajo y T0 no presenta concentración detectable (Cuadro 7). Esta situación se podría relacionar con el aporte de Cl⁻ por la fertilización del cultivo de papas.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. En Abril de 2010 T1 presentó valores excesivamente altos, en comparación al tratamiento testigo (T0) (Figura 9) lo cual es claramente atribuible a la entrada de agua de mar. Las sales del agua de mar se constituyen en un 55,1% de ión Cl⁻ en base a peso (Karleskint *et al.*, 2010). A su vez, Chaudhary *et al.* (2006), encontraron

que en los suelos de India, el Cl^- fue el anión que predominó en la solución suelo, luego de ocurrido el tsunami.

En Julio de 2010, en T2 el valor de Cl^- en el intervalo 0-20 cm se encuentra en valores cercanos al tratamiento testigo (T0), pero en el intervalo más profundo presenta aún un elevado valor (Cuadro 7). Al compararlo con T1 en Abril (2010) se observa un desplazamiento del ión en profundidad producto de los lavados realizados y/o las precipitaciones ocurridas en esos meses. Este ión, por su alta solubilidad y movilidad en el suelo, es fácilmente lixiviado por el agua percolada (Havlin *et al.*, 2005)

En el análisis de Diciembre 2010, los resultados de T0, en ambos intervalos estudiados, denotan una elevación en la concentración de Cl^- (Figura 4).

No se puede establecer una tendencia en el tiempo, ya que la regresión lineal no es significativa.

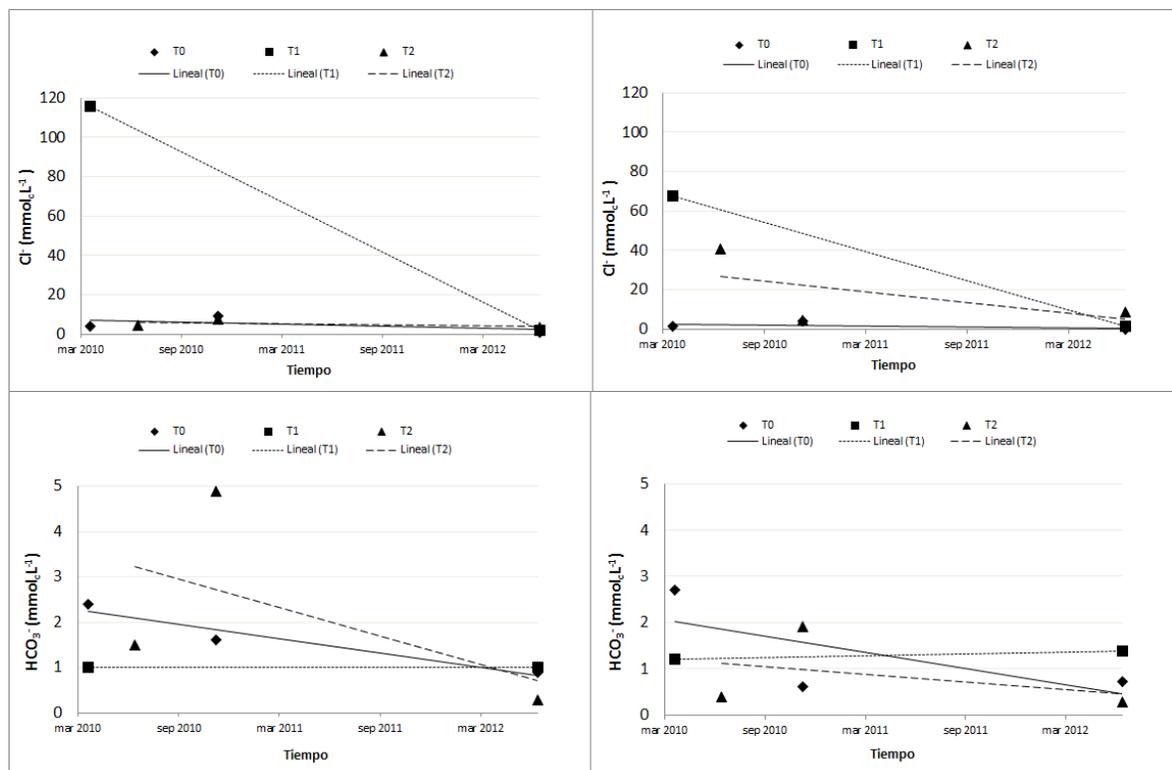


Figura 4. Variaciones en el tiempo y en profundidad, para los intervalos 0-20 cm (izquierda) y 20-40 cm (derecha), de algunos aniones solubles de los suelos.

Carbonatos

Durante las mediciones del año 2010 y 2012, en todos los tratamientos no se detectó presencia de carbonatos solubles en los perfiles de suelo, debido a las condiciones climáticas que determinan el pH del sector.

Bicarbonatos

Resultados 2012. En cuanto al contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) en el suelo, el muestreo de 2012 indica que en el intervalo de 0-20 cm no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos, presentando valores bajos (Anexo V) (Cuadro 7). A mayor profundidad (20-40 cm), el suelo afectado sin aplicación de enmienda (T1), presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) con T2, pero siguen siendo bajas concentraciones. El suelo no afectado (T0) no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) en la concentración de este anión con ninguno de los otros tratamientos (Cuadro 7).

Tendencias en el tiempo 2010-2012. A través del tiempo, las concentraciones de bicarbonato (HCO_3^-) no han sufrido grandes variaciones (Cuadro 7). Es así como recién ocurrido el tsunami (Abril de 2010) se distingue que T0 presenta mayores valores de bicarbonato que T1, siendo que el pH disminuyó en T1. Como los resultados presentan variaciones pequeñas y no se realizaron con repeticiones, no se puede afirmar que fue consecuencia del tsunami la disminución del contenido de HCO_3^- en el suelo. Por el contrario, en India, se encontró que el tsunami provocó un aumento en las concentraciones de este anión (Chaudhary *et al.*, 2006).

En la muestras de T2 en Diciembre 2010, se observa que aumentó el contenido de bicarbonato desde la medición anterior, en Julio del mismo año, lo cual puede ser consecuencia de la enmienda aplicada.

Sulfatos

Resultados 2012. El contenido de sulfatos (SO_4^{2-}) solubles en las muestras de suelo extraídas el año 2012 en todos los tratamientos se presentó en niveles bajos (Anexo V) en ambos intervalos analizados (Cuadro 7), sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ellos.

Tendencias en el tiempo 2010-2012. Al observar los cambios en las concentraciones de SO_4^{-2} en el tiempo, se detecta que el tsunami provocó un aumento del anión, en el intervalo superficial (0-20 cm) pasando de $0,2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (T0) a $5,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (T1). En el segundo intervalo (20-40 cm) ocurre un aumento similar, lo que también es atribuible al tsunami, ya que según Karleskint *et al.* (2010), el agua de mar contiene, del total de sus sales disueltas, un 7,7% en base a peso, de SO_4^{-2} . En los suelos de Coliumo, afectados por el mismo tsunami, ocurrió un aumento considerable en la concentración de este anión en la solución suelo, desde $8,0$ a $260,9 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ y atribuyen a este parámetro la acidificación ocurrida en aquel suelo (Sandoval *et al.*, 2013). En India, también se detectó un aumento elevado de este anión en los suelos afectados por un tsunami, incluso encontrando valores por sobre 900 meq L^{-1} (Chaudhary *et al.*, 2006; Raja *et al.*, 2009)

En Julio de 2010, en el suelo al cual se le realizaron lavados (T2), se observa una mayor concentración en el intervalo de 20-40 cm que en superficie, lo que se debe al desplazamiento del anión en el perfil, comparado con T1 en Abril 2010. En Diciembre de 2010, T2 ya muestra valores similares a los de T0 (Cuadro 7).

Resulta contradictorio que en los resultados del año 2012, todos los tratamientos denoten un aumento en sus concentraciones de SO_4^{-2} , ya que en ese entonces, el agua de riego presentaba muy bajos valores de este anión (Cuadro 10) como para constituir un aporte. Esto puede deberse a que se utilizó un método de análisis diferente a los análisis previos. Este cambio en la metodología, con una lectura en un equipo de mayor precisión, pudo haber conducido a que se manifestaran estas diferencias en las concentraciones de sulfatos en este último análisis.

Relación de adsorción de sodio

Resultados 2012. En las muestras extraídas en Junio de 2012 (Cuadro 9), en el intervalo 0-20 cm, ninguno de los tratamientos presentó características de suelo sódico. Es así como T0 no presenta diferencias significativas ($p > 0,05$) con T1 ni con T2. No obstante, en el segundo intervalo, no ocurre lo mismo. El suelo al cual se le aplicó la enmienda (T2), presentó una RAS superior a 13 (19,9) por lo que se clasifica como suelo sódico a esta profundidad (SSSA, 2008), aunque no presente un pH fuertemente alcalino, sino que en un grado ligero. Además, presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) con T0 y con T1.

Probablemente, esta situación se debe al efecto del agua de riego, ya que contiene una alta concentración de bicarbonatos. Este anión se encarga de precipitar compuestos carbonatados que sacan, principalmente, el calcio de la solución suelo (Peacock *et al.*, 2000). A su vez, T2, ha percolado mayor volumen de agua, por lo que la casi nula concentración del catión Ca^{+2} en el intervalo 20-40 cm puede explicarse ya sea por lixiviación o por precipitación de carbonatos, sin embargo es necesario corroborar este efecto en estudios posteriores.

Debido a la textura arenosa (Anexo II) es probable que esta condición sódica no constituya un deterioro en la estructura de suelo, ya que su leve contenido de arcillas no alcanzaría a provocar problemas de infiltración debido a la dispersión de éstas.

El contenido de Na^+ en T2, en el intervalo sódico, según Sierra *et al.* (2001) aún constituye un problema para árboles frutales, hortalizas y pastizales.

Cuadro 9. Relación de adsorción de sodio de los suelos a dos profundidades y su evolución en el tiempo.

Profundidad (cm)	Tratamiento ¹		Abr-10	Jul-10	Dic-10	Jun-12 ²
0-20	T0*	RAS	1,83	-	0,91	2,47±0,7 a
	T1		11,15	-	-	6,59±2,7a
	T2*		-	5,53	7,14	5,26±1,0a
20-40	T0*		3,38	-	1,32	3,77±0,4 b
	T1		5,74	-	-	5,94±3,4b
	T2		-	9,6	6,53	19,93±0,4a

¹(*) Indica que regresión lineal es significativa ($p < 0,05$) como para establecer una tendencia en el tiempo.

² Valor corresponde a la media de las tres repeticiones ± la desviación estándar. Letras diferentes en una columna y a la misma profundidad indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Tendencias en el tiempo 2010-2012. En las muestras analizadas recién ocurrido el tsunami en Abril 2010, se observó que en superficie (0-20 cm), el suelo afectado (T1) no alcanzó a clasificarse como sódico, pero sí presentó un valor bastante mayor que T0 (Cuadro 9).

Luego, en Julio de 2010, el suelo al cual se le aplicó la enmienda y los lavados (T2) presentó un menor valor de RAS en el intervalo 0-20 cm que en el intervalo más profundo, lo que indica que la enmienda y posterior lavado, actuó de manera efectiva, desplazando al Na^+ en profundidad. Cabe considerar, que el monto de precipitaciones entre Abril y Julio 2010 fue de 307 mm.

En Diciembre de 2010 se observó un leve aumento de la RAS en T2 en los primeros 20 cm del perfil, luego en 2012, este mismo tratamiento tiene el intervalo de 20-40 cm con una RAS que lo clasifica como sódico. Tal como se comenta más adelante, el contenido de HCO_3^- en el agua de riego se triplicó desde 2010 hasta 2012, pudiendo ser el factor causante de esta condición, generando la precipitación de carbonatos de Ca^{+2} .

Propiedades químicas del agua

El agua de riego se extrae de un pozo noria ubicado en el mismo predio. El sistema de riego fue totalmente destruido cuando ocurrió el tsunami en 2010, pero se restauró a fines de Abril del mismo año. Los resultados de los análisis realizados se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Parámetros de calidad de aguas evaluados en agua de pozo.

Parámetros	Unidades	Abr-10	Dic-10	Jun-12
CE _a	(dS m ⁻¹)	5,4	1,6	1,1
RAS _a		26,2	-	4,6
RAS _a (corregida)		27,1	-	6,2
<i><u>Cationessolubles</u></i>				
Ca ⁺²		0,5	-	1,1
Mg ⁺²		3,3	-	1,0
K ⁺	(mmol _c L ⁻¹)	1,2	-	0,2
Na ⁺		36,2	-	4,7
<i><u>Anionessolubles</u></i>				
CO ₃ ⁼		0,00	-	0,0
HCO ₃ ⁻		13,6	-	46,4
Cl ⁻	(mmol _c L ⁻¹)	40,3	-	1,6
SO ₄ ⁼		1,8	-	0,3
<i><u>Otros</u></i>				
Turbiedad	(NTU)	-	-	0,3
O ₂ disuelto	(ppm)	-	-	7,7
pH		7,8	7,9	7,0

Resultados 2012. Ayers y Westcot (1987) modificaron una tabla de directrices, creada por un Comité de Consultores de la Universidad de California (1974), para interpretar la calidad de agua de riego (Anexo VI) y es la guía que se utiliza en este estudio; además, de la Norma Chilena 1333 (INN, 1987) que establece parámetros de calidad de agua para diferentes usos, incluyendo el riego.

El agua de pozo en Junio de 2012, no presentó problemas de reacción en el suelo, encontrándose en un pH neutro (Cuadro 10). En cuanto a salinidad, el agua presentó un grado ligero de restricción (1,1 dS m⁻¹), lo que se traduce en una posible limitación en la elección del cultivo. El cultivo de papas no se ve afectado en su rendimiento potencial con este valor de conductividad en el agua (Mass, 1984 citado por Ayers y Westcot, 1987). A su vez el cultivo de papayos tolera valores de conductividad en el suelo de hasta 3,7 dS m⁻¹ (CIREN, 1989).

Un valor que destaca es el elevado contenido de bicarbonatos ($46 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$). Esta concentración no se relaciona con el pH neutro que presenta el agua, pero se sabe que con presencia de HCO_3^- , sin carbonatos, usualmente el pH es menor a 8,3 (Ritter, 2010). El agua con alto contenido de bicarbonatos, al evaporarse de la superficie de suelo, precipita carbonatos, ya sea de calcio, magnesio o sodio. Los dos primeros, tienen una solubilidad menor que el tercero, lo que provoca en el tiempo una acumulación de Na^+ en el suelo (UCh y SAG, 2005).

La relación de adsorción de sodio (RAS) ajustada, este es un parámetro que se utiliza en aguas con alto contenido de HCO_3^- ($> 2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$; Duncan *et al.*, 2009) ya que considera el posible efecto de precipitación de compuestos carbonatados y el aumento de la concentración relativa de Na^+ en comparación a Ca^{+2} y Mg^{+2} , debido a este fenómeno. Para determinar posibles problemas de infiltración en el suelo, se evalúa la RAS en conjunto con la salinidad del suelo. En este caso, el agua presenta una RAS ajustada de 6,2 y una CE de $1,1 \text{ dS m}^{-1}$, para lo cual se establece una limitación de leve a moderada por posibles problemas de permeabilidad en el suelo (Anexo VI).

El valor de carbonato de sodio residual (CSR) en esta medición es de $44,3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, lo que indica un alto riesgo de sodificación del suelo, siempre y cuando exista una concentración de sodio elevada ($> 4,3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$; Eaton, 1959, citado por Duncan *et al.*, 2009), lo que sí ocurre en este caso. De hecho, la concentración de sodio en el agua de riego ($4,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$), además establece un grado de restricción de leve a moderada debido a posibles problemas de toxicidad en el desarrollo del cultivo.

El T2, tratamiento al cual se le aplicó CaO, presenta en el intervalo 20-40 cm una condición sódica según la RAS, lo que es sugerido como un efecto combinado del agua de riego, de una mayor percolación y lixiviación de sales y de alguna influencia provocada por la enmienda.

La Norma Chilena 1333 (INN, 1987) establece algunos valores máximos permitidos para concentraciones de ciertos elementos químicos en el agua de riego, como Cl^- , SO_4^{-2} y Na^+ porcentual (porcentaje de sodio en relación a la suma de iones Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+). El agua utilizada en el predio, en Junio de 2012, se encontró dentro de los valores aceptados para Cl^- y SO_4^{-2} , pero sobrepasa los valores de Na^+ porcentual (69,3%) (Anexo V). A su vez, el agua de riego no presentó problemas de oxígeno disuelto según la Norma.

Según una propuesta de Norma Secundaria de Calidad de Agua, el agua de riego se encuentra en calidad de “excelente” en cuanto a oxígeno disuelto ($7,7 \text{ ppm}$) y en cuanto a turbiedad, característica que puede afectar en términos biológicos y mecánicos, el agua se encuentra en buenas condiciones ($0,32 \text{ NTU}$) (UCh y SAG, 2005).

Tendencias en el tiempo 2010-2012. En Abril de 2010, después de la ocurrencia del tsunami, el agua de riego presentaba un pH ligeramente alcalino (7,8), pero dentro del rango aceptable. Se encontraron altos niveles de salinidad ($5,1 \text{ dS m}^{-1}$) que según Ayers y Westcot (1987), presenta una restricción de uso severo, lo que no significa que no puede ser usada, sino que limita la elección del cultivo o que puede requerir un manejo especial para obtener un rendimiento adecuado. Esta condición afecta la disponibilidad de agua para el cultivo. El cultivo de papayos, según CIREN (1989), tolera un valor de CE en el suelo de hasta $3,7 \text{ dS m}^{-1}$, y el valor crítico, es decir cuando la productividad disminuye a la mitad del rendimiento potencial, es de $9,5 \text{ dS m}^{-1}$. Dados los valores de CE del suelo en Abril de 2010, el agua a pesar de su elevada salinidad, es útil para realizar un lavado de suelo en ese entonces.

La RAS ajustada en esta ocasión (19,1), no presentó ningún grado de restricción de uso en cuanto a posibles problemas de infiltración, debido a que la alta salinidad favorece la entrada de agua en el perfil (Ayers y Westcot, 1987). El CSR presenta un valor de $9,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, es decir el agua de riego está precipitando compuestos carbonatados de Ca^{+2} y Mg^{+2} , lo que en conjunto con la elevada concentración de Na^+ , constituye un riesgo elevado de sodificación en el suelo, pudiendo crear problemas de impermeabilidad en el perfil.

La concentración de Na^+ se encuentra dentro del rango normal en aguas de riego (Anexo VII), pero presenta un riesgo severo para el desarrollo del cultivo (Anexo VI y VII). La concentración de Cl^- , se encuentra por sobre el rango normal encontrado en aguas de riego y claramente también presenta un riesgo severo de fitotoxicidad (Hanson *et al*, 1999 citado por Duncan *et al*, 2009).

Según la Norma Chilena 1333, en esta época, el agua sobrepasa los valores máximos permitidos para Cl^- (Anexo V). A su vez, el valor de Na^+ porcentual también se encontraba sobre el límite máximo, presentado un valor de 80,3%. Las altas concentraciones de Cl^- y Na^+ se atribuyen a la entrada de agua de mar cuya principal sal es NaCl (Karleskint *et al.*, 2010). En el segundo muestreo de agua, en Diciembre de 2010, se observó una disminución en la CE ($1,6 \text{ dS m}^{-1}$) y un leve aumento del pH (7,9).

Recomendaciones para la rehabilitación de un suelo afectado por tsunami

Para la rehabilitación de un suelo afectado por un tsunami con fines productivos, es necesario conocer y estudiar las condiciones sitio específicas y los efectos perjudiciales provocados por el fenómeno. Estas consecuencias se refieren a daños físicos del lugar (destrucción de plantas, deterioro del sistema de riego) y a daños químicos en el suelo y agua de riego del predio. Se vuelve fundamental conocer cómo quedó el suelo y el agua para saber qué hacer para mejorar su calidad. Los parámetros primordiales a conocer son: la salinidad y la concentración de iones solubles con que quedan ambos recursos, ya que depende de la variación de estas propiedades si es que el cultivo existente sobrevive y se puede mantener. Las plantas pueden morir por sequía fisiológica, toxicidad por algún ión o por anegamiento. Factores físicos del suelo, como la textura y la capacidad de drenaje, también son necesarios de conocer, ya que la eventual acumulación de sales se remedia mediante el lavado de ellas, ya sea por las precipitaciones o por el agua extra aplicada. El movimiento del agua en el perfil determina su capacidad de recuperación. Es así como resalta la combinación de dos factores, la textura del suelo y la acumulación del catión sodio (con contenidos elevados en el agua de mar), ya que en concentraciones excesivas, relativas a otros cationes, provoca un efecto de dispersión de las arcillas, que provoca una pérdida de estructura del suelo, formando una capa impermeable en el suelo y generando una condición adversa para la misma recuperación.

El clima del sector también es un factor importante a conocer, ya que el volumen de agua que percole del suelo, será el responsable de sacar el exceso de sales de la zona radical. Es por eso que hacer un balance hídrico, considerando precipitación y evapotranspiración, permite decidir si el volumen naturalmente percolado de agua es suficiente para desplazar las sales o, si es que es necesario, aplicar un volumen de agua extra para acelerar el proceso.

También es necesario conocer características del cultivo, como tolerancia a la salinidad, al anegamiento y a concentraciones elevadas de sodio y cloro principalmente, y otras propiedades como la profundidad de raíces y el ciclo del cultivo, entre otras.

Conocidos entonces estos factores de suelo, clima y cultivo, se puede tomar una decisión sobre qué medida tomar para recuperar el suelo. Una situación favorable es cuando el lavado natural basta para solucionar el problema, siendo determinante el factor tiempo. Por ejemplo, en el suelo en estudio, después de dos inviernos el suelo sin aplicación de enmienda se recuperó, pero para un pequeño agricultor es difícil resistir económicamente dos años sin producción, por lo que se vuelve necesario apurar el proceso. Si el suelo queda salino y si se cuenta con buen drenaje, basta con realizar lavados extra al suelo para desplazar las sales en profundidad (considerar calidad de agua, nivel freático, profundidad

de raíces), pero si el suelo queda sódico o salino sódico, se vuelve necesario aplicar previamente una enmienda que aporte principalmente Ca^{+2} . Así se logra desplazar al Na^+ de los sitios de intercambio. Según Sandoval *et al.* (2013) una enmienda de yeso (CaSO_4), es más efectiva en este proceso que CaCO_3 debido a su mayor solubilidad. Luego se realiza un lavado para transportar las sales hacia estratas más profundas. Una enmienda orgánica facilita el proceso, ya que mejora la estructura del suelo, pero no mantiene un efecto a largo plazo.

Otra posibilidad es establecer un cultivo resistente o tolerante a las nuevas condiciones de suelo y agua, mientras se recuperan naturalmente las condiciones originales.

En esta situación en estudio, lo que hizo el agricultor de papayos, fue esperar si las plantas afectadas se recuperaban, pero al constatar que el rendimiento decrecía decidió cambiar hacia un cultivo más resistente y de mayor rentabilidad en aquellas condiciones. Es decir, la enmienda aplicada y los lavados realizados, no fueron suficiente como para que la plantación se recuperara o permitiera seguir con un restablecimiento del mismo cultivo.

CONCLUSIONES

En Junio de 2012, dos años después de ocurrido el tsunami en Chile, se detecta que en el suelo de un predio agrícola, ubicado al norte de la Región del Maule y afectado por el fenómeno, se restauran sus propiedades químicas y fisicoquímicas a niveles normales. Esta recuperación se debe al lavado efectuado por el riego y las precipitaciones, las cuales alcanzaron un volumen de 1077 mm durante el período.

El suelo que fue afectado por el tsunami, y que además tuvo la aplicación de la enmienda calcárea-orgánica, presenta en 2012 una condición de sodicidad en el intervalo de 20-40 cm de profundidad. Dadas las mediciones efectuadas durante el año 2010 que confirman una restauración de los niveles de salinidad y disminución en la concentración de cationes aportados por el agua de mar, es posible atribuir esta situación a un efecto combinado del manejo agrícola que se ha efectuado desde aquel entonces y a la calidad del agua de riego.

El agua de pozo utilizada para riego después de ocurrido el tsunami mostró una reducción evidente en su calidad, pero que transcurridos dos años se encontró en niveles adecuados para la producción de cultivos, excepto por una concentración de bicarbonatos alta.

Como no existieron mediciones en el suelo afectado sin enmiendas durante el transcurso del año 2010 (exceptuando la inicial de Abril), no se pudo comparar sus resultados con la situación afectado pero sin enmienda por lo que no se pudo establecer qué tan eficaz fue la enmienda en cuanto a la velocidad de recuperación del suelo en el transcurso de estos dos años.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D.Raes and M. Smith.1998. Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome, Italy: FAO. 299 p. (Irrigation and Drainage Paper N° 56)
- Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1987. Water Quality for Agriculture. Rome, Italy: FAO. 174 p.(Irrigation and Drainage Paper N° 29).
- Benavides, C. 1991. Aplicación de enmiendas químicas. pp:297-326. *En: Manejo de suelos en huertos frutales. Publicaciones misceláneas agrícolas N° 35. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 349 p.*
- Bryant, E. 2008. Tsunami: The underrated hazard. 2nd Ed. Germany: Springer. 338 p.
- Casanova, M. 2010. Tsunami en Chile: Apuntes del Curso Conservación de Suelos y Aguas. Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 7 p.
- Chagué-Goff, C., P. Niedzielski, H. Wong, W. Szczucinski, D. Sugawara and J. Goff. 2012. Environmental impact assessment of the 2011 Tohoku-oki tsunami on the Sendai Plain. *Sedimentary Geology*, 282: 175-187.
- Chan, Y. 2009. Breeding papaya (*Carica papaya* l.). pp: 121-159. *In: Mohan Jain, S. and P.M. Priyadarshan (Eds.). Breeding plantation tree crops: tropical species. New York, USA: Springer Science and Bussiness Media. 627 p.*
- Chandrasekharan, H.; S. Sarangi; M. Nagarajan; V.Singh; D. Rao; P. Stalin. *et al.* 2008. Variability of soil-water quality due to tsunami-2004 in the coastal belt of Nagapattinam district, Tamilnadu. *Journal of Environmental Management*, 89: 63-72.
- Chaudhary, D.R.; A. Gosh and J.S. Patolia. 2006. Characterization of soils in the tsunami-affected coastal areas of Tamil Nadu for agronomic rehabilitation. *Current Science*, 91:99-104.
- Chaudhuri, S.; R. Dinesh; T. Sheeja; R. Raja; V. Jeykumar and R. Srivastava.2009. Physico-chemical, biochemical and microbial characteristics of soils of mangroves of the andamans: A post-tsunami analysis. *Current Science*, 97: 98-102.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). Chile. 1989. Frutales menores y de hoja persistente. Santiago, Chile: CIREN. 65 p. Publicación N° 84.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). Chile. 1997. Estudio Agrológico de la VII Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Santiago, Chile: CIREN. 611 p. Publicación N°117.

Dewis, J. y F. Freitas. 1970. Métodos Físicos y Químicos de Análisis de Suelos y Aguas. Roma, Italia: FAO. 252 p. (Boletín de Suelos N° 10).

Duncan R.R.; R. N. Carrow and M. T. Huck. 2009. Turfgrass and Landscape Irrigation Water Quality: Assessment and Management. Boca Raton, FL, USA: CRC Press- Taylor & Francis Group. 464 p.

EPA (Environmental Protection Agency). USA. 1993. Determination of turbidity by nephelometry: Method 180.1. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Office of Research and Development. 10 p.

Fritz, H.M.; C.M. Petroff; P.A. Catalán; R. Cienfuegos; P. Winckler; N. Kalligeris.*et al.* 2011. Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168: 1989–2010.

Havlin, J.L.; J.D. Beaton; S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 2005. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 7th Ed. NJ, USA: Pearson/Prentice Hall. 515 p.

Hazelton, P. and B. Murphy (Eds.). 2007. Interpreting soil test results: What do all the number means?. Australia: CSIRO Publishing. 152 p.

Horneck, D.S.; J.W. Ellsworth; B.G. Hopkins; D.M. Sullivan and R.G. Stevens. 2007. Managing salt-affected soils for crop production. PNW 601-E. Oregon State University, University of Idaho, Washington State University. 24 p.

Horton, B.P.; Y. Sawai and A.D. Hawkes. 2011. Sedimentology and paleontology of a tsunami deposit accompanying the great Chilean earthquake of February 2010. *Marine Micropaleontology*, 79: 132-138

Instituto Nacional de Normalización, Chile. 1987. NCh 1333. Of. 78. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos = Water quality requirements for different uses. Santiago, Chile: INN, 1987. III. 9 p.

Karleskint, G.; L. Richard and J.Small. 2010. Introduction to marine biology. 3^{ed} Ed. Canada: Cengage Learning. Brooks/Cole. 584 p.

Kron, W. 2013. Coasts: the high-risk areas of the world. *Natural Hazards*, 66(3): 1363-1382.

Kulikov, E.A.; A.B. Rabinovich and R.E. Thomson. 2005. Estimation of tsunami risk for the coasts of Peru and Northern Chile. *Natural Hazards*, 35: 185–209.

- Kumea, T.; CH. Umetsu and K. Palanisami. 2009. Impact of the December 2004 tsunami on soil, groundwater and vegetation in the Nagapattinam district, India. *Journal of Environmental Management*, 90: 3147–3154.
- Madariaga, R.; M. Métois; C.Vigny and J. Campos.2010. Central Chile finally breaks. *Science*, 328(5975): 181-182.
- McLeod, M.; P. Slavich; Y. Irhas; N. Moore; A. Rachman; N. Ali. *et al.* 2010. Soil salinity in Aceh after the December 2004 Indian ocean tsunami. *Agricultural Water Management*, 97: 605–613.
- Morton, R.; G. Gelfenbaum; M. Buckley and B. Richmond. 2011. Geological effects and implications of the 2010 tsunami along the central coast of Chile. *Sedimentary Geology*, 242: 34-51.
- Nayak, A.; T. Damodaran; C. Singh; S. Jha; D. Raja; V. Mishra. *et al.*2010. Post tsunami changes in soil properties of Andaman islands, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 170 (1-4): 185-193.
- Peacock, W.L.; L.E. Williams and L.P. Christensen. 2000. Water Management and Irrigation Scheduling. pp: 127-133 *In: L.P. Christensen (Ed).* Raisin Production Manual. Oakland, CA: University of California, Agricultural and Natural Resources. (Publication N° 3393).
- Raja, R.; S. Ghoshal Chaudhuri; N. Ravisankar; T.P. Swarnam; V. Jayakumarand R.C. Srivastava. 2009. Salinity status of tsunami-affected soil and water resources of South Andaman, India. *Current Science*, 96: 152-156.
- Rabinovich, A.B.; E.A Kulikov and R.E. Thomson. 2001. Tsunami risk estimation for the coasts Peru and Northern Chile. pp: 281–291. *In: Proceedings International Tsunami Symposium (1°, 7-10 August, 2001, Seattle, WA) Seattle, WA. [s.p.]*.
- Reichenauer, T.; S. Panamulla; S. Subasinghe and B. Wimmer. 2009. Soil amendments and cultivar selection can improve rice yield in salt-influenced (tsunami-affected) paddy fields in Sri Lanka. *Environmental Geochemical Health*, 31: 573-579.
- Rhoades, J.D.; A. Kandiah and A.M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. Rome, Italy: FAO. (Irrigation and Drainage Paper N° 48).
- Ritter, J. 2010. Water quality: Principles and practices of water supply operations. 4th Ed. USA: American Water Works Association. 213 p.
- Sadzawka, A. 2006. Métodos de análisis de agua para riego. (S. Actas N° 37). INIA Santiago, Chile: INIA. 332 p.
- Sadzawka, A.; R. Grez; M.A. Carrasco y M.L. Mora. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Santiago, Chile: INIA. 164 p.

Sandoval, M.; J. Celis; L. Pedreros and J. Capulin. 2013. Chemical remediation of an agricultural soil: a case study of the tsunami-affected area of Chile. *Water Air and Soil Pollution*, 224: 1590-1599.

Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chile: Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. 80 p. (Publicación N° 5).

Sandoval, M.; C. Quezada; N. Stolpe y E. Zagal. 2010. El tsunami y su impacto en los suelos de Coliumo, VIII región, Chile. (pp: 81). *En: International Soil Conservation Organization Congress (ISCO) (16°, 8-12 de Noviembre de 2010, Santiago, Chile)*. Santiago, Chile: ISCO. 144 p

Santibañez, F.; M. Parada y P. Ulriksen. 1979. Distritos agroclimáticos: Perspectivas de desarrollo de los recursos de la VII región. Santiago, Chile: IREN. 161 p. (Publicación N° 25).

Scheffers, A.M.; S. R. Scheffers and D. H. Kelletat. 2012. The coastlines of the world with Google Earth: Understanding our environment. Ed. C.W. Finkl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer Coastal Research Library. Vol. 2. 293 p.

Shanmugam, G. 2012. Process-sedimentological challenges in distinguishing paleo-tsunami deposits. *Natural Hazards*, 63(1): 5-30.

Sierra, C.; R. Céspedes y A. Osorio. 2001. Caracterización de la salinidad de los suelos y aguas del valle del río Copiapó. Recuperado en: <<http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR27726.pdf>> Consultado el 6 de septiembre de 2013.

SSSA (Soil Science of America). USA. 2008. Glossary of Soil Science terms. USA: SSSA. 92 p.

Swamy, Y.V.; G. Roy Chaudhury; S. N. Das; S. Sengupta and R. Muduli. 2006. Assesment of water quality in tsunami affected Andhra coast. *Current Science*, 91(10): 1409-1412.

Szczucinski, W.; P. Niedzielski; L. Kozak; M. Frankowski; A. Ziola y S. Lorenc. 2007. Effects of rainy season on mobilization of contaminants from tsunami deposits left in a coastal zone of Thailand by the 26 December 2004 tsunami. *Environmental Geology*, 53:253-264.

Universidad de Chile y Servicio Agrícola y Ganadero. Chile. 2005. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego: Informe final. Santiago: División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente (SAG) y Departamento de Ingeniería Civil (UCh). 254 p.

USGS (U.S Geological Survey). 2012. Magnitude 8,8 Offshore Bio-bio, Chile. Recuperado en: <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/us2010tfan/us2010tfan.php>> Consultado el 3 de mayo 2012

Yin, Z.; Y. Han; R. Podestá; W. Liu; A. Pacheco; E. Alonso. *et al.* 2011. South American SLR stations monitoring ground displacement caused by the M 8.8 Chilean earthquake of 2010. *Chinese Science Bulletin*, 56(8): 738-742.

Yoshii, T.; M. Imamura; M. Matsuyama; S. Koshimura; M. Matsuoka; E. Mas. *et al.* 2012. Salinity in soils and tsunami deposits in areas affected by the 2010 Chile and 2011 Japan tsunamis. *Pure Applied Geophysics*, 170 (6-8): 1047-1066.

ANEXOS

Anexo I

Composición de las enmiendas.

Información de la empresa que comercializa los productos.

http://www.chemiesa.com/productos_agricolas.php?pais=argentina

	FICHA TECNICA CUTSALT
---	----------------------------------

INGREDIENTE ACTIVO	: Calcio, Magnesio
NOMBRE QUIMICO	: Calcio (Ca), Magnesio (Mg)
GRUPO QUIMICO	: Orgánico
CONCENTRACION Y FORMULACION	: Calcio (Ca) 7,6 % p/p, Magnesio (Mg): 0,7% p/p
MODO DE ACCIÓN	: Concentrado soluble (SL)
PROVEEDOR	: Corrector de suelos sódicos y salinos sódico : CHEMIE S.A.

	FICHA TECNICA SUPER SOIL
---	-------------------------------------

INGREDIENTE ACTIVO	: Materia Orgánica, Ácidos Fúlvicos, Potasio, Nitrógeno.
NOMBRE QUIMICO	: No corresponde.
GRUPO QUIMICO	: Organico
CONCENTRACION Y FORMULACION	: Materia Orgánica (sobre húmedo) 15-17%, Ácidos Fúlvicos 8,1%, Potasio soluble 1,9%, Nitrógeno org. 1,5%
MODO DE ACCIÓN	: Concentrado Soluble, SL.
PROVEEDOR	: Enmienda orgánica líquida : CHEMIE S.A.

http://www.chemiesa.com/productos_agricolas.php?pais=chile

	FICHA TECNICA CUTSALT Código: CH 7.2-1.0.5 Página 1 de 1 Revisión : 1 Fecha Revisión: 05.06.2012
---	---

INGREDIENTE ACTIVO	: Mezcla de Ácidos policarboxílicos, Óxido de Calcio, Óxido de Magnesio.
NOMBRE QUIMICO	: No determinado
GRUPO QUIMICO	: Orgánico
CONCENTRACION	: 25% de Ácidos Policarboxílicos; 11% de Calcio (CaO).
MODO DE ACCIÓN	: Enmienda cálcica
PROVEEDOR	: CHEMIE S.A.

	FICHA TECNICA SUPER SOIL
---	-------------------------------------

INGREDIENTE ACTIVO	: Materia Orgánica, Ácidos Fúlvicos, Ácidos Carboxílicos, Potasio, Nitrógeno, Fósforo, Magnesio, Azufre, Hierro, Cobre, Molibdeno, Zinc, Boro, Carbohidratos, Proteínas y Carbono.
NOMBRE QUÍMICO	: No corresponde.
GRUPO QUÍMICO	: Macroelementos, Microelementos, Ácidos Fúlvicos y carboxílicos
CONCENTRACION Y FORMULACION	: 40.5% Materia Orgánica; 38% Ácidos Fúlvicos; 10% Ácidos Carboxílicos; 5% Potasio; 3,6% (Nitrógeno, Fósforo, Magnesio, Azufre); 0,6% Hierro, Cobre, Molibdeno, Zinc, Boro); 20% Carbohidratos; 8% Proteínas y 23,6% Carbono
MODO DE ACCIÓN	: Concentrado Soluble, SL.
PROVEEDOR	: Acondicionador de suelo Absorción radicular y foliar. : CHEMIE S.A.

Anexo II

Propiedades físicas de los suelos

Realizadas en Diciembre de 2010

Tratamiento y profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Densidad aparente	Densidad real
	(%)				$(\text{Mg m}^{-3})^a$	
T0 (0-20)	95,5	3,1	1,4	Arenosa	$1,56 \pm 0,12$	$2,87 \pm 0,029$
T0 (20-40)	94,5	3,1	2,4	Arenosa	$1,53 \pm 0,13$	$2,86 \pm 0,001$
T1 (0-20)					$1,62 \pm 0,12$	
T1 (20-40)					$1,59 \pm 0,05$	
T2 (0-20)	92,9	5,9	1,2	Arenosa	$1,54 \pm 0,05$	$2,87 \pm 0,016$
T2 (20-40)	92,4	6,4	1,2	Arenosa	$1,52 \pm 0,03$	$2,84 \pm 0,008$

^a Medición realizada en Junio de 2012.

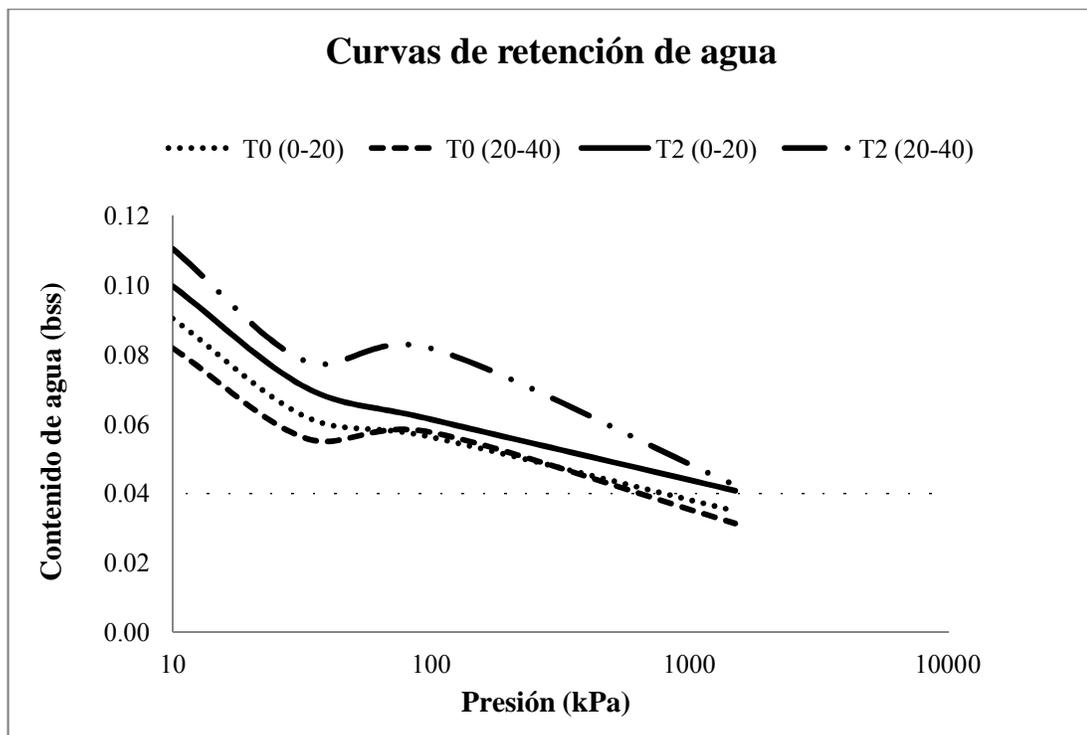


Figura 5. Curvas de retención de agua de suelos en estudio. Diciembre de 2010

Anexo III

Descripción morfológica general de los suelos

Pendiente del sitio: 1,6%

Perfil no afectado (T0), Abril 2010.

Coordenadas UTM: 761,326E – 6140,415S (5msnm)

Profundidad	Características morfológicas
0-16 cm A	Pardo oscuro (10 YR 3/3), areno francosa, bloques subangulares medios débiles; ligeramente plástico, no adhesivo; raíces medias escasas, finas comunes, muy finas abundantes; poros gruesos abundantes; límite lineal claro.
16– 24 cm B1	Negro parduzco (10 YR 3/2), areno francosa, bloques subangulares medios moderados, ligeramente plástico, no adhesivo; raíces muy finas escasas, finas comunes y medias escasas; poros gruesos abundantes; límite lineal claro.
24-51 cm B2	Pardo oscuro(10 YR 3/3), areno francosa, bloques subangulares medios moderados; ligeramente plástico, no adhesivo;raíces finas escasas.

Perfil inundado (T1 y T2), Abril 2010. Coordenadas UTM: 761,243E–6140,414S, (3msnm)

Pendiente del sitio: 1,6%

Profundidad	Características morfológicas
0 – 25 cm A	Negro (10 YR 2/1), areno francosa, bloques subangulares medios débiles; no plástico, no adhesivo; raíces medias abundantes, finas comunes; poros gruesos abundantes y medios abundantes; límite lineal claro.
25 – 30 cm B1	Pardo oscuro (10 YR 3/3), franco arenosa, bloques subangulares medios moderados; ligeramente plástico, no adhesivo; raíces finas abundantes; poros finos y medios abundantes; nódulos (rasgos redoximórficos) rojos (2,5 YR /6) en un 15%; límite lineal claro.
30-50 cm B2	Negro (10 YR 2/1), areno francosa; bloques subangulares finos y medios, débiles; poros gruesos y medios abundantes, raíces medias escasas y finas comunes.

Anexo IV

Análisis químicos de suelo realizados en 2010

Muestra	Profundidad (cm)	pH	CE dS m ⁻¹	MO %	CIC cmol _c kg ⁻¹	Ca ⁺² mmol _c L ⁻¹	Mg ⁺² mmol _c L ⁻¹	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	
Abr-10	T0	(0-20)	6,2	0,8	0,6	5,0	1,0	1,6	3,0
		(20-40)	7,3	0,5	0,1	4,6	0,6	0,3	3,2
	T1	(0-20)	5,5	12,6	0,9	7,0	14,0	7,4	51,6
		(20-40)	5,9	8,6	0,5	6,1	17,8	9,1	29,8
Jul-10	T2	(0-20)	7,7	1	1,3	7,1	1,2	1	8,2
		(20-40)	7,2	4,8	0,9	6,9	4,3	7,3	32,7
Dic-10	T0	(0-20)	6,9	0,6	0,7	6,6	1,2	1,5	1,5
		(20-40)	7,1	0,4	0,2	7,4	0,6	0,7	1,5
	T2	(0-20)	7,5	1	1	7,8	1,4	0,6	10,1
		(20-40)	7,9	0,9	0,4	10,4	1,2	0,3	8

Análisis químicos de suelo realizados en 2010(continuación)

Muestra	Profundidad (cm)	K ⁺ mmol _c L ⁻¹	Cl ⁻ mmol _c L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mmol _c L ⁻¹	CO ₃ ⁻² eq (%)	SO ₄ ⁻² mmol _c L ⁻¹	RAS -	
Abr-10	T0	(0-20)	1,2	4,1	2,4	0,0	0,2	1,83
		(20-40)	0,2	1,3	2,7	0,0	0,2	3,38
	T1	(0-20)	2,9	115,6	1,0	0,0	5,7	11,15
		(20-40)	1,0	67,4	1,2	0,0	3,4	5,74
Jul-10	T2	(0-20)	0,3	4,3	1,5	0,0	1,1	5,53
		(20-40)	0,2	41	0,4	0,0	6,4	9,60
Dic-10	T0	(0-20)	33,7	9,3	1,6	0,0	0,2	0,91
		(20-40)	23,75	4	0,6	0,0	0	1,32
	T2	(0-20)	34	7,3	4,9	0,0	0,1	7,14
		(20-40)	17,4	4,7	1,9	0,0	0,1	6,53

Anexo V

Rangos de interpretación de parámetros en estudio

Riesgo relativo de sodio y otros problemas asociados a sales según análisis de suelo

Análisis en el suelo	Interpretación de análisis de suelo (riesgo de problema)			Problema
	Bajo	Medio	Alto	
Conductividad eléctrica (EC); dS/m	< 0,75	0,75 - 4	> 4	CE es un indicador de la cantidad de sales disueltas. Alta concentración de sales puede reducir la germinación de la semilla y el crecimiento de la planta. Iones específicos pueden causar toxicidad
Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)	< 5 %	5 - 15 %	> 15 %	A mayor PSI (o RAS) , disminuye la estructura de suelo; la tasa de infiltración de agua dentro del suelo y la tasa de movimiento de agua dentro del suelo puede reducirse. Alta concentración de sodio puede ser tóxico para las plantas
Relación de adsorción de sodio (RAS)	< 5	5 -13	> 13	
pH	< 7,5	7,5 - 8,5	> 8,5	Hierro, manganeso y otros micronutrientes están menos disponibles para la planta. Si el pH > 8,5, se recomienda un monitoreo cuidadoso de RAS o PSI

Fuente: Hornecket *al.* (2007).

Rangos de interpretación de capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica y contenido de carbono orgánico en el suelo.

CIC cmol _c kg ⁻¹	Materia orgánica % (g/100 g)	Carbono orgánico	Interpretación de valores
-	<0.70	<0.40	Extremadamente bajo
<6	0.70 a <1.00	0.40 a <0.60	Muy bajo
6 a <12	1.00 a <1.70	0.60 a <1.00	Bajo
12a <25	1.70 a <3.00	1.00 a <1.80	Moderado
25a <40	3.00 a <5.15	1.80 a <3.00	Alto
≥ 40	≥5.15	≥3.00	Muy alto

Adaptado de Metson (1961); Emerson (1991) y Charman and Roper (2000), citados por Hazelton y Murphy, (2007).

Rangos de iones en el extracto saturado

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	Referencia
-----mmol _c L ⁻¹ -----								
Bajo	< 5	< 2,5	< 7	< 0,9	0,2 – 5,0	10 - 20	0,1 – 2,5	Servicio Técnico Agrícola La Rural, España ¹
Medio	5 - 20	2,5 - 10	7 - 15	0,9 – 5,0	5,0 – 15,0	20 - 30	2,5 – 5,0	
Alto	> 20	> 10	> 15	> 5,0	15,0 – 25,0	> 30	> 5,0	
Normal²	1,5-5	0,4-4	0,02-0,21	0,02-0,25		0,1-0,4		Havlin, 2005.
Sin problema			< 5,0		< 10		< 4,0	Richards, 1960
Problema severo			> 30		> 30		> 8,5	
Óptimo	< 0,82	0,66-1,0	< 0,87	0,38-0,51		0,1-0,21		Soil First Consulting ₃
Bajo					< 5			Hornecket <i>al.</i> 2007.
Medio					5- 20			
Alto					> 20			
Sin problema					< 10			Peacock <i>et al.</i> 2000.
Problema crónico			> 30		10-30			
Problema severo					> 30			

¹Servicio Técnico Agrícola La Rural, España:

http://www4.larural.es/servagro/fertilizacion/sueloagricola/analisis_suelos.htm

²Valores normales en la solución suelo de suelos de clima templado.

³Soil First Consulting:

http://soilfirst.com/pdf/soiltest/Saturated_Paste_Extract_Guidelines.pdf

NORMA CHILENA 1333. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos (INN, 1987)

Concentración máxima en el agua de riego			Criterios para vida acuática		
Elemento	Unidad	Valor máximo	Parámetro	Unidad	Mínimo
Cloruros	mmol _c L ⁻¹	5,6	Oxígeno disuelto	mg L ⁻¹	5,0
Sulfatos	mmol _c L ⁻¹	5,2			
Sodio	%	35			

Disponible en: <http://www.conemi.net/normativa/NCh1333-1978%20Mod-1987.pdf>

Anexo VI

Guía de interpretación de parámetros de calidad de agua para riego según FAO. (Ayers y Westcot, 1987)

Problemas potenciales para el riego	Unidad	Grado de restricción y uso			
		Ninguno	Ligero a moderado	Severo	
Salinidad (<i>afecta disponibilidad de agua para el cultivo</i>)					
CE_a	dS m ⁻¹	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0	
TSD	mg L ⁻¹	< 450	450 – 2000	> 2000	
Infiltración (<i>afecta la tasa de infiltración del agua en el suelo. Se evalúa usando CE_a y RAS</i>)					
		=	> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
		=	> 1,2	1,2 – 0,3	< 0,3
RAS		CE_a =	> 1,9	1,9 – 0,5	< 0,5
		=	> 2,9	2,9 – 1,3	< 1,3
		=	> 5,0	5,0 – 2,9	< 2,9
Toxicidad por iones específicos (<i>afecta cultivos sensibles</i>)					
Sodio (Na)	Riego superficial	RAS	< 3,0	3,0 – 9,0	> 9,0
	Riego por aspersión	cmol _c L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	
Cloruros (Cl)	Riego superficial		< 4,0	4,0 – 10,0	> 10,0
	Riego por aspersión	cmol _c L ⁻¹	< 3,0	> 3,0	
Boro (B)		mg L ⁻¹	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
Efectos misceláneos (<i>afecta cultivos sensibles</i>)					
	Nitrógeno (N-NO₃⁻)	mg L ⁻¹	< 5,0	5,0 – 30,0	> 30,0
	Bicarbonato (HCO₃⁻) (Solo con riego por aspersión)	cmol _c L ⁻¹	< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5
	pH		Rango normal 6,5 – 8,4		

Anexo VII

Rangos normales de las propiedades evaluadas en aguas de riego (Ayers y Westcot, 1987).

Parámetro	Símbolo	Unidades	Rango usual en agua de riego
SALINIDAD (contenido de sales)			
Conductividad eléctrica	CEa	dS m ⁻¹	0 – 3
Sólidos totales disueltos	STD	mg L ⁻¹	0 – 2000
<i>Cationes y aniones</i>			
Calcio	Ca ⁺⁺		0 – 20
Magnesio	Mg ⁺⁺		0 – 5
Sodio	Na ⁺		0 – 40
Carbonato	CO ₃ ⁻⁻	cmol _c L ⁻¹	0 – .1
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻		0 – 10
Cloruro	Cl ⁻		0 – 30
Sulfato	SO ₄ ⁻		0 – 20
NUTRIENTES			
Nitrato	NO ₃ -N		0 – 10
Amonio	NH ₄ -N	mg L ⁻¹	0 – 5
Fosfato	PO ₄ -P		0 – 2
Potasio	K ⁺		0 – 2
MISCELANEOS			
Boro	B	mg L ⁻¹	0 – 2
Acidez/basicidad	pH		6,0 – 8,5
Relación de adsorción de sodio	RAS		0 – 15

dS m⁻¹ = deciSiemen/metro en unidades de S.I. (equivalente a 1 mmho/cm = 1 millimho/centímetro)

mg L⁻¹ = miligramo por litro partes por millón (ppm).

cmol_cL⁻¹ = centimol de carga por litro = miliequivalente por litro (mg L⁻¹ ÷ peso equivalente = meqL⁻¹); en unidades de SI, 1 meq L⁻¹ = 1 milimol/litro ajustado por carga de electrón.

NO₃ -N significa que el laboratorio analizará para NO₃ pero informará el NO₃ en términos de N químicamente equivalente. Similarmente para NH₄-N. El N total disponible para la planta será la suma de del N elemental equivalente. Lo mismo se informa para fósforo.

Anexo VIII

Comentarios acerca de constituyentes químicos de aguas(modificado de Duncan *et al.*, 2009).

Análisis de agua	Comentarios
Características generales	
pH	pH muy alto o muy bajo es una advertencia de posibles problemas
Dureza	Se relaciona con el contenido de Ca y Mg y con posibles incrustaciones en tuberías
Alcalinidad	Mide la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Refleja el contenido de HCO ₃ , CO ₃ y OH (hidróxidos) .
Bicarbonato, HCO ₃	Afecta la precipitación de Ca y Mg desde el agua
Carbonato, CO ₃	Afecta la precipitación de Ca y Mg desde el agua
Evaluación del total de sales solubles (salinidad)	
Conductividad Eléctrica, CEa	Se relaciona con el posible estrés salino en el crecimiento de las plantas
Total de sales disueltas, TSD	Se relaciona con el posible estrés salino en el crecimiento de las plantas
Impacto en la estructura del suelo/Infiltración de agua (Riesgo de impermeabilidad por Na)	
Relación de Adsorción de Sodio, RAS, RNa adj	Mide posibles efectos adversos por sodio en la estructura de suelo
Carbonato de Sodio Residual CSR, CEa y TSD	Medida del potencial de Ca y Mg para precipitar desde el agua de riego al reaccionar con HCO ₃ / CO ₃ Influencian en la RAS
Impacto de iones específicos en daños a la raíz o absorción foliar y daños en el follaje	
Na	Frecuentemente daña las raíces de las plantas
Cl	Usualmente se acumula en el follaje
B	Puede causar toxicidad en la raíz o provocar lesiones
Impacto de iones específicos en el follaje debido a contacto por aerosol	
Na	Daño en plantas de follaje sensible
Cl	Daño en plantas de follaje sensible
HCO ₃	No causa daño, pero puede dejar depósitos desagradables en el follaje
Nitrógeno como N total, NO ₃	N y los otros nutrientes contribuyen a los requerimientos nutricionales de la planta. Debe ser considerado parte del “fertilizante” requerido.
Fósforo como P total, PO ₄ , P ₂ O ₅	
Potasio como K total, K ₂ O	
Calcio como Ca	
Magnesio como Mg	
Sulfato como SO ₄ o S	Valores de sulfato también se usan para evaluar posibles capas negras
Manganeso como Mn	
Hierro como Fe	
Cobre como Cu	
Zinc como Zn	
Boro como B	
Sodio como Na	
Cloruro como iones de metal Cl	
Varios iones metálicos son a veces analizados en el agua de riego si es que se espera algún problema o si es una nueva fuente de riego. Normalmente se reportan en ppm o mg/L e incluyen Al, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, F, Li, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, W, V y Zn.	
Misceláneos	
Cl residuales	Cloro excesivo proveniente del tratamiento del agua
Sólidos suspendidos totales, SSTa	Sólidos suspendidos que son orgánicos e inorgánicos en la naturaleza
pHc	Indica el potencial de precipitación de cal
Nitrógeno como amonio, NH ₄ -N	Rara vez se presenta, excepto en aguas residuales. Pruebas de NH ₄ no son normalmente incluidas en las pruebas de agua y deben ser requeridas