



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

TESIS DE MAESTRÍA

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS Y MANEJO DEL RIEGO
EN SUELOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANA SOBRE EL
RENDIMIENTO DE LECHUGA BAJO INVERNADERO

MAESTRÍA EN HORTICULTURA

TESISTA: Ing. Agr. María de la Cruz Lang

DIRECTOR: M.Sc. Víctor M. Lipinski

CODIRECTOR: Ing. Agr. Luis Balcaza

Mendoza, 2016.

Agradecimientos

A Víctor Lipinski, por su compromiso, dedicación y capacidad para dirigir esta tesis, además y principalmente por su calidad humana.

A mi amigo y compañero de trabajo Pablo Ermini, por su incondicional ayuda, por sus consejos, opiniones, críticas constructivas, por su tiempo.

A mis compañeros de trabajo, José y Eduardo por ayudarme desinteresadamente en el ensayo, que fue largo y laborioso.

A INTA, por financiar mis estudios y darme la posibilidad de desarrollarme profesionalmente.

A mi familia, por estar siempre. Gracias...

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE ENMIENDAS Y MANEJO DEL RIEGO EN SUELOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANA SOBRE EL RENDIMIENTO DE LECHUGA BAJO INVERNADERO

Resumen

El manejo adecuado del riego es fundamental para el éxito de un cultivo bajo invernadero. Regar con agua de mala calidad puede ocasionar la acumulación de sales y cationes dispersantes como el sodio, que afecta negativamente algunas propiedades físicas del suelo como la conductividad hidráulica y la infiltración, causando una reducción de su capacidad productiva. El objetivo fue evaluar la incidencia de la aplicación de yeso y azufre sobre la mejora de las condiciones físico-químicas del suelo y en la productividad del cultivo de lechuga bajo cubierta. El ensayo se realizó durante cinco ciclos consecutivos, en un invernadero regado con agua bicarbonatada sódica. Se establecieron dos ambientes de riego ($R_1=Et_c$ y $R_2=1,30 Et_c$) y tres tratamientos de enmiendas (testigo, yeso y azufre). Se evaluaron variables físico – químicas del suelo: CE, pH, CIC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , PSI, infiltración, conductividad hidráulica y productividad del cultivo: $kg m^{-2}$ y peso fresco por planta. Se determinó que el contenido de sodio en el suelo se acrecienta a lo largo del tiempo cuando se riega con agua de mala calidad. El agregado de enmiendas inorgánicas reduce sustancialmente el aumento del PSI en el suelo, siendo el azufre el que mejor efecto produce. Regar con agua de elevado RAS disminuye la infiltración al final de los cinco ciclos de cultivo de lechuga. Existe un efecto positivo de ambas enmiendas sobre la infiltración. El uso de yeso como enmienda causa una menor disminución de la conductividad hidráulica en el suelo. El riego continuado con agua bicarbonatada sódica produce una disminución en los rendimientos del cultivo de lechuga a lo largo del tiempo. Con el agregado de yeso se obtuvieron los mejores rendimientos. El efecto de las enmiendas es positivo en relación al tamaño de las plantas cosechadas.

Palabras clave: enmiendas inorgánicas, infiltración, agua bicarbonatada sódica, *Lactuca sativa*.

EFFECT OF THE APPLICATION OF SOIL AMENDMENTS AND IRRIGATION MANAGEMENT IN LETTUCE PRODUCTION UNDER GREENHOUSE CONDITIONS

Abstract

Proper irrigation management is critical for successful greenhouse cultivation. Water with poor quality can cause the accumulation of salts and dispersants cations such as sodium, which affects negatively some physical soil properties such as hydraulic conductivity and infiltration, and as consequence reduces productivity. The objective of this work was to evaluate the impact of the application of gypsum and sulfur on lettuce crop productivity grown under greenhouse conditions. The trial was performed during five consecutive cycles in a greenhouse irrigated with sodium bicarbonate water. Two main irrigation environments (R1 = Etc and R2 = 1.30 Etc) and three treatments (control, gypsum and sulfur) were established. Physical and chemical soil variables were evaluated (EC, pH, CEC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, PSI, infiltration, hydraulic conductivity) and also crop productivity expressed as kg.m⁻² and fresh weight per plant. Sodium content in the soil increases over time when irrigated with water of poor quality. The addition of inorganic amendments substantially reduces the PSI (exchangeable sodium percentage) on the soil. Sulfur produced better effect. The high RAS (sodium adsorption ratio) of the water decreases infiltration after cropping lettuce during five cycles. There is a positive effect of both amendments on infiltration. The use of gypsum as an amendment causes a minor decrease in soil hydraulic conductivity. Continued irrigation with sodium bicarbonate water causes a decrease in lettuce yields over time. The best yields were obtained using gypsum. The amendments have a positive effect in the size of the harvested plants.

Keywords: inorganic amendments, infiltration, sodium bicarbonate water, *Lactuca sativa*.

ÍNDICE

	Página
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Indice	v
Lista de tablas.....	viii
Lista de figuras	x
Lista de fotografías	xii
Abreviaturas utilizadas.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. 1 Descripción general.....	1
1. 2 Calidad de agua para riego.....	3
1.2.1 Salinidad.....	4
1.2.2 Sodicidad.....	5
1.2.3 Toxicidad.....	7
1.3 El cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	8
1.4 Antecedentes.....	10
1.4.1 Recuperación de suelos afectados.....	12
1.4.1.1 Utilización del yeso como enmienda.....	13
1.4.1.2 Utilización de azufre como enmienda.....	15
1.4.2 Efecto de la salinidad sobre el cultivo de lechuga.....	17
1.5 Definición del tema de tesis.....	18
1.5.1 Hipótesis.....	18
1.5.2 Objetivos.....	18
1.5.2.1 Objetivo general.....	18
1.5.2.2 Objetivos específicos.....	19

2.1 Materiales y Métodos.....	20
2.1.1 Descripción general y diseño del ensayo.....	20
2.1.2 Muestro inicial: agua de riego y suelo.....	26
2.1.2.1 Toma de muestra del agua de riego.....	26
2.1.2.2 Muestreo inicial del suelo.....	27
2.1.3 Medición inicial de los parámetros físicos del suelo.....	28
2.1.3.1 Infiltración.....	28
2.1.3.2 Conductividad hidráulica.....	32
2.1.4 Determinación del coeficiente de uniformidad del sistema de riego.....	34
2.1.4.1 Metodología de evaluación utilizada.....	35
2.1.5 Cálculo teórico de las necesidades de yeso y azufre.....	36
2.1.6 Cálculo realizado para las necesidades de yeso y azufre en las condiciones del ensayo.....	37
2.1.7 Mediciones realizadas durante el ensayo en el suelo.....	37
2.1.7.1 Variables químicas.....	37
2.1.7.2 Variables físicas.....	37
2.1.8 Determinaciones de calidad de agua realizadas durante el ensayo.....	37
2.1.9 Mediciones en la planta realizadas durante el ensayo	38
2.2 Cálculo del kc para lechuga bajo las condiciones del cultivo.....	38
2.3 Análisis estadístico.....	38
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
3.1 Mediciones en el suelo.....	40
3.1.1 Variables químicas.....	40
3.1.2 Variables físicas.....	48
3.1.2.1 Infiltración.....	48
3.1.2.2 Conductividad hidráulica.....	.63
3.2 Caracterización físico-química del agua en distintas fechas.....	65

3.3 Mediciones en la planta.....	66
3.3.1 Evaluación del rendimiento del cultivo.....	66
3.3.2 Evaluación del crecimiento vegetativo del cultivo.....	69
3.4 Cálculo del Kc para lechuga bajo las condiciones del cultivo.....	80
CONCLUSIONES	79
Perspectivas futuras.....	81
Bibliografía.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de la calidad de agua para riego según valores de CSR (carbonato de sodio residual).....	6
Tabla 1.2. Carencia de oligoelementos en lechuga.....	9
Tabla 1.3. Análisis de suelos en tres situaciones, según antigüedad de manejo.....	12
Tabla 1.4. Dosis de azufre para alcanzar un pH de 6,5	16
Tabla 2.1. Fechas de trasplante para cada ciclo de lechuga.....	20
Tabla 2.2. Análisis de laboratorio del guano vacuno incorporado.....	23
Tabla 2.3. Plan de fertiriego utilizado en cada ciclo de lechuga (ejemplo del 1º ciclo).....	23
Tabla 2.4. Valores obtenidos en la calibración de las sondas Decagon (EC-5).....	25
Tabla 2.5. Análisis de agua de la EEA INTA Anguil, Febrero 2013.....	26
Tabla 2.6. Análisis inicial de suelo de muestras compuestas por bloque a dos profundidades.	27
Tabla 2.7. Análisis inicial de suelo en las ocho parcelas experimentales a dos profundidades. Conductividad eléctrica, pH, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).....	28
Tabla 2.8. Escala de calificación de Conductividad Hidráulica.....	34
Tabla 2.9. Valores obtenidos de Conductividad Hidráulica (K) inicial para cada parcela experimental a dos profundidades de muestreo.....	34
Tabla 2.10. Valores de Coeficiente de Uniformidad de Riego (CU).....	35
Tabla 3.1. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre los valores de Conductividad Eléctrica (CE: mS cm^{-1}) en el extracto de saturación del suelo.....	40
Tabla 3.2. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el pH del suelo (pasta saturada).....	41
Tabla 3.3. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre la CIC del suelo.....	42
Tabla 3.4. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de calcio en el suelo.....	43
Tabla 3.5. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de magnesio en el suelo.....	44
Tabla 3.6. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de potasio en el suelo.....	44
Tabla 3.7. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de sodio en el suelo.....	45

Tabla 3.8. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el PSI en el suelo.....	47
Tabla 3.9. Infiltración acumulada inicial y final para cada tratamiento.....	48
Tabla 3.10. Conductividad hidráulica final obtenida para cada subparcela experimental.	49
Tabla 3.11. Comparación entre la CH inicial y la CH final para cada subparcela experimental.....	63
Tabla 3.12. Efecto de los tratamientos de enmiendas sobre la Conductividad hidráulica (K en mm/h) en los dos ambientes de riego R1 y R2.....	64
Tabla 3.13. Porcentaje de disminución de la K final en relación a la K inicial (mm/h) para cada subparcela experimental.....	64
Tabla 3.14. Efecto de los tratamientos con enmiendas sobre la disminución de la conductividad hidráulica del suelo (expresada en %) al final del ensayo en los dos ambientes de riego.....	65
Tabla 3.15. Análisis de agua de EEA INTA Anguil realizados durante el ensayo en tres fechas de muestreo.....	65
Tabla 3.16. Rendimiento final de lechuga expresado en kg.m ⁻² para cada tratamiento durante los cinco ciclos de cultivo	66
Tabla 3.17. Rendimiento final de lechuga expresado en peso fresco por planta (kg) para cada tratamiento durante los cinco ciclos de cultivo.....	67
Tabla 3.18: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 1º ciclo.....	70
Tabla 3.19: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 2º ciclo.....	71
Tabla 3.20: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 3º ciclo.....	74
Tabla 3.21: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 4º ciclo.....	76
Tabla 3.22: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 5º ciclo.....	78
Tabla 3.23: Cálculo de los Kc de lechuga para cada ciclo de cultivo.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación espacial de los principales acuíferos reconocidos de la provincia de La Pampa.....	3
Figura 2.1. Diseño del ensayo.....	21
Figura 2.2. Curva de calibración de las sondas instaladas.....	26
Figura 2.3. Curvas de infiltración inicial para cada parcela experimental.....	29
Figura 2.3.1. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 1.....	29
Figura 2.3.2. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 2.	29
Figura 2.3.3. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 3.	30
Figura 2.3.4. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 4.	30
Figura 2.3.5. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 5.	31
Figura 2.3.6. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 6.	31
Figura 2.3.7. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 7.	32
Figura 2.3.8. . Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la Parcela 8.	32
Figura 2.4. Esquema del muestreo realizado para determinar la Conductividad Hidráulica inicial para cada parcela experimental.	
Figura 2.5. Esquema de los puntos de medición para la determinación del CU.	
Figura 3.1. Curvas de infiltración final para cada subparcela experimental.	
Figura 3.1.1. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/ Testigo.	
Figura 3.1.2. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/ Yeso.	
Figura 3.1.3. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/ Azufre.	
Figura 3.1.4. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Testigo.	
Figura 3.1.5. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Yeso.	

Figura 3.1.6. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Azufre.

Figura 3.1.7. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Testigo.

Figura 3.1.8. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Yeso.

Figura 3.1.9. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Azufre.

Figura 3.1.10. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Testigo.

Figura 3.1.11. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Yeso.

Figura 3.1.12. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Azufre.

Figura 3.1.13. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Testigo.

Figura 3.1.14. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Yeso.

Figura 3.1.15. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Azufre.

Figura 3.1.16. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Testigo.

Figura 3.1.17. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Yeso.

Figura 3.1.18. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Azufre.

Figura 3.1.19. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Testigo.

Figura 3.1.20. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Yeso.

Figura 3.1.21. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Azufre.

Figura 3.1.22. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Testigo.

Figura 3.1.23. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Yeso.

Figura 3.1.24. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Azufre.

Figura 3.2. Comparación entre la CH inicial y la CH final (mm/h) para cada subparcela experimental.

Figura 3.3.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 1º ciclo en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.3.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 1º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.4.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 2º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.4.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 2º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.5.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 3º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.5.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 3º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.6.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 4º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.6.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 4º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.7.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 5º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Figura 3.7.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 5º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Necrosis marginal en hojas de lechuga.....	9
Fotografía 2: Diseño del ensayo.....	22
Fotografía 3: Diseño del ensayo y desarrollo del cultivo.....	22
Fotografía 4: Evaporímetro tipo Piché.....	24
Fotografía 5: Sondas para medir humedad edáfica marca Decagon, modelo EC-5 junto con un Data Logger.....	25

ABREVIATURAS UTILIZADAS

Al: Aluminio
Ca: Calcio
CaSO₄.2H₂O: Sulfato de calcio hidratado (yeso)
CaCl₂.2H₂O: Cloruro de calcio
CE: Conductividad Eléctrica
CIC: Capacidad de intercambio catiónico
Cl: Cloro
cmoles(+)/kg: centimoles por kilogramo
CO₃⁻²: Carbonato
CO₃H⁻¹: Bicarbonato
CSR: Carbonato de sodio residual
CU: Coeficiente de uniformidad
CV: Coeficiente de variación
da: Lámina acumulada
DMS: Diferencia mínima significativa
dS m⁻¹: decisiemens por metro
ETc: Evapotranspiración del cultivo
ET₀: Evapotranspiración potencial o de referencia
Fe₂ (SO₄)₃: Sulfato férrico
H: Hidrógeno
H₂SO₄: Ácido sulfúrico
I: Infiltración
li: Infiltración instantánea
IB: Infiltración básica
K: Potasio
K: Conductividad hidráulica
Kc: Coeficiente de cultivo
me L⁻¹: miliequivalente por litro
Mg: Magnesio
m³ ha⁻¹: Metros cúbicos por hectárea
mL: Mililitros
mmhos cm⁻¹: milimhos por cm.
mmol (c) L⁻¹: milimol carga por litro

mm: Milímetros

MO%: Porcentaje de materia orgánica

Na: Sodio

NH₄: Amonio

Nt%: Porcentaje de nitrógeno total

P: Fósforo

PSI: Porcentaje de sodio Intercambiable

qm: Caudal medio de la instalación de riego

q25: Caudal medio (25% que erogan el caudal más bajo)

RAS: Relación de adsorción de sodio.

RAS^o: Relación de Adsorción de Sodio Corregida

RAS_{adj} : Relación de adsorción de sodio ajustado.

R²: Coeficiente de regresión

S: Azufre

t ha⁻¹ : Toneladas por hectárea

Tbmin: Tiempo para alcanzar la infiltración básica en minutos

Wc: Coeficiente de campo

1.INTRODUCCIÓN

1. 1 Descripción general

Actualmente las superficies cultivadas son limitadas, tienden a reducirse como consecuencia del desarrollo de las zonas urbanas y del deterioro debido a la salinización, alcalinización, erosión y la desertización. Desde el punto de vista de la conservación de nuestro planeta, no se debería destinar más superficies al cultivo en detrimento de las masas boscosas. También existe preocupación acerca de las posibles variaciones climáticas que puedan afectar los recursos suelo y agua, como consecuencia del denominado cambio climático, y los efectos sobre los actuales sistemas de producción. Se prevén posibles aumentos de la temperatura y cambios en el régimen de precipitaciones, que en lo inmediato, se verá reflejado en un balance hídrico negativo **(Quiroga, 2009)**.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, el aumento de la producción de alimentos sólo puede obtenerse como consecuencia de una intensificación de la agricultura, lo que significa obtener un mayor rendimiento por unidad de superficie cultivada. Para obtener mejores rendimientos de los cultivos y una mejora en la calidad de la producción, se deben utilizar de manera más eficiente los recursos naturales, como la tierra, el agua y los nutrientes que podemos extraer de la naturaleza potenciando, al mismo tiempo, el estudio de nuevas tecnologías que nos permitan obtener productos agrícolas seguros, abundantes y de alta calidad.

Las producciones intensivas de hortalizas, ornamentales, especies florales y frutas mediante el suministro de agua y la aplicación de fertilizante permiten aumentar la producción de alimentos, sin necesidad de aumentar la superficie cultivable. La producción de hortalizas bajo invernadero ha tenido un amplio crecimiento en el mundo y especialmente, en los últimos años, en nuestro país. La provincia de La Pampa no es la excepción. En casi todas las localidades hay emprendimientos hortícolas bajo invernadero en funcionamiento.

El aumento de rendimiento y calidad que es posible lograr con este sistema permitirían una rentabilidad razonable, sin embargo existen problemas limitantes. Dentro de ellos, uno de los más importantes es la acumulación de sales en la capa superior cultivada del perfil del suelo; pero más grave aún es que dicha acumulación sea preponderantemente

de cationes dispersantes como el sodio en la solución del suelo que afecta negativamente algunas propiedades físicas del mismo tales como la estabilidad estructural, la conductividad hidráulica y la tasa de infiltración, causando una reducción de su capacidad productiva **(Quinteros et al., 2000)**. La degradación mencionada se ve reflejada en la dispersión de la materia orgánica y preponderancia de un medio alcalino. La acumulación de sales se produce por aporte directo del agua de riego de mala calidad (pH mayores a 8 y conductividades eléctricas superiores a $1,5 \text{ dS m}^{-1}$) **(Pilatti et al., 2012)**.

La gestión inadecuada del agua trae asociados problemas como menor productividad, menor calidad de fruta, mayor incidencia de enfermedades, mayor uso de energía y menor eficiencia en el uso del agua y fertilizantes. Por lo tanto, el manejo adecuado del riego es un factor predominante para el éxito del cultivo **(Marouelli, et al., 1999)**.

Al regar, si el agua contiene sales, se hará un aporte extra de las mismas al sistema que deberá ser eliminado por lavado. Según el Laboratorio de Salinidad de suelos USDA “todos los suelos que se riegan se salinizan” **(Sainato, 2006)**. Por ello es fundamental para el uso sustentable de los recursos suelo y agua, conocer la calidad del agua a utilizar, de manera de mantener y preservar la calidad del suelo sin afectar la producción.

El agua subterránea fue y es de vital importancia en la provincia de La Pampa, ya que exceptuando la ribera del río Colorado y hasta la década de 1950, los escurrimientos del río Atuel, toda el agua para consumo humano y la requerida por las actividades productivas, es extraída del subsuelo. Diversos estudios pusieron de manifiesto la existencia de varios acuíferos de cierta importancia, algunos por su extensión y producción potencial, y otros por su ubicación estratégica **(Giai & Tullio, 2008)**. En la **Figura1.1** puede apreciarse la ubicación espacial de los principales acuíferos reconocidos a la fecha.

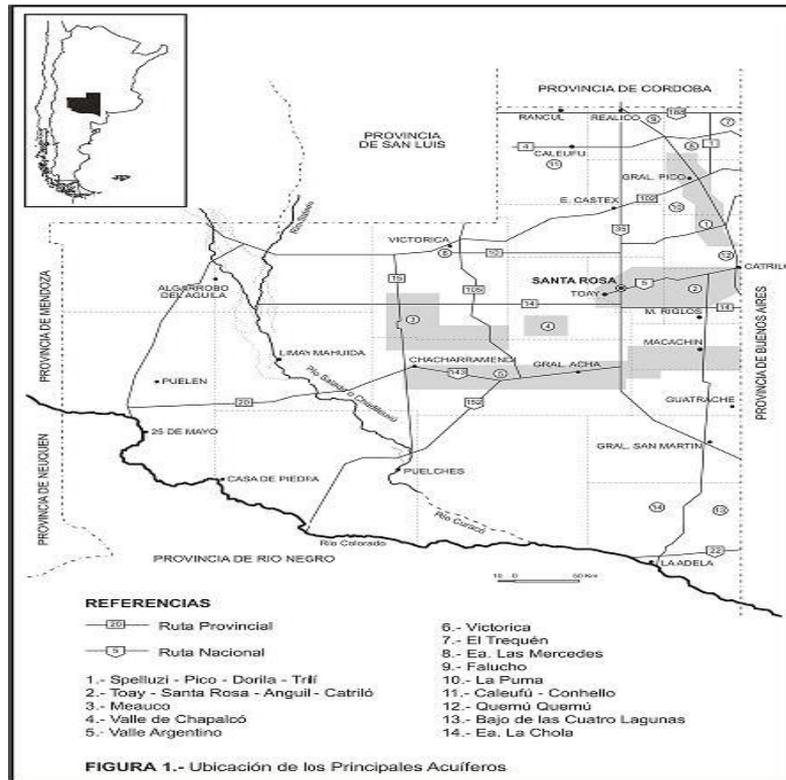


Figura 1.1: Ubicación espacial de los principales acuíferos reconocidos de la provincia de La Pampa. Fuente: Gai y Tullio (2008)

Se viene avanzando desde hace algún tiempo en ensayos sobre sistemas de riego aplicados a cultivos tradicionales de la zona y a la producción hortícola. En la Encuesta Hortícola Provincial, realizada en el año 2007 (**Valerdi, 2007**), se expone que el 91% de los encuestados considera cubierta la provisión de agua. En ese porcentaje están los que no utilizan ninguna técnica para mejorar la calidad del agua, lo cual no significa que la misma sea buena, sino que refleja el grado de desconocimiento por parte de técnicos y productores del sector sobre las consecuencias de usar aguas de calidad dudosa. En la provincia de La Pampa, el agua de origen subterráneo, que es con la que se riegan todos los emprendimientos productivos, no es de buena calidad. En general, son aguas salinas, bicarbonatadas-sódicas, con pH que rondan valores de 8-8,5 y conductividades eléctricas que van desde 1 a 1,5 mmhos. cm⁻¹, superando en algunas zonas estos valores.

1. 2 Calidad de agua para riego

Antes de emprender un proyecto agrícola bajo riego, es imprescindible el estudio de la calidad de agua con la cual se va a regar. El uso continuado de agua mala o dudosa, sumado a un manejo inadecuado del riego puede ocasionar un deterioro de la calidad de

los suelos cuya recuperación puede ser dificultosa de llevar a la práctica, y en algunos casos económicamente inviable (**Prieto y Angueira, 1996**). Diversos factores influyen cuando se evalúa la calidad de agua para riego: tipo de suelo, cultivo a regar, estado fenológico del mismo y condiciones climáticas, aunque en algunos casos sólo se pone énfasis en las características químicas de la misma (**Bresler et al., 1982**). La calidad del agua se evalúa en función de los problemas que potencialmente puede causar su uso sobre los suelos (**Alconada & Minghinelli, 1998; Prieto & Angueira, 1996; Pizarro Cabello, 1990**).

El problema de las aguas consideradas peligrosas, se presenta cuando éstas evolucionan en el suelo en el cual fueron aplicadas a través del riego, ya que el contenido de sales que presentan no es en sí mismo un problema de gravedad. En efecto, la evapotranspiración disminuye la humedad del suelo, pero prácticamente no elimina sales, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca (**Pizarro Cabello, 1990**).

Si el cultivo se realiza en invernáculo todo el agua se deberá aportar en forma de riego, por ello es sumamente importante conocer la calidad del agua con que se riega. En los cultivos bajo cubierta es común que aparezcan altos niveles de sales a causa del agregado de aguas de riego que, aunque originalmente no sean salinas, con la falta de lavado y la ausencia de lluvias, generan acumulación de sales en el suelo (**Balcaza, 2000**). El problema se agrava aún más cuando las aguas disponibles para el riego son de mala calidad. Cuando se habla de calidad de agua para riego, se da por supuesto que se hace referencia a la calidad en relación con la salinidad, en el sentido amplio del término. Sin embargo, la calidad se define en función de tres criterios: salinidad en sentido restringido, sodicidad y toxicidad.

1. 2.1 Salinidad

El criterio de salinidad evalúa el riesgo de que el uso del agua ocasione altas concentraciones de sales en el suelo, con el correspondiente efecto osmótico y disminución de rendimientos de los cultivos.

Cuando aumenta la concentración de sales en la solución edáfica, las plantas tienen que hacer un gasto extra de energía para absorber el agua, ya que las fuerzas de retención aumentan debido a la afinidad de las sales por el agua. Este efecto acumulativo trae como consecuencia que la disponibilidad de agua para el cultivo disminuya (**Fuentes Yagüe, 1995; Prieto & Angueira, 1996**). El esfuerzo mayor que debe realizar la planta para alimentarse de la solución del suelo, genera un gasto de energía adicional y con ello

menores posibilidades de crecimiento, menor rendimiento y calidad de los cultivos. Por eso, cuánto más salina sea la solución edáfica, mayores dificultades para absorber agua por parte de las plantas **(Balcaza, 2000)**.

La concentración de sales en la zona radical varía con la profundidad. Inmediatamente después del riego, la mayor cantidad de agua disponible para las plantas se encuentra en la capa superior de la zona radical, pero al aumentar la evapotranspiración, el contenido de agua disminuye y aumenta la concentración salina en esa zona **(Armstrong, et al., 1996; Fuentes Yagüe, 1995)**. Si bien, la salinidad reduce la disponibilidad de agua para los cultivos, éstos responden de diferentes formas. Algunos cultivos pueden producir rendimientos aceptables a niveles de salinidad relativamente altos.

1. 2. 2 Sodicidad

El criterio de sodicidad analiza el riesgo de que se induzca en el suelo un elevado Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), con deterioro de su estructura. Esto produce efectos desfavorables sobre la estabilidad estructural debido al hinchamiento y la dispersión coloidal **(Ausilio y Colomar, 1998; Armstrong, et al., 1996; Pizarro Cabello, 1990)**. El hinchamiento y la dispersión de arcillas son dos mecanismos que derivan en cambios en las propiedades hidráulicas y la estructura del suelo, lo que ocasiona una reducción en la velocidad de infiltración del agua. Este hinchamiento, que ocurre dentro de un volumen dado de suelo, y que resulta en la ruptura de agregados y el movimiento de partículas de arcilla, contribuye a la obstrucción de los poros y por ende, reduce la conductividad hidráulica **(Oster, 1994)**.

Una aproximación al PSI es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

$$RAS = Na^+ / [(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / 2]^{1/2}$$

Donde Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} son determinados en el extracto de saturación y se expresan en miliequivalentes por litro (me L⁻¹).

Esta ecuación ha dado lugar al nomograma descrito por **Richards (1954)** y a su clasificación, la cual presentó varios inconvenientes. A partir de la RAS del agua de riego, se puede calcular en la escala del nomograma el valor del PSI del suelo en equilibrio con el agua de riego.

El inconveniente del índice RAS, al no reflejar el efecto de los precipitados, dio lugar a distintos índices que intentaban subsanar el problema, como el carbonato de sodio residual

(CSR) (**Eaton, 1950; USDA, 1954**). Es un índice que resulta útil, porque no siempre se encuentra una relación establecida entre la RAS del agua y el PSI, debido a que también influye el contenido de carbonatos y bicarbonatos del agua de riego.

$$CSR = \left[\left(CO_3^{-2} + CO_3H^{-1} \right) - \left(Ca^{+2} + Mg^{+2} \right) \right]$$

Los trabajos realizados por **Wilcox et al., (1953)** demostraron que cuando se incrementan los valores de bicarbonatos en el agua, se incrementa la cantidad de carbonato de calcio precipitado. También observaron que el incremento del PSI fue directamente proporcional a la precipitación de esta sal. **En la Tabla 1.1** se presenta la clasificación de la calidad de agua para riego según valores de CSR.

Tabla 1.1: Clasificación de la calidad de agua para riego según valores de CSR (carbonato de sodio residual) (**adaptado de Wilcox et al., 1953**).

CSR mmol(c) L ⁻¹	Clasificación
0 - 1,25	Buena
1,25 - 2,50	Marginal
Más de 2,50	No adecuada

En 1965, Bower & Wilcox crearon una modificación del índice RAS, el RAS_{ad} (Relación de Adsorción de Sodio Ajustado), el cual ha sido corregido por **Ayers & Westcot (1976)**, en un trabajo encargado por la FAO. Una evaluación detallada de este índice demostró posteriormente que sobreestima la peligrosidad del sodio.

Actualmente se considera que el índice más adecuado para definir el riesgo de sodicidad de un agua de riego es el RAS⁰ (Relación de Adsorción de Sodio Corregida), definido por **Suárez (1981)**, según la expresión:

$$RAS^0 = Na^+ / [(Ca^0 + Mg^{+2}) / 2]^{1/2}$$

Donde Na⁺ y Mg⁺² tienen el mismo significado y unidades que en la fórmula anterior y Ca⁰ es la concentración corregida de calcio en el agua de riego, en meL⁻¹.

El valor Ca⁰ se puede obtener de una tabla, sugerida por **Suárez (1981)**. Depende de la salinidad del agua de riego y de los factores que afectan la dilución o precipitación de

calcio, es decir, el contenido de dióxido de carbono disuelto en el agua del suelo y la relación, en el agua de riego, entre el contenido de bicarbonatos y de calcio, en me L⁻¹.

Coincidentemente, **Ayers & Westcot (1984)**, atribuyen los problemas de permeabilidad del suelo no sólo al contenido de sodio de las aguas de riego, sino también al contenido de carbonatos y bicarbonatos.

Cuando la salinidad del agua de riego es muy baja, existe alto riesgo de sodicidad, incluso a valores muy bajos del RAS^o. De hecho, con conductividades inferiores a 0,2 dSm⁻¹, las aguas de riego ocasionan problemas de sodicidad, independientemente del valor de RAS^o. Por tal razón, las aguas de lluvia pueden llegar a ser la causa de la dispersión de los coloides en la superficie del suelo, con sus problemas derivados: pérdida de estructura, impermeabilidad, alta escorrentía, erosión, etc. (**Pizarro Cabello, 1990**).

Según **Costa (1996)** para desplazar al sodio del complejo de intercambio del suelo, hay que agregar calcio, en cantidad equivalente a la cantidad de sodio a desplazar. Por otra parte concluye que el lavado del suelo con agua de lluvia no es tan efectivo para desplazar al sodio como ocurre con las sales.

Cuando las aguas que se usan para riego son bicarbonatadas sódicas, la concentración de sodio en el suelo aumenta y se induce la precipitación de carbonato de calcio. Esto ocasiona disminución de la permeabilidad y alteración de la estructura del suelo, mayor aun cuando el agua es de baja concentración salina (**Costa, 1996**).

1. 2. 3 Toxicidad

El criterio de toxicidad estudia los problemas que pueden crear determinados iones. Los iones que más problemas inducen son cloro (Cl) y sodio (Na), aunque otros como el nitrato, el sulfato, el amonio y el boro también son tóxicos. La toxicidad, a diferencia de la salinidad, es un problema interno de la planta que se produce cuando determinados iones, absorbidos principalmente por las raíces, se acumulan en las hojas mediante la transpiración, llegando a alcanzar concentraciones nocivas (**Maas, 1984**).

Se considera que la toxicidad por sodio se debe a un problema complejo que incluye deficiencias de calcio y otras interacciones. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua. Los síntomas de toxicidad por sodio son el quemado y muerte de tejidos en la periferia de la hoja. Las hojas más maduras son las primeras en acusar los síntomas, luego avanza hacia el centro de la planta y finalmente llega a las hojas jóvenes.

El cloro se mueve fácilmente desde donde es absorbido por la planta hasta acumularse en las hojas. Por este motivo, es común detectar toxicidad producida por Cl. Cuando la concentración sobrepasa la tolerancia del cultivo aparecen claros síntomas de toxicidad como hojas quemadas y necrosis de tejidos **(Bernstein, 1974)**.

1.3 El cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Una de las hortalizas de hoja más cultivadas por su rentabilidad en forma protegida es la lechuga, la cual, bajo sistema de producción en invernadero aumenta su calidad comercial, ya que se obtienen plantas sanas, limpias, tiernas, grandes, de buen aspecto y con larga vida poscosecha, permitiendo una continuidad de la producción durante todo el año no sólo por el mayor rendimiento sino también por el acortamiento de su ciclo productivo ya que no es afectado por heladas, lluvia, granizo, etc.

Aunque vegeta bien en suelos diversos, prefiere los terrenos francos que no retengan excesiva humedad, con abundante contenido de materia orgánica. Resiste niveles moderados de salinidad, aunque en invernaderos, el desarrollo del cultivo puede verse afectado por el incremento de sales solubles. La resistencia a la salinidad en lechugas es muy variable entre cultivares. No resiste la acidez y se adapta bien a terrenos ligeramente alcalinos. El pH óptimo está entre 6,8 y 7,4 **(Di Benedetto, 2005)**.

En el caso particular de la producción de lechuga bajo invernadero en la región Semiárida Pampeana, en donde las aguas que se emplean para riego son en general salinas, bicarbonatadas sódica, se presenta una situación de estrés para el cultivo que tiene varias implicancias fisiológicas sobre el mismo: incremento de la concentración osmótica interna, disminución de la superficie foliar, modificación de la tasa fotosintética y de la translocación de fotoasimilados, generando una disminución de los metabolitos necesarios para el crecimiento de los órganos en expansión. Finalmente, en un cultivo como la lechuga, donde lo que se comercializa son las hojas, lo que se ve afectado en última instancia es el rendimiento y la calidad.

En general, los efectos nocivos de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas se resumen en una disminución del potencial hídrico de la solución del suelo y disminución de la disponibilidad de agua para la planta, a la vez que la toxicidad específica de iones Na⁺ y Cl⁻ provocan desequilibrios nutricionales debidos a la competencia en la absorción de nutrientes **(Tejera et al., 2006)**.

El exceso de sodio, por otra parte, provoca déficit de calcio y magnesio. Bajos niveles de calcio, tanto en el suelo como en el agua de riego entraña riesgos de necrosis marginales de las hojas de lechuga. El calcio forma parte de la laminilla media, interviene en las

membranas celulares otorgándoles estabilidad y permeabilidad. Niveles elevados de calcio aumentan la resistencia a Botritis y Tip Burn.

El magnesio forma parte de la molécula de clorofila, también activa enzimas, por esta razón tiene gran importancia en el metabolismo energético. Su carencia provoca necrosis internerval con pigmentación antociánica y necrosis final (**Fotografía 1**).

Zhilong Bie, et al., (2004) encontraron que el área foliar, peso seco, longitud de hoja, ancho de la hoja, tasa fotosintética y conductancia estomática de la lechuga disminuyeron con crecientes concentraciones de sulfato y bicarbonato de sodio.

La lechuga es sensible a la carencia de boro, cobre, zinc y molibdeno. En la **Tabla 1.2** se detallan los síntomas visuales que se observan en esta hortaliza de hoja ante la falta de los microelementos mencionados (**Thicoipe, 1997**). El molibdeno interviene en los procesos de reducción de los nitratos. Una deficiencia en este elemento, en suelos muy ácidos por ejemplo, produce una acumulación de nitratos en las hojas.



Fotografía 1: necrosis marginal en hojas de lechuga.

Tabla 1.2: Carencia de microelementos en lechuga (Thicoipe, 1997)

Fuente: Fertilización CTIFL

Elemento carente	Síntomas visuales en lechuga	Causa de carencia
Boro	Hojas duras y quebradizas. Raíces poco desarrolladas.	Suelo muy calcáreo
Molibdeno	Necrosis terminales y marginales, sobre todo en las hojas viejas, el borde de la hoja está suavemente sobrelevada.	Suelo ácido
Cobre	Clorosis internerval, sobre todo en hojas jóvenes. Necrosis marginales y terminales sobre las hojas viejas. Las partes necrosadas presentan ampollas y de color marrón blanquecino.	Sobreencalado o suelo muy calcáreo.

En cuanto al crecimiento, la temperatura óptima está alrededor de 18°C, con un rango que oscila entre 7 y 24°C. La temperatura del suelo juega un papel importante. El crecimiento y la actividad de las raíces disminuyen cuando la temperatura es inferior a 7°C. La relación entre temperatura del suelo y temperatura ambiente influye sobre el crecimiento de la planta interviniendo en la relación consumo de agua /desarrollo foliar. Asimismo para asegurar un desarrollo vegetativo equilibrado, las necesidades en luz son más elevadas cuando las temperaturas aumentan (**Thicoipe, 1997**).

1.4 Antecedentes

La utilización del riego en invernaderos no es una opción, sino una necesidad, ya que es el único medio de suministrarle al cultivo el agua y los nutrientes que necesita para su crecimiento y desarrollo. Pero esta práctica puede ocasionar la degradación de las propiedades del suelo si no se tiene en cuenta la calidad del agua y el conocimiento de los procesos que rigen el manejo eficiente del sistema suelo-planta-agua.

Existen muchos antecedentes nacionales e internacionales que reportan cambios en las propiedades químicas de los suelos que fueron regados con agua de mala calidad. En general, se refieren a trabajos realizados en cultivos extensivos con riego suplementario. Bajo invernadero, los antecedentes son pocos, pero se supone que los cambios son de igual o mayor magnitud que en cultivos extensivos, ya que en este caso no existe el efecto de lavado por agua de lluvia.

En el trabajo realizado por **Andriulo, et al., (1998)** se observó que el riego complementario durante 11 años con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas (con 1 dS m⁻¹ de CE y RAS de 10,6) produjo cambios de magnitud considerable en algunas de las propiedades evaluadas en un Argiudol típico de la serie Pergamino: se duplicó la Conductividad Eléctrica (CE), el PSI se sextuplicó y el pH del suelo aumentó en una unidad.

Estudios llevados a cabo sobre muestras superficiales de suelo, extraídas de la llanura pampeana para evaluar el comportamiento de los mismos al ponerlos en contacto con sus respectivas aguas subterráneas, determinaron que por efecto del riego, el pH aumentó en promedio cerca de una unidad y el PSI aumentó de un valor medio de 2,6% a 8,7% (**Peinemann, et al., 1998**).

En Manfredi, provincia de Córdoba, **Salas y Lovera (1998)**, reportaron incrementos de la CE desde 0,8 a 1,7 dS m⁻¹ y del PSI de 0,6 a 7,6% a una profundidad 0-10 cm como consecuencia de la aplicación de 375 mm de riego en un Haplustol éntico.

Costa, (1999) señala que, regando dos años con aguas de riego de RAS 15, 17 y 19 y CE de 1,3; 1,6 y 2,8 dS m⁻¹, se produjeron incrementos en el valor de la RAS del horizonte superficial de 2,5; 6 y 14 respectivamente. La densidad aparente, la lámina de agua infiltrada y la conductividad hidráulica se vieron afectadas sólo con el máximo RAS. La CE en la superficie del suelo fue de 0,8; 1,3 y 2 dS m⁻¹, respectivamente.

En Salto, provincia de Buenos Aires, los trabajos realizados por **Irurtia y Mon (1998)** en sitios regados durante 5 años registraron leves incrementos del pH (de 5,9 a 6,1) y de la salinidad. En cambio, los parámetros físicos estudiados mostraron claras tendencias de deterioro.

Balcaza (2003), reporta los cambios que se producen en los índices químicos de los suelos de la región del Cinturón Verde del Gran Buenos Aires relacionados con la calidad del agua de riego y el manejo (**Tabla 1.3**). Partiendo de un mismo suelo con pH 6,2 y conductividad eléctrica de 0,84 dS m⁻¹, el suelo bajo 3 años de invernadero presentó un pH de 7,5 y CE de 1,8 dS m⁻¹, mientras aquel que se mantuvo durante 12 años bajo invernadero presentó un pH de 8,5 y CE de 9 dS m⁻¹. Todo esto a causa de los aportes de fertilizantes y el empleo del agua de riego. Los cambios más significativos ocurren en los niveles de fósforo y sobre todo magnesio y sodio; el fósforo se ve incrementado por la fertilización y los abonos orgánicos y los cationes por el riego. Hay una tendencia hacia el desequilibrio entre los cationes con una caída fuerte en los niveles de calcio, esto significa que los suelos bajo estas condiciones tendrán inconvenientes con la formación de agregados estables.

Tabla 1.3: Análisis de suelos en tres situaciones según antigüedad de manejo en el Cinturón Verde del Gran Buenos Aires (**Balcaza, 2003**)

	Suelo Natural	3 años de invernáculo	12 años de invernáculo
pH (pasta)	6,2	7,5	8,5
CE	0,84	1,8	9,0
Carbono (%)	2,5	1,7	3,0
Materia Orgánica (%)	4,3	3,0	5,7
Nitrógeno Total (%)	0,24	0,28	0,31
Fósforo asimilable (Bray)	20,7	166,0	196,0
CIC (me/100g)	19,3	23,2	26,2
Potasio (me/100g)	2,4	1,97	3,5
Calcio (me/100g)	12,8	12,6	7,1
Magnesio (me/100g)	2,1	4,5	5,4
Sodio (me/100g)	0,1	2,8	2,8
% de Potasio en la CIC	12,4	8,5	13,4
% de Calcio en la CIC	66,3	54,3	27,1
% de Magnesio en la CIC	10,9	19,2	20,6
% de Sodio en la CIC	0,5	12,1	10,7

1.4.1 Recuperación de suelos afectados

De acuerdo a los parámetros de calidad del agua y características del suelo que se tengan, será importante evaluar estrategias que permitan el mejoramiento del suelo dentro del invernadero. Una de ellas es la utilización de enmiendas o mejoradores químicos que aumentan la proporción del catión calcio frente al catión sodio que está en el suelo. Así disminuye la RAS y aumenta la infiltración (**López-Aguilar et al., 2012**).

Las enmiendas se pueden clasificar en dos grupos. El primer grupo incluye aquellos mejoradores que funcionan como fuente independiente de calcio, como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y el cloruro de calcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). El segundo grupo está formado por aquellos mejoradores que promueven la disolución del calcio presente en el suelo (suelos calcáreos, principalmente) (**Hussain et al., 2001**), como el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el azufre (S) y el sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$).

Entre las propiedades químicas de los suelos, existe un valor que representa de alguna manera la fertilidad potencial del mismo. Es un dato que refleja las posibilidades que tiene ese suelo para mantener nutrido a un cultivo durante un período de tiempo determinado. Este índice es la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), y se obtiene como la suma de todos los cationes que puede aportar ese suelo. Estos son: potasio (K), calcio (Ca), sodio (Na), magnesio (Mg), amonio (NH_4), hidrógeno (H), aluminio (Al), etc. Se expresa

en miliequivalentes por 100 gramos de suelo (me/100 g de suelo) o centimoles por kilogramo de suelo (cmoles(+) kg⁻¹). Este valor está relacionado con el porcentaje de arcilla y humus que tenga ese suelo y será mayor, en condiciones normales, cuanto mayor sea esos porcentajes. Interesa conocer qué porcentaje de cada catión ocupa un lugar en el complejo de cambio. Cuando el porcentaje de sodio respecto a la CIC (PSI estimado) supera el 5 % es cuando se debe corregir con yeso (**Balcaza, 2001**).

1.4.1.1 Utilización del yeso como enmienda

El yeso ha sido ampliamente utilizado como fuente de calcio. Comparado con las otras enmiendas disponibles, es relativamente barato, fácil de conseguir y de aplicar (**Qadir et al., 2006**). Actúa en el complejo de intercambio desplazando al sodio para luego eliminarlo de la zona radical por lavado. De esta manera se mejora la estructura del suelo lo que facilita el drenaje y la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta. La velocidad con la cual el yeso se incorpora a la solución depende de la finura del material. Aunque su costo es más elevado, el yeso finamente molido (partículas de menos de 0,25 mm de diámetro) se disuelve más rápidamente y es el más indicado para la aplicación en el agua de riego. En el caso de la incorporación en el suelo, puede usarse yeso con un grado de pureza menor y con tamaño de partícula más gruesa (**Keren y Shaimberg, 1981**).

El yeso es poco soluble. Se estima un valor alrededor de 0,30 g/100 mL de agua a 25°C. La solubilidad del yeso es afectada por el tamaño de las partículas, la temperatura y la salinidad del agua. Cuanto más finas son las partículas, más fácil de disolver (**Mater et al., 1990**).

Andreani, et al., (1999) coinciden en que el yeso es la enmienda más utilizada para reducir el PSI en los suelos, causante de los problemas de infiltración. En el sur de Santa Fe, se realizaron experiencias con esta enmienda, las cuales sirvieron para demostrar la efectividad del yeso para disminuir la sodificación.

El lavado de sales no arrastra el sodio adsorbido y hasta puede ser una técnica contraproducente al disminuir la concentración de sales disueltas, lo que facilita aún más el efecto dispersante (**Fuentes Yagüe, 1995; Pizarro, 1990**). La recuperación de un suelo sódico exige disminuir el PSI hasta valores aceptables, es decir, reemplazar parte del sodio adsorbido por otros cationes. Esto se consigue de diversas formas, pero todas

ellas tienen en común la adición de calcio en forma de enmiendas de yeso, cloruro cálcico, etc. (**Bohn, et al., 1993**).

Según **Pizarro Cabello (1990)** si el suelo es salino-sódico, primero se deberá adicionar el calcio y luego lavar las sales.

En un estudio experimental realizado por **Rubinsky de Lis (1962)** en suelos salinos-sódicos de Israel, en laboratorio e invernáculo, se concluye que el sólo lixiviado del suelo no alcanza a liberar la cantidad de calcio suficiente para reemplazar al sodio del complejo. El agregado de yeso al suelo resulta beneficioso, pero si va acompañado de una lixiviación con más de $10.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Lazovich, et al., (1985), probaron el efecto de diferentes enmiendas sobre un suelo Natracuol típico en invernadero. Encontraron que el yeso fue la enmienda que mayor eficiencia presentó, en función de los volúmenes de agua requerido para desplazar una cantidad determinada de sodio. Sin embargo, reportaron que el yeso en condiciones de invernáculo, produjo una depresión en los rendimientos, lo cual puede corregirse con el agregado de superfosfato triple.

En suelos de invernáculo la provisión de fósforo, luego de varios años de agregado de materia orgánica y fertilizantes, es suficiente y es difícil que se produzca una depresión en los rendimientos por causa de la deficiente provisión de este elemento.

En el norte de India, **Bajwa, et al., (1983)** evaluaron los efectos del riego con agua bicarbonatada sódica sobre el suelo y los rendimientos de trigo y maíz. El rendimiento promedio de maíz disminuyó significativamente con el aumento de los niveles de conductividad eléctrica y RAS_{adj} del agua de riego. El rendimiento del trigo no se vio afectado. La aplicación de yeso disminuyó el porcentaje de sodio intercambiable del suelo (PSI) y el pH.

Rengasamy y Olsson (1991) determinaron que la aplicación de yeso a un suelo sódico, disminuyó el pH entre 0,5 y 1 unidad, debido a efectos de fuerzas iónicas que favorecen la formación de complejos de cationes con el ión SO_4^{-2} , conduciendo a la reducción del pH.

Chorom y Rengasamy (1997) en un ensayo de laboratorio, hallaron que la aplicación directa de yeso en un suelo alcalino redujo el pH del mismo desde 9,38 hasta 7,89.

En un trabajo realizado por **Quinteros, et al., (2000)**, donde evaluaron el efecto del agregado de yeso sobre distintas características físico - químicas de un suelo disperso por sodio, se concluyó que la enmienda con yeso representa una alternativa adecuada para corregir problemas de suelos dispersos. La adición de yeso, mediante la disminución del sodio intercambiable, produjo una recuperación en las condiciones físicas del suelo, repercutiendo en un incremento de la productividad de forraje y posibilitando una mejor utilización del fertilizante por parte del cultivo. La mejora por adición de yeso quedó evidenciada en el cambio producido sobre la estabilidad estructural del sistema poroso del suelo y por el aumento en la mineralización de la materia orgánica. Se pudo comprobar que los efectos positivos del yeso en el suelo se mantuvieron a lo largo del tiempo que duró el ensayo (26 meses).

1.4.1.2 Utilización de azufre como enmienda

El azufre elemental (S) es el acidificante más empleado, y el mecanismo por el cual se transforma en ácido sulfúrico es producto de la oxidación generada por acción de bacterias del género *Thiobacillus*, siendo *Thiobacillus thiooxidans* la especie más importante (**Chapman, 1990; Miyamoto, 1998**). Sin embargo, otros autores señalan que bacterias heterotróficas y autotróficas facultativas del suelo, pueden ser de mayor relevancia, debido a que se encuentran en mayor cantidad que el género *Thiobacillus* (**Miyamoto, 1998**).

Para que se produzca la oxidación del azufre en forma eficiente es preciso que existan condiciones favorables tales como, la existencia de bacterias adecuadas, suficiente humedad en el suelo (la óptima es capacidad de campo) y el diámetro de las partículas de azufre lo más finas posible (**Magnífico y Ferrari, 1987**). La temperatura que debe tener el suelo para la oxidación del azufre se encuentra entre 4 a 45°C, con un rango óptimo entre los 25 y 40°C para la mayoría de ellos (**Deng y Dick, 1990; Miyamoto, 1998**).

La oxidación del azufre es una reacción exclusivamente superficial y las moléculas del exterior de las partículas están expuestas a una mayor actividad química y biológica. Consecuentemente, la cantidad de sulfato producido por unidad de tiempo es una función total del área superficial del azufre y no de su masa (**Sierra, et al., 2007**).

El azufre actuando como agente en la oxidación microbiológica, reacciona con los carbonatos naturalmente presentes produciendo sulfato de calcio, fuente de calcio

reemplazante del sodio y además, liberando dióxido de carbono, eficiente reductor del pH edáfico (**Rubinsky de Lis, 1962**).

Atloe & Olson (1966), demostraron que los niveles óptimos de oxidación del azufre se obtuvieron con contenidos de humedad cercanos a capacidad de campo y a una temperatura de 24°C.

Lazovich et al., (1985) en su ensayo, encontraron que el azufre aplicado en combinación con CO₃Ca actúa mejorando la solubilidad de este último mientras que, cuando se agrega solo, el pH del suelo desciende en forma notable, perjudicando el desarrollo del trébol blanco de las macetas.

Gale et al., (2001) sugirieron que el efecto principal del azufre en un suelo sódico no es la acidificación directa, sino la disolución de la cal presente en el suelo y la liberación de cationes Ca²⁺ que reemplazan a los cationes Na⁺ para luego ser lixiviados.

Las dosis de azufre necesarias para alcanzar un pH de 6,5 varían con la textura del suelo (**Tabla 1.4**)

Tabla 1.4: Dosis de azufre para alcanzar un pH de 6,5 (**Lorenz y Maynard, 1980**)

Variación de pH deseada	Azufre (kg ha ⁻¹)		
	Tipo de suelo		
	Arenoso	Franco	Arcilloso
8,5 – 6,5	2250	2800	3400
8,0 – 6,5	1350	1700	2250
7,5 – 6,5	550	900	1100
7,0 – 6,5	110	170	340

En un trabajo realizado por **Longo et al., (2005)** donde se evaluó el efecto del agregado de enmiendas (yeso y azufre) al suelo de un invernadero se observó que el pH del suelo tratado con azufre disminuyó notablemente (pH inicial de 9,39; pH final 7,31) hasta el tercer muestreo, lo que indicaría la acción lenta del azufre.

Sierra et al., (2007) utilizaron el azufre elemental como corrector del pH y la fertilidad de algunos suelos de Chile. Reportaron que en todos los suelos analizados hubo una disminución del pH por efecto de la aplicación de azufre, como consecuencia de la transformación a sulfato por oxidación microbológica. La magnitud de esta caída fue

incrementada con el aumento de la dosis de azufre. Además, la conductividad eléctrica de los suelos tuvo un incremento significativo por efecto de la incorporación de azufre elemental, como consecuencia de una mayor solubilidad de las sales presentes. Destacan que aquellos suelos que bajaron en forma significativa su pH por el efecto acidificante del azufre elemental fueron los que más incrementaron los niveles de micronutrientes disponibles; excepto el zinc, cuyos valores aumentaron independientemente de la acidificación de los suelos.

Irurtia & Peinemann (1987) en un trabajo realizado en el extremo inferior del Río Colorado, cuyo objetivo fue la comparación de tratamientos de yeso y azufre con el tratamiento testigo, al que sólo se le aplicaron los lavados correspondientes, determinaron que los tratamientos con yeso y azufre producen importantes reducciones del PSI en las capas más superficiales; en la capa de 0 a 20 cm el yeso y el azufre producen disminuciones del 79 y 82% respecto al testigo, mientras que en las capas de 20 a 40 cm la reducción con respecto al testigo es del 50%. Concluyeron que en los tratamientos con aplicación de yeso y azufre se lograron las mayores reducciones en salinidad y porcentaje de sodio intercambiable.

Zérega & Adams (1991), realizaron un ensayo donde evaluaron los efectos de la cachaza (subproducto de la industrialización de la caña de azúcar) y el azufre sobre un suelo salino-sódico bajo condiciones de invernadero. Determinaron que solamente el azufre, en sus tratamientos principales y en las interacciones con cachaza, ejerció efectos mejoradores sobre las propiedades químicas del suelo. Además, observaron de manera evidente el mejoramiento de la tasa de penetración de agua en el suelo. Recomiendan una dosis de azufre entre 2,5 y 5,0 t ha⁻¹, en suelos con alto contenido de sodio intercambiable y carbonatos de calcio y magnesio precipitados, restringiéndose su uso a suelos regados con aguas con carbonato de sodio residual.

1.4.2 Efecto de la salinidad sobre el cultivo de lechuga

En un experimento realizado por **Andriolo et al., (2005)** se evaluó el crecimiento, desarrollo y rendimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) cv. Vera bajo un sistema hidropónico, en crecientes niveles de salinidad. Determinaron que, para fines comerciales, a niveles superiores de 2,0 mS m⁻¹ y 2,6 mS m⁻¹ el peso fresco de las plantas y el crecimiento disminuyeron respectivamente.

Oliveira et al., (2011), evaluaron el rendimiento de distintos cultivares de lechuga en invernadero regados con agua salina. Determinaron que el número de hojas fue

significativamente afectado por la salinidad, aunque el efecto varió para cada genotipo. Este comportamiento demuestra que el efecto de la sal en el crecimiento de las plantas varía en función del material genético. Concluyeron además que, el número de hojas, el área foliar y la biomasa aérea disminuyen linealmente con el incremento de la salinidad. Asimismo, **Dias et al., (2011)**, en un ensayo con dos cultivares de lechuga en hidroponia, concluyen que la lechuga es sensible al aumento de la salinidad de la solución nutritiva, lo que reduce el número de hojas, área foliar y el peso fresco y seco de las hojas.

1.5 Definición del tema de tesis

En la provincia de La Pampa, el agua de origen subterráneo, que es con la que se riegan todos los emprendimientos productivos, no es de buena calidad. En general, son aguas salinas, bicarbonatadas-sódicas, con pH que rondan valores de 8 - 8,5 y conductividades eléctricas que van desde 1 a 1,5 dS m⁻¹, superando en algunas zonas estos valores. Al mismo tiempo, en los últimos años, la producción de hortalizas bajo invernadero ha tenido un amplio crecimiento. En casi todas las localidades de la provincia hay emprendimientos hortícolas en funcionamiento.

El productor local, a pesar de conocer la problemática, no cuenta con las herramientas técnicas necesarias para hacer un adecuado manejo del suelo y del riego. Es necesario determinar cómo, con el uso continuado de agua de mala calidad en un suelo que no recibe el aporte del agua de lluvia, se afecta el rendimiento de los cultivos y de qué manera mitigar esos daños.

1.5.1 Hipótesis

- El agregado de yeso o de azufre mejora la infiltración del agua y la conductividad hidráulica del suelo.
- El agregado de yeso o de azufre contrarresta el efecto dispersante del uso de aguas sódicas en cultivos continuos en invernáculo.
- En suelos modificados o tratados con enmiendas químicas es necesario aplicar láminas de riego más altas para asegurar la eliminación del sodio por lixiviación.
- La modificación de las condiciones del suelo por efecto combinado de enmiendas y riego permite mejorar el rendimiento de lechuga bajo invernadero.

1.5.2 Objetivos

1.5.2.1 Objetivo general

Evaluar la incidencia de la aplicación de yeso y azufre sobre la mejora de las condiciones físico-químicas del suelo y en la productividad del cultivo de lechuga bajo cubierta.

1.5.2.2 Objetivos específicos

-Determinar el efecto de las enmiendas químicas aplicadas al suelo, durante un año de cultivo en invernadero (cinco ciclos de lechuga), a través de la medición de variables físicas - químicas.

-Establecer la lámina de agua adecuada para el cultivo de lechuga bajo invernadero en la Región Semiárida Pampeana, para optimizar su rendimiento.

2. Materiales y Métodos

2.1.1 Descripción general y diseño del ensayo

El ensayo se realizó bajo condiciones protegidas dentro de un túnel alto de 6 metros de ancho por 27 metros de largo, con riego por goteo ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”, La Pampa, Argentina (36° 32' 23,16" latitud sur y 63° 59' 21,35" longitud oeste), instalado sobre un suelo con pasto puna. El cultivo que se evaluó fue lechuga (*Lactuca sativa* L.), variedad crispa, cultivar Brisa, durante cinco ciclos comerciales consecutivos (un año calendario aproximadamente) (**Tabla 2.1**). La iniciación del cultivo se realizó a través del trasplante de plantines que fueron comprados a una plantinera de la zona.

Tabla 2.1: Fechas de trasplante para cada ciclo de lechuga

Ciclo	Fecha de trasplante
1º	01/03/2013
2º	07/05/2013
3º	04/09/2013
4º	12/11/2013
5º	13/02/2014

Se establecieron dos ambientes de riego y tres tratamientos de enmiendas.

Los ambientes de riego fueron: $R_1 = E_{tc}$ y $R_2 = 1,30 E_{tc}$, estimada a partir de los datos de humedad del suelo medido con sondas Decagon. Para tener una referencia de la demanda de agua se instaló un evaporímetro tipo Piché. Se sabe que la E_{tc} se determina a partir de la siguiente fórmula: $E_{tc} = E_{T_0} \times k_c$. (E_{tc} : Evapotranspiración del cultivo, E_{T_0} : Evapotranspiración potencial o de referencia y k_c : Coeficiente de cultivo). En este caso se tienen dos datos: la E_{tc} estimada a partir de los datos de las láminas de riego y el valor de la E_{T_0} . Por lo tanto se estimó el k_c para estas condiciones de cultivo y de evaporímetro las cuales difirieron notablemente de las sugeridas por la FAO para lechuga: $K_{c\ inc}$: 0,7; $K_{c\ med}$: 1,05 y $K_{c\ fin}$: 0,75, en las cuales toma como referencia la E_{T_0} calculada a partir de datos climáticos completos.

Para cada ambiente de riego se realizaron los tratamientos con enmiendas:

S: azufre; **Y**: yeso y **T**: testigo. El diseño es de dos ambientes (R1 y R2) con parcelas divididas al azar con cuatro repeticiones (**Figura 2.1, Fotografía 2 y 3**). Los datos fueron

analizados con un ANOVA y las medias comparadas con el test de Tukey con un $\alpha=0.05$.

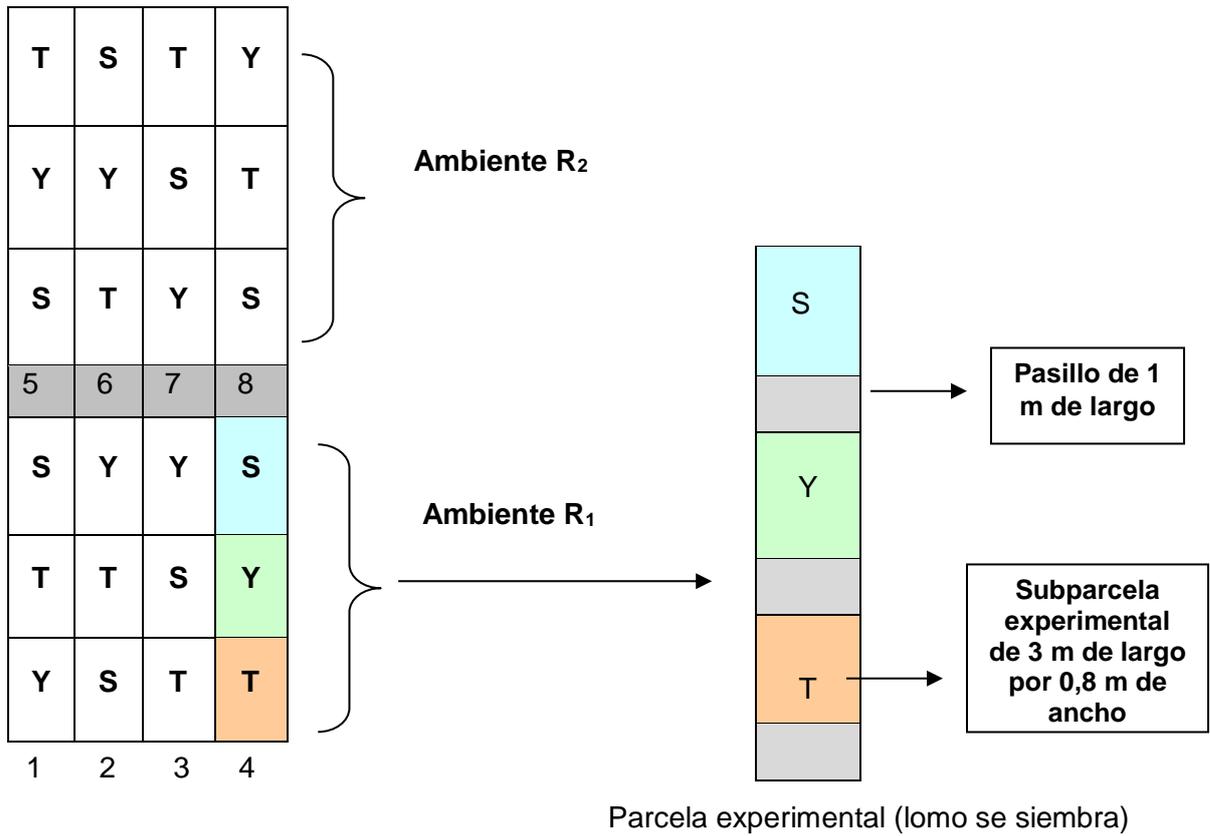


Figura 2.1: Diseño del ensayo

Cada una de esas parcelas tuvo 12 metros de largo por 0,8 metros de ancho y cada subparcela experimental (tres por parcela) 3 metros de largo por 0,8 metros de ancho, dejando un metro entre ellas para que no se solapen los tratamientos con enmiendas. El riego se realizó con cintas de goteo tipo Silver Drip con un caudal medio de 1 L h^{-1} y goteros distanciados a 20 cm. Se colocaron 2 cintas por parcela a 0,40 m entre ellas. El sistema de plantación fue a tres bolillos, quedando 4 hileras de plantas (densidad de plantación: 25 plantas por metro cuadrado).



Fotografía 2: Diseño del ensayo



Fotografía 3: Diseño del ensayo y desarrollo del cultivo

Debido a que el suelo era de textura arenosa, se decidió realizar la incorporación de materia orgánica, utilizando para tal fin guano vacuno compostado, al cual previamente se le realizó un análisis para conocer su composición y determinar la cantidad a agregar (**Tabla 2.2**). Se incorporó a razón de 5 kg de abono por metro cuadrado. Cabe aclarar que la incorporación del abono se hizo posterior al muestreo inicial del suelo y a las determinaciones físicas que más adelante se detallan.

Tabla 2.2: Análisis de laboratorio del guano vacuno incorporado

	Humedad	Cenizas	MO%	Nt%	P%	K%	Ca%	Mg%
Guano fresco	35,01	48,56	16,43	0,66	0,37	0,79	0,65	0,70
Guano seco	-	74,72	25,28	1,02	0,58	1,22	1,00	1,08

Nota: Es un guano de regular calidad. Elevada cantidad de ceniza y bajo nivel de Nitrógeno

De acuerdo con este análisis se aplicó el equivalente a 330 kg de N ha⁻¹, 185 kg de P ha⁻¹, 395 kg de K ha⁻¹, 325 kg de Ca ha⁻¹ y 350 kg de Mg ha⁻¹, aproximadamente.

El manejo del cultivo en cuanto a fertilización, control de malezas, plagas y enfermedades se realizó de acuerdo a las necesidades del cultivo. En la **Tabla 2.3** se detalla el plan de fertilización (fertirriego) empleado, el cual se planteó teniendo en cuenta la calidad y cantidad del abono incorporado.

Tabla 2.3: Plan de fertirriego utilizado en cada ciclo de lechuga (ejemplo del 1º ciclo)

Elemento	Nitrógeno		Fósforo		Potasio	
Fertilizante	Nutri 264 25%		Ácido Fosfórico		Cloruro de potasio	
Fecha	Lha ⁻¹	mL aplicados	Lha ⁻¹	mL aplicados	kg o Lha ⁻¹	mL o g aplicados
15/03	19,2	184	2,44	23	10	100
20/03	25,6	246	2,44	23	13	133
26/03	32,0	307	4,87	47	17	167
01/04	38,4	369	4,87	47	20	200
07/04	44,8	430	7,31	70	23	233
12/04	51,2	492	7,31	70	27	267
16/04	57,6	553	9,75	94	30	300

20/04	64,0	614	9,75	94	33	333
Total	332,8	3195	48,7	468	173	1733

Nota: Las fechas de aplicación variaron de acuerdo a la época en que se realizó cada ciclo.

La cantidad total colocada en cada ciclo fue 63 kg ha⁻¹ de N; 7,5 kg ha⁻¹ de P y 86 kg ha⁻¹ de K.

En el pasillo central del invernadero se colocaron un evaporímetro tipo Piché (**Fotografía 4**) y un termo-higrógrafo para llevar un registro diario de evaporación, temperatura y humedad, respectivamente. Además se instalaron sondas (para medir humedad edáfica) marca Decagon, modelo EC-5 junto con un Data Logger para registrar y almacenar los valores de la humedad del suelo y poder ajustar los Kc del cultivo y así determinar la lámina de riego adecuada (**Fotografía 5**). Antes de instalarlos se calibraron. De dicha calibración se obtuvieron una serie de lecturas correspondientes a distintos contenidos de humedad (**Tabla 2.4**) y la curva de calibración correspondiente, con un R² de 0,95 (**Figura 2.2**). Se hizo la extrapolación de los datos de la calibración y se obtuvo que la lectura de la sonda en capacidad de campo es igual a 15,33. Los sensores se colocaron en los dos ambientes de riego a 20 cm y 40 cm de profundidad. Las láminas de riego para cada tratamiento se aplicaron modificando los tiempos según correspondió. El tiempo de riego y la frecuencia se determinaron teniendo en cuenta las lecturas de las sondas. Se obtuvo además, el valor de capacidad de campo (Wc) del suelo del invernadero (19,1%) y se estableció el valor del punto de marchitez en 10%. Con estos dos parámetros se manejó el riego durante todo el ciclo del cultivo.



Fotografía 4: Evaporímetro tipo Piché.



Fotografía 5: Sondas para medir humedad edáfica marca Decagon, modelo EC-5 junto con un Data Logger

Las enmiendas de cada tratamiento se aplicaron una única vez al inicio del ensayo. Se incorporaron manualmente a 10 cm de profundidad y la cantidad que se incorporó se calculó teniendo en cuenta las láminas de riego a aplicar y los análisis de suelo y agua iniciales (más adelante se detalla dicho cálculo).

Tabla 2.4: Valores obtenidos en la calibración de las sondas Decagon (EC-5)

W%	Lectura
11,8	11,32
18,8	14,77
Wc=19,1	15,33
21,2	19,32
23,6	23,77
31,4	28,05
33,7	29,2
40,0	32,7

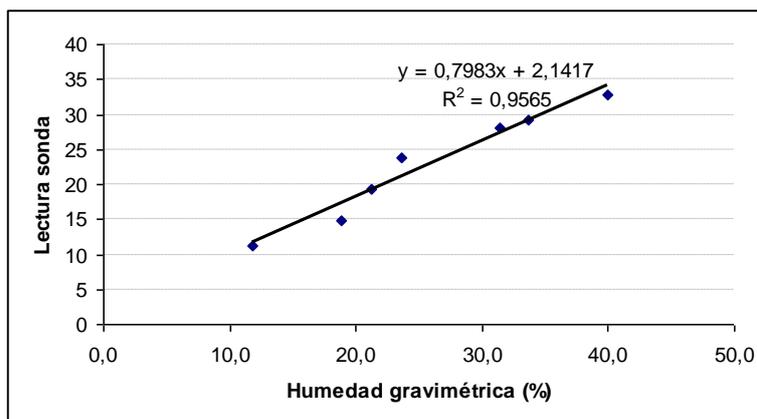


Figura 2.2: Curva de calibración de las sondas instaladas.

2.1.2 Muestro inicial: agua de riego y suelo

2.1.2.1 Toma de muestra del agua de riego

Antes de comenzar con el ensayo, se analizó el agua con la que se iba a regar, aunque con anterioridad ya se había determinado, a través de varios muestreos y consultas a productores que el agua de la zona era de regular calidad para realizar cultivos bajo invernadero, como se detalló en la introducción. Se realizó la toma de muestra desde el cabezal del sistema de riego instalado frente al túnel, dejando previamente que circule el agua unos minutos. Luego se llenó una botella de plástico de un litro de capacidad, perfectamente rotulada y se envió al laboratorio para su análisis. Se determinó: pH, CE, RAS, Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Aniones: CO_3 , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . En la **Tabla 2.5** se observan los valores obtenidos.

Tabla 2.5. Análisis de agua de la EEA INTA Anguil, Febrero 2013.

Determinaciones	Valores Obtenidos	ppm=mg L ⁻¹	me L ⁻¹
pH	8,74		
CE dS m ⁻¹	1,656		
Calcio (Ca)		6	0,3
Magnesio (Mg)		4,1	0,34
Sodio (Na)		320	13,91
Potasio (K)		4,69	0,12
Carbonatos (CO ₃ ⁼)		132	4,4
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)		573,4	9,4
Cloruros (Cl ⁻)		70,9	2
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)		36,5	0,76
RAS	24,6		
Dureza total	32,02		
°F	3,2		
CSR	13,16		

El CSR: carbonato de sodio residual se calcula según la fórmula siguiente expresados los iones en meq L⁻¹

$$CSR = \left[(CO_3^{-2} + CO_3H^{-1}) - (Ca^{+2} + Mg^{+2}) \right]$$

El agua es medianamente salina, según Wainstein (1969), y según el Laboratorio de Riverside: C3S4 (USDA, 1954), o sea alta peligrosidad salina y sódica. La dureza total es baja y el carbonato de sodio residual (CSR) es muy alto, clasificado como agua inapta para cultivos.

2.1.2.2 Muestreo inicial del suelo

Se realizó el muestreo por bloque o lomo de siembra a dos profundidades (8 muestras compuestas): 0-20cm y 20-40cm en las cuales se determinó: textura, materia orgánica (Método Walkey y Black), nitrógeno total (Método de Kjeldahl) (Bremner y Mulvaney, 1982), fósforo asimilable (Método Arizona) (Mc George, 1939), potasio intercambiable (Técnica de equilibrio con acetato de amonio 1N), CE (Método conductimétrico sobre extracto de saturación) y pH (Método potenciométrico en pasta saturada). Por otro lado, se realizó un muestreo por parcela experimental a dos profundidades: 0-20cm y 20-40cm (16 muestras) en donde se determinó CE, pH, CIC (capacidad de intercambio catiónico), cationes de intercambio: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y PSI. El método que se utilizó fue lavado con agua, hasta reacción negativa de cloruros, previo al tratamiento de extracción con Acetato de Amonio para la determinación de los cationes de intercambio, con la finalidad de eliminar el sodio soluble (como ClNa) (**Tablas 2.6 y 2.7**).

Tabla 2.6: Análisis inicial de suelo de muestras compuestas por bloque a dos profundidades.

Bloque	Parcela	Prof.	textura	Parámetros						
				MO (%)	NT (%)	P (ppm)	K int. (me/100 g)	CE (dS/m)	pH	CIC (me/100 g)
1	1 y 5	0,2	Arenoso franco	1,9	0,09	52,8	1,2	0,54	7,75	9,8
		0,4	Arenoso	0,8	0,04	40,4	1,2	0,33	7,59	9,1
2	2 y 6	0,2	Arenoso franco	2,6	0,13	48,2	1,2	0,43	7,84	10,4
		0,4	Arenoso franco	1,7	0,08	34,5	1,2	0,4	7,82	9,2
3	3 y 7	0,2	Arenoso franco	1,9	0,09	49,9	1,2	0,5	7,96	9,7
		0,4	Arenoso franco	1,8	0,09	44,7	1,2	0,36	7,68	11,2
4	4 y 8	0,2	Arenoso franco	2,2	0,11	53,5	1,2	0,37	7,55	8,5
		0,4	Arenoso franco	1,1	0,05	47,1	1,2	0,51	7,49	10,0

Nota: Textura, porcentaje de materia orgánica (MO), nitrógeno total (NT), fósforo disponible (Métodos Olsen), conductividad eléctrica (CE), pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Tabla 2.7: Análisis inicial de suelo en las ocho parcelas experimentales a dos profundidades.

Parcela	Prof.	CE (dS/m)	pH	CIC (me/100 g)	Ca ²⁺ (me/100 g)	Mg ²⁺ (me/100 g)	Na ⁺ (me/100 g)	K ⁺ (me/100 g)	PSI
1	0,2	0,67	7,89	10,8	14,0	1,7	1,4	1,2	12,87
	0,4	0,47	7,88	8,3	8,1	0,8	0,8	1,2	9,57
2	0,2	0,62	7,46	11,4	7,6	2,0	1,2	1,2	10,27
	0,4	0,58	7,67	9,3	11,5	0,3	1,0	1,2	11,17
3	0,2	0,57	7,8	13,7	9,0	1,7	1,2	1,2	8,97
	0,4	0,5	7,77	12,6	8,1	1,7	1,1	1,2	8,47
4	0,2	0,49	7,47	14,0	10,7	0,6	1,1	1,2	7,95
	0,4	0,46	7,55	12,8	9,5	0,6	1,0	1,2	7,84
5	0,2	0,41	7,28	10,6	5,3	1,7	1,2	1,2	11,16
	0,4	0,32	7,23	10,2	5,3	0,3	0,9	1,2	8,84
6	0,2	0,49	7,53	10,5	4,2	1,4	1,8	1,2	16,93
	0,4	0,38	7,5	9,2	4,5	1,7	1,1	1,2	11,93
7	0,2	0,49	7,45	10,2	5,1	1,4	1,7	1,2	17,06
	0,4	0,5	7,56	8,8	5,3	0,8	1,1	1,2	12,67
8	0,2	0,49	6,90	10,7	3,4	3,6	0,9	1,2	8,49
	0,4	0,39	6,78	9,9	5,6	0,6	0,7	1,2	7,24

Nota: Conductividad eléctrica (CE), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

2.1.3 Medición inicial de los parámetros físicos del suelo

2.13.1 Infiltración (I)

Se realizó la medición de la infiltración en el centro de cada parcela experimental (8 mediciones), con un infiltrómetro de doble cilindro. El principio del método es medir la disminución del nivel del agua instalada en el infiltrómetro, en función del tiempo.

Las primeras lecturas se realizaron a un intervalo de cinco minutos, a partir de la sexta lectura se aumentó el intervalo a veinte minutos y luego de transcurrida la primera hora se hicieron las lecturas cada treinta minutos. La profundidad del agua dentro del cilindro se mantuvo entre los 7 y 12 cm. Se ajustaron las curvas de infiltración a los datos obtenidos para cada parcela experimental a través de la suma de cuadrados con logaritmo base 10 (**Figuras 2.3.1 a 2.3.8**).

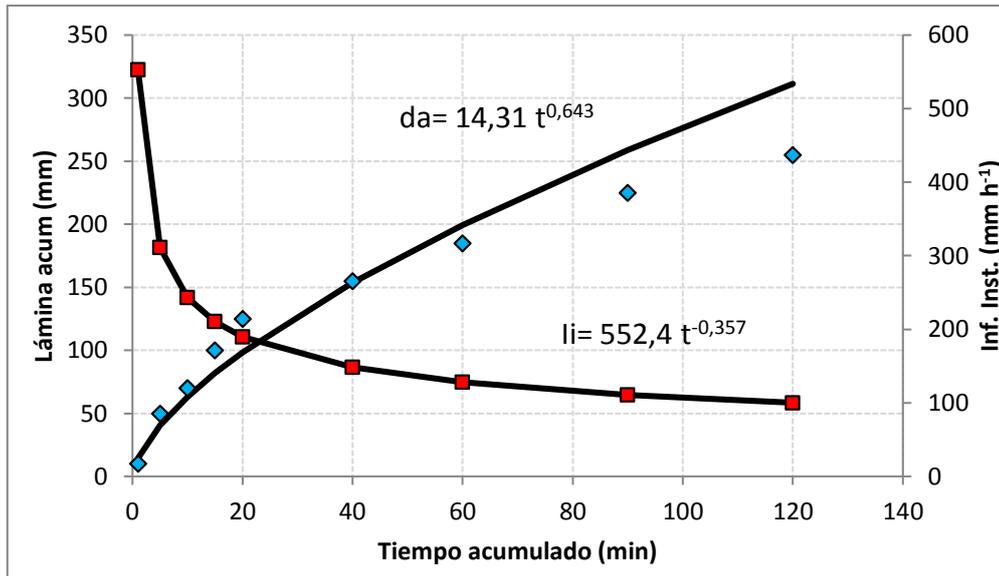


Figura 2.3.1. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 1**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

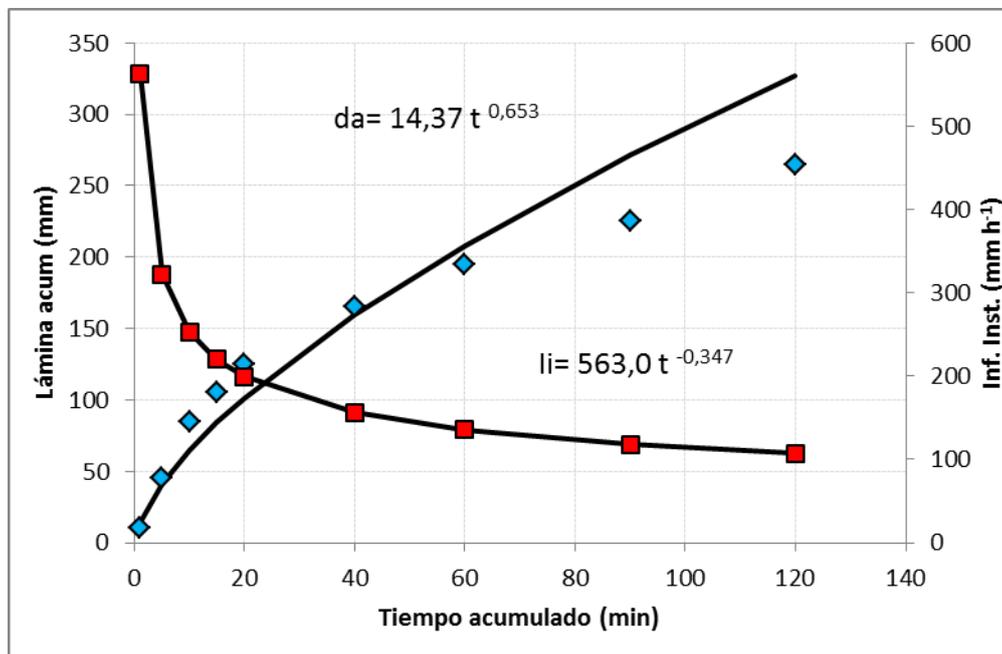


Figura 2.3.2. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 2**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

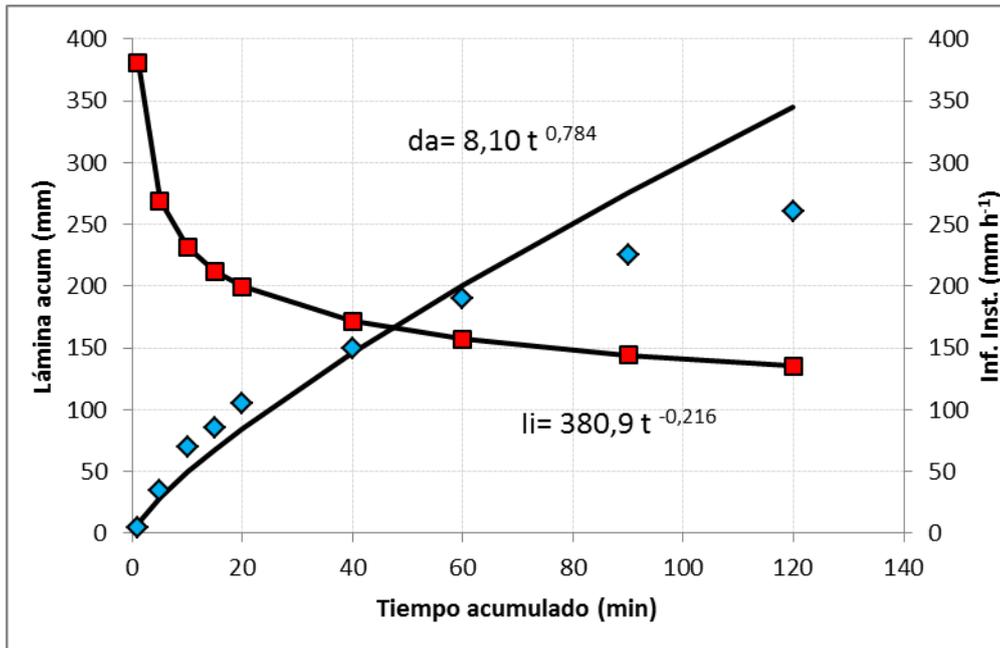


Figura 2.3.3. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 3**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

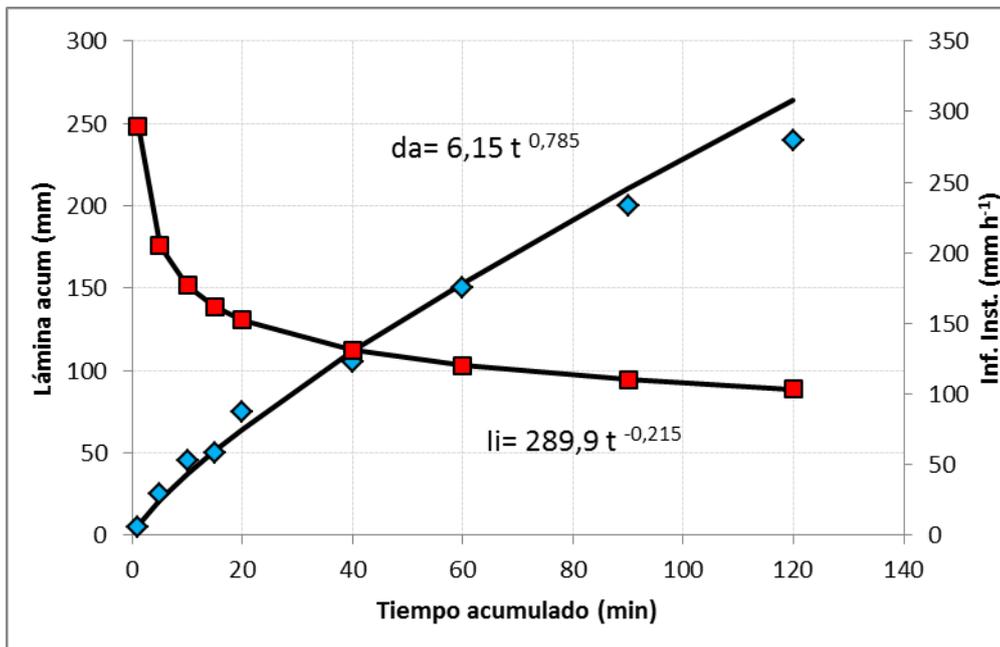


Figura 2.3.4. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 4**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

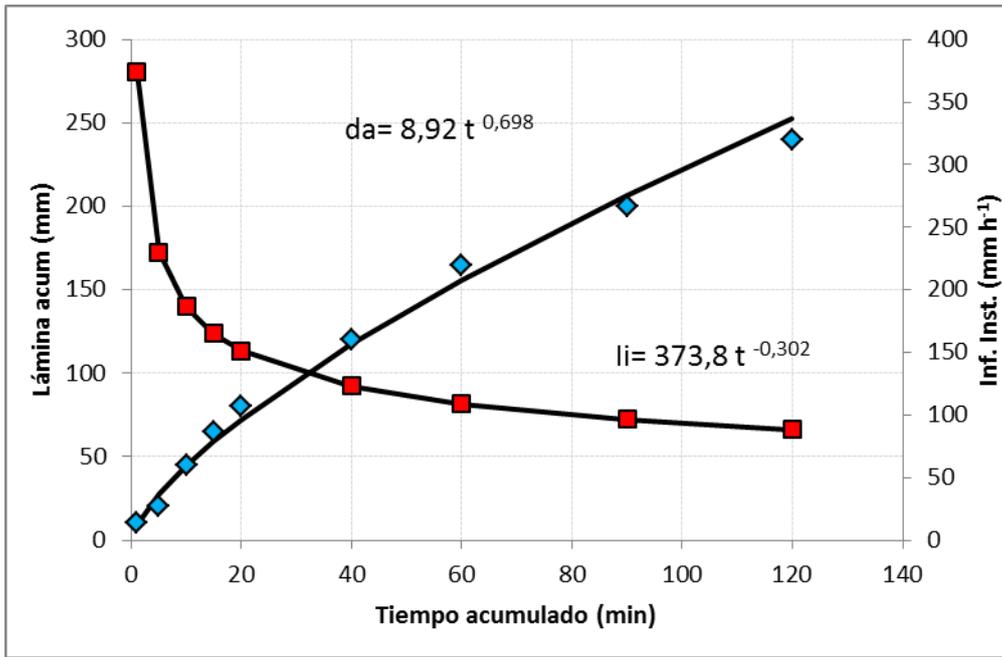


Figura 2.3.5. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 5**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

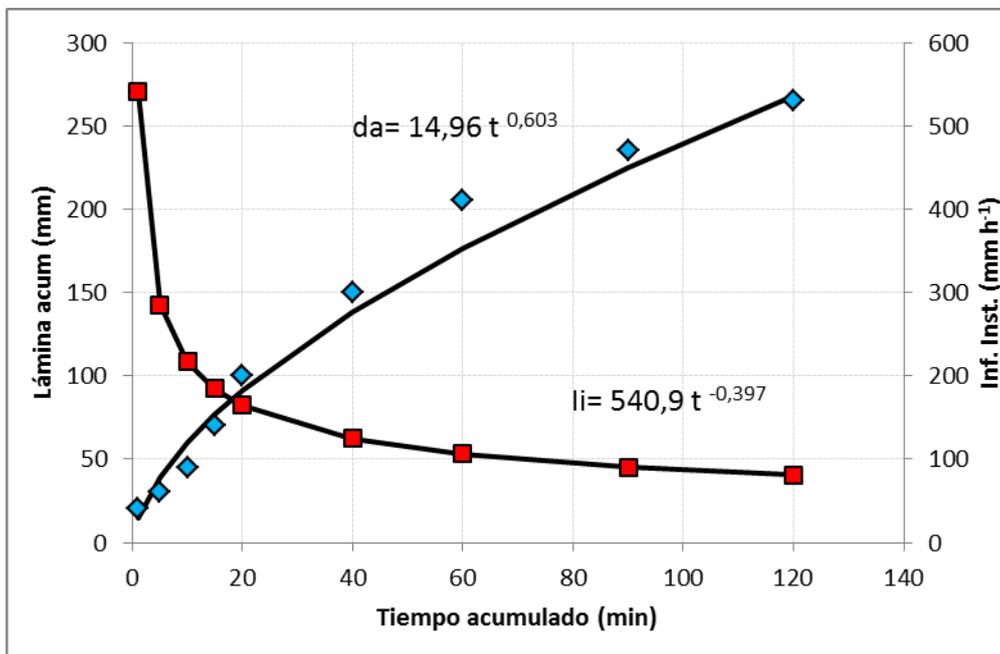


Figura 2.3.6. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 6**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

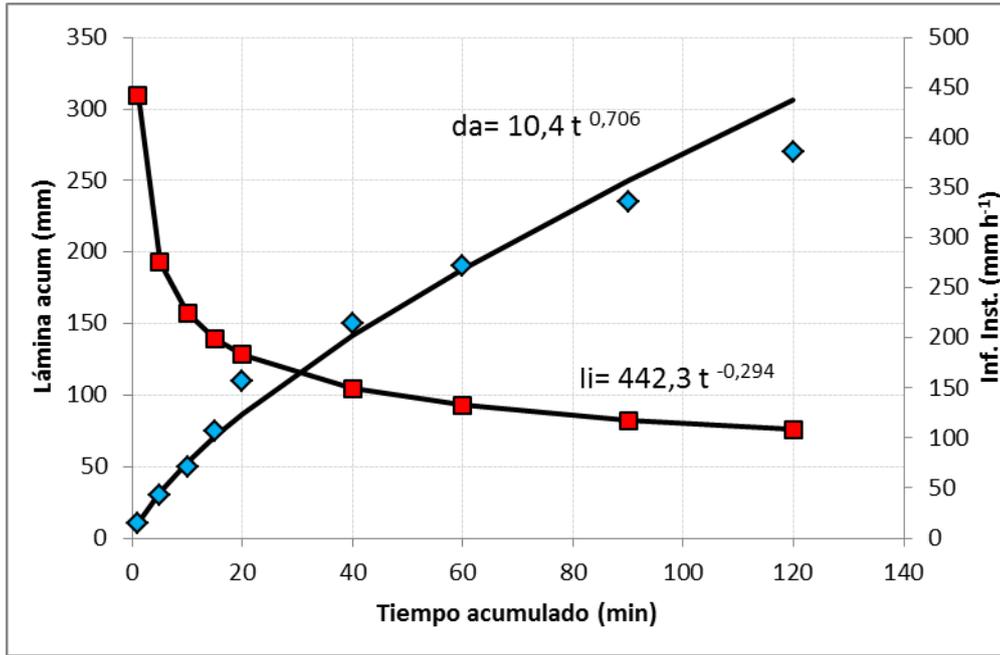


Figura 2.3.7. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 7**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

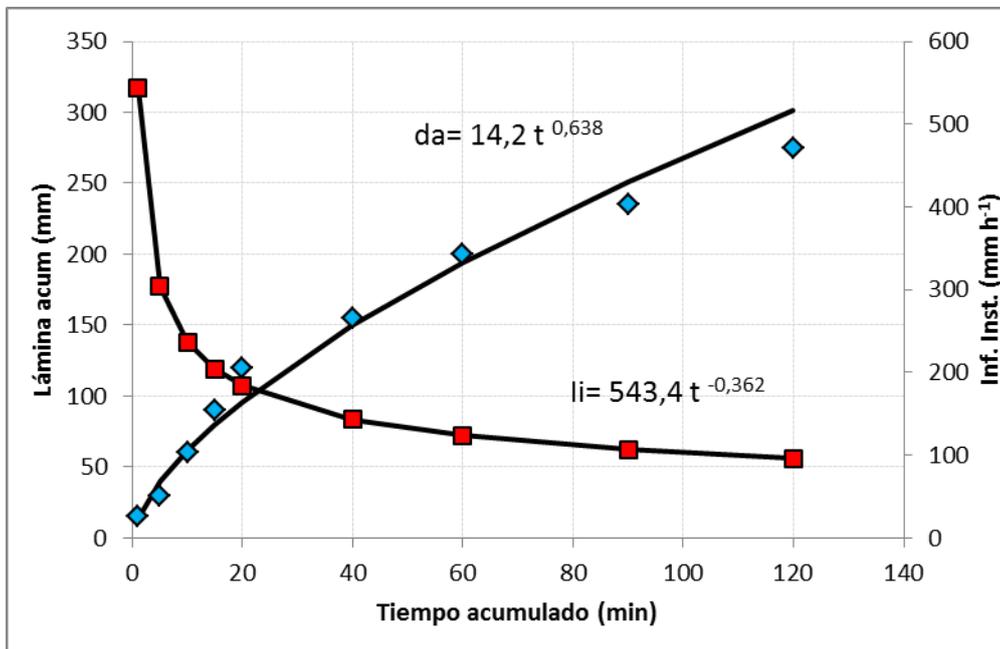


Figura 2.3.8. Lámina acumulada (da) en mm e infiltración instantánea en mm/h (li) inicial en la **Parcela 8**. Nota: rombos: (da) y cuadrados (li)

2.1.3.2 Conductividad hidráulica (K)

En la **Figura 2.4** se esquematiza cómo se realizó el muestro para determinar la conductividad hidráulica (K) en cada parcela a 30 cm de profundidad. Las “x” indican los

puntos donde se extrajeron submuestras de suelo. Las submuestras extraídas se mezclaron y homogeneizaron para obtener una muestra compuesta por cada parcela. El método utilizado para la determinación fue el del “permeámetro de carga constante o del cilindro con suelo disturbado”, el cual consiste en colocar la tierra fina seca al aire (T.FS.A) en un cilindro vertical, compactándola en forma tipificada y se establece sobre ella una lámina de altura constante. Se calcula K a partir de los volúmenes percolados en la unidad de tiempo corrigiendo K ($K_{20^{\circ}\text{C}}$) por la relación de viscosidades a la temperatura de determinación y la de referencia (20°C).

Aunque en ocasiones puede haber diferencias notables entre los valores de conductividad hidráulica obtenidos sobre muestras disturbadas y los correspondientes a suelos en condiciones naturales, existe una escala de calificación orientativa adaptada del Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos del año 1951 (**Tabla 2.8**).

En la **Tabla 2.9** se presentan los valores obtenidos de la Conductividad Hidráulica (K) inicial para cada parcela experimental a 30 cm de profundidad.

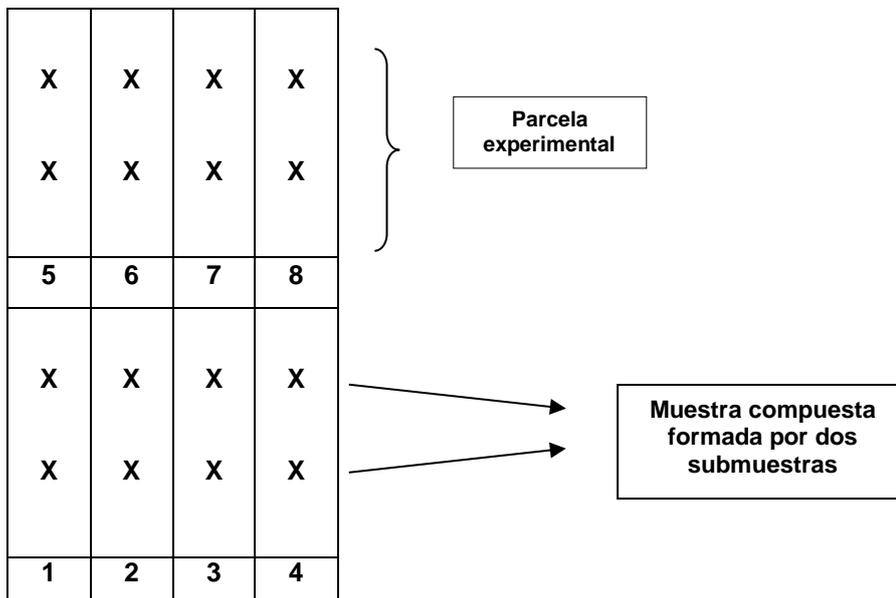


Figura 2.4: Esquema del muestreo realizado para determinar la Conductividad Hidráulica inicial para cada parcela experimental.

Tabla 2.8: Escala de calificación de Conductividad Hidráulica (K) (adaptada del **Servicio de Conservación de Suelo de los Estados Unidos, 1951**)

Clases de permeabilidad		
Clase	Calificación	K (mm h⁻¹)
1	Muy lenta	<1,25
2	Lenta	1,25-5
3	Mod. Lenta	5-20
4	Moderada	20-62,5
5	Mod. Rápida	62,5-125
6	Rápida	125-250
7	Muy rápida	>250

Tabla 2.9: Valores obtenidos de Conductividad Hidráulica (K) inicial para cada parcela experimental a 30cm de profundidad.

Parcela	K (mmh⁻¹)	Clasificación
1	86,52	moderadamente rápida
2	108,31	moderadamente rápida
3	92,79	moderadamente rápida
4	70,6	moderadamente rápida
5	112,77	moderadamente rápida
6	78,37	moderadamente rápida
7	74,23	moderadamente rápida
8	64,48	moderadamente rápida

2.1.4 Determinación del coeficiente de uniformidad del sistema de riego (CU)

Luego de realizados los muestreos iniciales de suelo y las determinaciones de los parámetros físicos del mismo se realizó la instalación del sistema de riego. Comúnmente, la programación del riego se realiza con el caudal nominal de cada emisor definida por el fabricante, sin embargo el caudal puede variar por efectos de la presión, temperatura, obturaciones (físicas, biológicas o químicas) y por fallas en el diseño de los sistemas de riego, por lo que normalmente el caudal real, difiere del caudal nominal.

Para verificar que el sistema de riego presurizado funcionara de manera adecuada, se determinó el coeficiente de uniformidad (CU).

Para su cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$CU = \frac{q_{25}}{q_m} * 100$$

Donde **qm** es el caudal medio de la instalación de riego y **q25** es el caudal medio de los emisores que constituyen el 25% que erogaron el caudal más bajo. En la **Tabla 2.10** se detalla los posibles valores del CU con su respectiva interpretación de acuerdo al funcionamiento del equipo de riego.

Tabla 2.10: Valores de Coeficiente de Uniformidad de Riego (CU)

Funcionamiento	Coeficiente de Uniformidad (CU)
Excelente	90-100%
Bueno	80-90%
Aceptable	70-80%
Inaceptable	<70%

2.1.4.1 Metodología de evaluación utilizada

Se eligieron cuatro líneas porta emisores (laterales de riego). En el sentido del riego se seleccionaron cuatro goteros: el primero, el ubicado a 1/3 del origen, a 2/3 del origen y el último (**Ver Figura 2.5**). De esta forma se lograron 16 puntos de medición (**Merriam y Keller, 1978**).

Para el aforo de los goteros se midió en una probeta los mililitros recibidos durante 36 segundos. Luego se dividió por 10 los mililitros recibidos para expresarlos en litros por hora.

Con los valores obtenidos en el campo se aplicó la fórmula de Merriam y Keller:

$$CU = \frac{0,90}{0,95} * 100$$

$$CU = 94,7$$

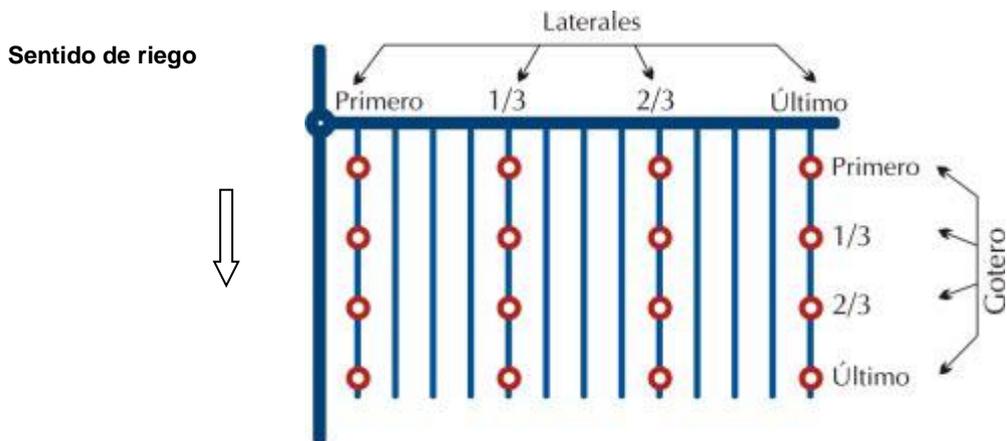


Figura 2.5: Esquema de los puntos de medición para la determinación del CU

2.1.5 Cálculo teórico de las necesidades de yeso y azufre

Para el cálculo de la necesidad de yeso normalmente se requieren los siguientes datos:

Densidad aparente (ρ_a):

Espesor del horizonte (e):

Superficie a enyesar (S): 2 m²

Peso equivalente del yeso: 86

CIC (meq/100g):

Sodio (meq/100g):

Porcentaje Sodio Intercambiable actual:

Porcentaje Sodio Intercambiable objetivo: 10 % (valor normal)

Δ Porcentaje Sodio Intercambiable:

$$\text{Necesidad de Yeso (kg/ha)} = \frac{Na \text{ a sustituir} \times 86 \times 10 \times \text{dens.} \times 10000 \times \text{prof.}}{1000}$$

Para el cálculo de las necesidades de azufre se va a considerar que el yeso tiene un 18.6% de azufre, por lo tanto el valor que se obtenga del cálculo del yeso se multiplicará por 0,186 para obtener la cantidad de azufre necesaria para el tratamiento.

2.1.6 Cálculo realizado para las necesidades de yeso y azufre en las condiciones del ensayo

Como se parte de un suelo no sodificado y se quiere prevenir el incremento de la sodicidad se realizó un cálculo hipotético, considerando que durante los cinco ciclos de

cultivo de lechuga cv Brisa se aplicarán 350 mm de lámina para el tratamiento R2= 1,3 ETc. Ello significa que según el análisis del agua de 2011 se estaría aportando 1207,5 kg ha⁻¹ de Na, 105 kg ha⁻¹ de Ca y 75,6 kg ha⁻¹ de Mg. Convertidos estos valores a keq (kg equivalente por hectárea), sería: 52,52 keq de Na; 5,24 keq de Ca y 6,22 keq de Mg, lo que daría un RAS teórico, si no hubiera lixiviación y todo quedara en los 30 cm de suelo de 21,94. Por lo tanto, para que el suelo no supere un valor de 5 de RAS, habrá que agregar 4200 kg ha⁻¹ de Ca o 209,58 keq (kg equivalente por hectárea). Teniendo en cuenta que el equivalente del yeso es 86, multiplicando por este valor los keq de Ca se obtienen 18041 kg ha⁻¹ de yeso. Considerando que el yeso tiene 18.6 % de azufre se debería agregar 3360 kg ha⁻¹ de azufre para los tratamientos con este producto. Para las subparcelas de 2,4 m² según el diseño utilizado para el ensayo, se agregó un total de 4,33 kg de yeso y 0,8064 kg de azufre por parcela, previo al inicio del ensayo y por única vez.

2.1.7 Mediciones realizadas durante el ensayo en el suelo

2. 1. 7. 1 Variables químicas

Al finalizar cada ciclo de lechuga, una vez cosechada y antes de realizar el siguiente trasplante se tomaron muestras de suelo en cada subparcela a dos profundidades, 0-20 y 20-40 cm para determinar: CE, pH, CIC, cationes de intercambio: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ y PSI. Se analizaron un total de 48 muestras de suelo por cada uno de los cinco cortes de lechuga.

2.1. 7. 2 Variables físicas

Al finalizar los cinco ciclos de lechuga se realizó la medición de la infiltración (I) y la conductividad hidráulica (K) en cada subparcela (24 mediciones), con los mismos métodos descritos para las determinaciones iniciales. Con los datos obtenidos de infiltración se construyeron las curvas correspondientes a cada subparcela.

2. 1. 8 Determinaciones de calidad de agua realizadas durante el ensayo

Durante el tiempo que duró el ensayo (un año calendario aproximadamente) se realizó un monitoreo del agua de riego para detectar posibles cambios en su composición química. Se llevaron a cabo tres muestreos, además del inicial.

2. 1. 9 Mediciones en la planta realizadas durante el ensayo

Para hacer las evaluaciones del rendimiento se cosecharon de cada subparcela las dos hileras centrales (dejando una hilera a ambos lados como bordura) de dos metros de largo, dejando 0,50 m en ambos extremos también como bordura. La superficie cosechada y posteriormente evaluada fue de 0,8 m² por cada subparcela. Se obtuvo el rendimiento expresado en kilogramo por metro cuadrado.

También se evaluó el crecimiento vegetativo del cultivo. Para esto se construyeron las curvas de crecimiento en los cinco ciclos de lechuga. Se realizó un muestreo de una planta por cada subparcela experimental, haciendo un total de cuatro plantas por tratamiento (enmiendas), para cada ambiente de riego y en tres fechas, a lo largo de cada ciclo y se determinó peso fresco de la parte aérea, peso seco de la parte aérea y porcentaje de materia seca. Con los valores de peso fresco se construyeron las respectivas curvas.

2.2 Cálculo del kc para lechuga bajo las condiciones del cultivo

Para el control del riego se utilizó principalmente los datos de las sondas instaladas en el ensayo, que indicaban cuando iniciar el riego y se aplicaba una lámina de reposición de acuerdo con los ambientes establecidos. Como se explicó anteriormente se instaló en el invernáculo un evaporímetro Piché con el fin de relacionar los valores de evaporación con la demanda del cultivo utilizando al fórmula conocida **ETc= kc x ETo**, siendo en este caso ETc: Evapotranspiración del cultivo, ETo: Evaporación del Piché y kc: Coeficiente de cultivo. Sin embargo, resultó muy difícil estimar el consumo diario debido a que los valores del evaporímetro variaban diariamente en forma muy notable. Por lo tanto se calculó un kc (despejando **kc= ETc/ETo**) por ciclo que en este caso resultó ser más adecuado para estimar el consumo de la planta. La ETc fue calculada a través de las variaciones de humedad del suelo (sondas edáficas) y las láminas agregadas. La cantidad de agua drenada en profundidad se desconoce, pero se estimó a través de la CE la cual se mantuvo o bajó ligeramente indicando que hubo una lámina de lavado.

2.3 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con un ANOVA y las medias comparadas con el test de Tukey con un $\alpha=0,05$. El software utilizado fue InfoStat.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Mediciones en el suelo

3.1.1 Variables químicas

Al finalizar cada ciclo del cultivo de lechuga se realizó un muestreo de suelo en cada subparcela experimental a dos profundidades (20 cm y 40 cm) y cuatro repeticiones. Al analizar estadísticamente los datos de CE, no se encontraron diferencias significativas en las interacciones entre las variables analizadas, por lo que se presentan los efectos simples de cada uno (**Tabla 3.1**). En la misma se puede observar que para R1, salvo en el ciclo 1º y 4º del cultivo, hubo efecto significativo de las enmiendas, y en el promedio de los cinco ciclos (un año calendario aproximadamente), la diferencia encontrada fue muy significativa ($p= 0,01$). En R2, en cambio, salvo en el ciclo 3º, no hubo diferencias significativas, algo similar de lo que arroja el promedio de los cinco ciclos. Se aprecia que el azufre fue el que produjo mayor incremento de la CE, aunque no diferenciándose significativamente del yeso que fue algo menor. Es probable, que el motivo de este incremento haya sido debido a que el azufre que se utilizó fue el micronizado, el cual tiene agregado de sales para provocar un efecto dispersante cuando se lo agrega al agua. **Sierra et al., (2007)** en su trabajo realizado en suelos de Chile, también reportan que la conductividad eléctrica de los suelos tuvo un incremento significativo por efecto de la incorporación de azufre elemental, como consecuencia de una mayor solubilidad de las sales presentes.

Por otro lado, en R1, la capa de 0-20 cm fue más afectada por la salinidad que la capa de 20-40, lo cual es lógico ya que la aplicación de las enmiendas se realizó en ese nivel. La diferencia entre ambas profundidades, en el promedio de los cinco ciclos fue muy significativa ($p= 0,01$). Por su parte en R2, salvo en el 1º ciclo y en el promedio, no se encontró diferencia significativa para la CE entre las dos profundidades analizadas. Esto podría explicarse por el efecto del lavado del suelo en R2 (lámina de agua aplicada= 1,3 de la Etc).

Tabla 3.1. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre los valores de Conductividad Eléctrica (CE: mS cm⁻¹) en el extracto de saturación del suelo.

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	3,70	4,05	2,80	2,64	2,94	3,23
	Yeso	6,55	6,45	3,90	4,13	5,00	5,21
	Azufre	5,70	7,45	6,25	4,76	5,97	6,03
	DMS	3,54	2,50	3,39	2,77	2,69	0,63
	sign	ns	*	*	ns	*	**
	0-20	6,43	7,43	4,83	4,97	5,22	5,78
	20-40	4,20	4,53	3,80	2,71	4,04	3,86
	DMS	2,11	1,49	2,02	1,65	1,60	0,37
	sign	*	*	Ns	*	ns	**
	CV	11,31	7,09	13,34	12,22	9,85	2,20
R2	Testigo	2,50	2,60	3,21	3,12	2,56	2,80
	Yeso	4,75	5,15	5,59	3,44	4,90	4,77
	Azufre	5,25	7,20	6,90	4,02	6,73	6,02
	DMS	6,49	8,80	2,31	5,37	5,24	3,83
	sign	ns	ns	*	ns	ns	ns
	0-20	6,27	6,37	5,83	4,73	5,56	5,75
	20-40	2,07	3,60	4,63	2,33	3,89	3,30
	DMS	3,87	5,24	1,38	3,20	3,12	2,28
	sign	*	ns	Ns	ns	ns	*
	CV	26,45	29,98	7,50	25,84	18,82	14,38

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *****: Significativo al 0,05; ******: Significativo al 0,01; *******: Significativo al 0,001 y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.2** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos de pH. Las interacciones entre las variables analizadas no dieron diferencias significativas. En R1, se observa que en el ciclo 1º y 2º no hubo efecto significativo para las enmiendas, mientras que en los ciclos 3º y 5º, las diferencias encontradas fueron muy significativas ($p=0,01$). En el ciclo 4º y en el promedio de los cinco ciclos hubo diferencia significativa ($p=0,05$). En R2, hasta el tercer ciclo, las diferencias encontradas entre los tratamientos con enmiendas fueron no significativas. En cambio en el ciclo 4º y 5º si hubo significancia. Claramente se aprecia que, tanto en R1 como en R2, en el tratamiento testigo el pH fue incrementándose a lo largo de los cinco ciclos, llegando a valores muy alcalinos, mientras que en el tratamiento con azufre se observa un descenso del pH hasta el 3º ciclo y luego un incremento en el 4º y 5º ciclo pero dentro de un rango aceptable para el cultivo. Estos resultados coinciden con lo expresado por **Longo et al. (2005)** donde evaluaron el efecto del agregado de yeso y azufre en invernadero, observando la notable disminución del pH en el suelo tratado con azufre (pH inicial de 9,39; pH final 7,31). También **Sierra et al.**

(2007) reportaron que, en todos los suelos analizados hubo una disminución del pH por efecto de la aplicación de azufre, como consecuencia de la transformación a sulfato por oxidación microbiológica. Asimismo, **Zérega y Adams (1991)**, determinaron que solamente el azufre, en sus tratamientos principales y en las interacciones con cachaza, ejerció efectos mejoradores sobre las propiedades químicas del suelo.

El agregado de yeso, ayudó que el pH se mantenga medianamente constante a lo largo de los cinco ciclos de lechuga, siendo menor en todos los casos a las parcelas testigo. También **Rengasamy y Olsson (1991)** encontraron que la aplicación de yeso a un suelo sódico neutral, disminuyó el pH entre 0,5 y 1 unidad, debido a efectos de fuerzas iónicas que favorecen la formación de complejos de cationes con el ión SO_4^{-2} , conduciendo a la reducción del pH. **Chorom y Rengasamy (1997)** en un ensayo de laboratorio, encontraron que la aplicación directa de yeso en un suelo alcalino redujo el pH del mismo desde 9,38 hasta 7,89. En cuanto a la profundidad, no hubo efecto significativo en ninguno de los dos ambientes.

Tabla 3.2. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el pH del suelo (pasta saturada).

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	7,65	7,88	8,10	7,93	8,06	7,92
	Yeso	7,45	7,64	7,90	7,54	7,87	7,68
	Azufre	6,75	6,38	5,80	5,97	6,19	6,22
	DMS	1,44	1,68	0,83	1,46	0,23	0,98
	sign	ns	ns	**	*	**	*
	0-20	7,13	7,16	7,17	6,91	7,34	7,14
	20-40	7,43	7,43	7,37	7,37	7,40	7,40
	DMS	0,86	1,00	0,20	0,87	0,14	0,59
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	3,36	3,90	1,95	3,47	0,53	2,30
R2	Testigo	7,45	7,98	8,10	7,68	8,02	7,85
	Yeso	7,45	7,87	7,70	7,56	7,81	7,68
	Azufre	6,35	5,70	4,95	5,83	6,30	5,83
	DMS	3,15	3,03	3,39	1,72	1,49	2,57
	sign	ns	ns	ns	*	*	ns
	0-20	6,97	7,12	6,73	6,85	7,25	6,98
	20-40	7,20	7,23	7,10	7,19	7,50	7,24
	DMS	1,88	1,81	2,02	1,03	0,89	1,53
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	7,56	7,17	8,33	4,17	3,43	6,13

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *****: Significativo al 0,05; ******: Significativo al 0,01; *******:

Significativo al 0,001 y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.3** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos de **CIC**. Las interacciones entre las variables analizadas no fueron significativas. Como es de esperar la CIC del suelo no varía a través del tiempo, ni con los tratamientos. Es una constante del suelo si no se agrega materia orgánica o arcilla que modifique esta variable.

Tabla 3.3. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre la **CIC** (Capacidad de intercambio catiónico) del suelo.

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	12,75	12,68	12,84	12,82	13,15	12,85
	Yeso	12,75	12,74	12,84	12,80	12,15	12,66
	Azufre	12,70	12,59	12,84	12,75	12,50	12,68
	DMS	0,87	0,99	0,44	0,57	2,51	0,84
	sign	ns	ns	Ns	ns	ns	ns
	0-20	12,80	12,76	12,82	12,88	12,53	12,76
	20-40	12,67	12,58	12,86	12,70	12,67	12,70
	DMS	0,52	0,59	0,26	0,34	1,50	0,50
	sign	ns	ns	Ns	ns	ns	ns
	CV	1,16	1,32	0,58	0,75	3,38	1,12
R2	Testigo	12,65	12,67	12,74	12,75	12,80	12,72
	Yeso	12,70	12,64	12,73	12,75	12,55	12,67
	Azufre	12,60	12,59	12,66	12,55	12,65	12,61
	DMS	0,42	0,34	0,82	0,48	1,02	0,55
	sign	ns	ns	Ns	ns	ns	ns
	0-20	12,70	12,68	12,74	12,77	12,77	12,73
	20-40	12,60	12,59	12,67	12,60	12,57	12,61
	DMS	0,25	0,20	0,49	0,29	0,66	0,33
	sign	ns	ns	Ns	ns	ns	ns
	CV	0,56	0,46	1,09	0,64	1,48	0,74

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.4** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos de calcio. Las interacciones entre las variables analizadas no dieron diferencias significativas. En cuanto al tratamiento de enmiendas, tanto en R1 como en R2, lógicamente se encontró más cantidad de catión calcio en las parcelas tratadas con yeso (sulfato de calcio hidratado), aunque sólo fue muy significativo en el 5º ciclo del ambiente R2 ($p=0,01$). Al mismo tiempo, y a pesar que las enmiendas se incorporaron en los primeros 20 cm del suelo, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de calcio entre las dos profundidades muestreadas, en ningún ambiente.

Se observa también que en el ambiente R2 el contenido de calcio, en todos los casos, es inferior que en el ambiente R1, lo cual podría deberse al efecto de lavado producido por el exceso de agua (R2=1,30 de Etc).

Tabla 3.4. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de **calcio intercambiable** en el suelo (expresado en me L^{-1})

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	10,30	5,05	10,90	7,14	9,92	8,66
	Yeso	12,00	17,80	13,85	11,00	13,58	13,65
	Azufre	10,30	12,15	12,05	10,95	9,46	10,98
	DMS	3,37	24,65	5,12	5,42	5,33	6,14
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	0-20	11,33	12,00	12,97	9,80	10,79	11,38
	20-40	10,40	11,33	11,57	9,59	11,36	10,85
	DMS	2,01	14,69	3,05	3,23	3,18	3,66
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	5,26	35,87	7,08	9,48	8,17	9,37
R2	Testigo	6,15	7,15	8,29	5,82	5,72	6,63
	Yeso	9,60	13,85	13,55	8,67	9,00	10,93
	Azufre	5,65	6,90	8,10	5,72	5,93	6,46
	DMS	15,24	31,10	9,15	15,10	1,08	13,49
	sign	ns	ns	ns	ns	**	ns
	0-20	8,43	12,20	11,79	8,00	6,92	9,47
	20-40	5,83	6,40	8,17	5,47	6,84	6,54
	DMS	9,08	18,53	5,46	9,00	0,64	8,04
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	36,27	56,77	15,57	38,06	2,65	28,57

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; ******: Significativo al 0,01 y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.5** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos de magnesio. Las interacciones entre las variables analizadas no dieron significativa. En R1, en ningún ciclo el efecto del tratamiento con enmienda presentó diferencias significativas. Para el ambiente R2, en el promedio de los cinco ciclos de lechuga, hubo efecto significativo ($p= 0,05$) de las enmiendas, no así en cada uno de los ciclos, analizados individualmente. Lo mismo ocurrió con el efecto de la profundidad, en R2.

Tabla 3.5. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de **magnesio intercambiable** en el suelo (expresado en me L⁻¹)

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	1,55	1,18	1,40	1,75	2,95	1,77
	Yeso	2,25	0,90	1,42	2,56	1,77	1,78
	Azufre	0,75	1,65	1,49	2,37	2,62	1,78
	DMS	5,07	1,38	4,79	1,50	3,58	1,34
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	0-20	2,07	1,28	1,60	2,96	2,53	2,09
	20-40	0,97	1,20	1,26	1,49	2,36	1,46
	DMS	3,02	0,82	2,86	0,90	2,13	0,80
	sign	ns	ns	ns	*	ns	ns
	CV	56,72	18,83	56,79	11,48	24,87	12,75
R2	Testigo	0,60	1,10	1,18	2,86	1,75	1,50
	Yeso	1,50	1,15	1,44	1,33	1,95	1,47
	Azufre	2,45	2,47	2,16	2,33	2,76	2,43
	DMS	2,05	3,04	3,95	4,56	2,18	0,64
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	*
	0-20	1,53	1,64	2,09	2,41	2,53	2,04
	20-40	1,50	1,51	1,09	1,93	1,78	1,56
	DMS	1,22	1,81	2,35	2,72	1,30	0,38
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	*
	CV	23,00	32,78	42,19	35,64	17,23	6,06

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativa; *: Significativo al 0,05; y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.6** se presentan los contenidos de potasio obtenidos de los análisis de suelo en los respectivos ciclos de lechuga. Se observa claramente que el contenido de potasio se mantuvo constante a través del tiempo, independientemente del ambiente y del tratamiento, por ende, no se realizó análisis estadístico.

Tabla 3.6. Contenido de **potasio intercambiable** en el suelo (expresado en me L⁻¹) en los cinco ciclos de lechuga.

Tratamientos		Profundidad	Ciclos de lechuga				
Riego	Enmiendas		1º	2º	3º	4º	5º
R1	T	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	Y	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	S	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
R2	T	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	Y	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	S	0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		0,4	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

En la **Tabla 3.7** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos de sodio. Las interacciones entre las variables analizadas no fueron significativas. En las parcelas testigo, tanto en el ambiente R1 como en el R2, el contenido de sodio intercambiable fue aumentando a lo largo de los cinco ciclos del cultivo, siendo superior que en las parcelas donde se incorporó yeso o azufre. Esto era esperable, teniendo en cuenta la calidad del agua utilizada para el riego. Si comparamos el tratamiento yeso con el de azufre, se observa que en R1 las parcelas tratadas con yeso presentan menor contenido de sodio que las tratadas con azufre, aunque esa diferencia en la mayoría de los casos no es significativa. En cambio en R2, el contenido de sodio intercambiable fue menor en las parcelas tratadas con azufre, aunque estadísticamente tampoco se observaron diferencias significativas. Haciendo una lectura general de los valores obtenidos de sodio en los dos ambientes de riego se observa que en R2, el contenido de sodio es menor que en R1, indistintamente del tratamiento. Según **Rubinsky de Lis (1962)**, el agregado de yeso al suelo resulta beneficioso si va acompañado de una lixiviación. En el estudio experimental realizado por la autora, en suelos salinos-sódicos de Israel, en laboratorio e invernáculo, concluyó que el lixiviado del suelo no alcanza a liberar la cantidad de calcio suficiente para reemplazar al sodio del complejo. Es necesario agregar yeso antes del lixiviado.

En coincidencia a lo anterior, **Pizarro Cabello (1990)** expresa que si el suelo es salino-sódico, primero se deberá adicionar el calcio y luego lavar las sales. Según **Fuentes Yagüe, 1995; Pizarro, 1990**, el sólo lavado de sales no arrastra el sodio adsorbido y hasta puede ser una técnica contraproducente al disminuir la concentración de sales disueltas, lo que facilita aún más el efecto dispersante. Esto es así en suelos pesados. En suelos arenosos como los presentes en este ensayo, puede haber alguna disminución en la velocidad de infiltración pero no muy grande.

Tabla 3.7. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el contenido de **sodio intercambiable** en el suelo (expresado en me. L⁻¹).

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	2,31	2,76	3,41	3,07	4,15	3,14
	Yeso	1,69	1,68	1,86	2,04	2,35	1,92
	Azufre	1,85	1,70	2,00	2,25	2,50	2,06
	DMS	0,62	2,40	2,78	0,84	3,48	1,67
	sign	*	ns	ns	*	ns	ns
	0-20	2,28	2,56	2,65	2,85	3,07	2,68
	20-40	1,62	1,53	2,19	2,05	2,92	2,06
	DMS	0,37	1,43	1,65	0,50	2,07	0,99
	sign	*	ns	ns	*	ns	ns

	CV	5,39	19,96	19,47	5,80	19,73	11,95
R2	Testigo	1,94	2,86	3,09	2,63	3,43	2,79
	Yeso	1,61	1,54	2,70	2,22	2,60	2,13
	Azufre	1,46	1,45	1,74	1,61	2,44	1,74
	DMS	1,11	3,95	1,57	2,28	0,46	1,50
	sign	ns	ns	ns	ns	*	ns
	0-20	2,02	2,53	2,69	2,35	3,12	2,54
	20-40	1,31	1,37	2,33	1,96	2,52	1,90
	DMS	0,66	2,35	0,94	1,36	0,27	0,89
	sign	*	ns	ns	ns	*	ns
	CV	11,28	34,41	10,64	17,97	2,77	11,42

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *: Significativo al 0,05; y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.8** se presenta el resultado del análisis estadístico de los datos del PSI. Las interacciones entre las variables analizadas no fueron significativas.

Teniendo en cuenta los ciclos de cultivo con los dos regímenes de riego, hubo un incremento del PSI del 50,8 % en R1 y 65,0% en R2. Analizando el efecto de las enmiendas sobre el PSI, se observa un aumento del mismo del 80,5 % en el testigo, mientras que con el yeso fue del 60,1% y con azufre del 29,8 %. En cuanto a las dos profundidades analizadas el incremento fue mayor en la capa de 20-40 cm (77,2 %) con respecto a la de 0-20 (43,5 %).

Irurtia & Peinemann (1987) en un trabajo cuyo objetivo fue la comparación de tratamientos de yeso y azufre con el tratamiento testigo, al que sólo se le aplicaron los lavados correspondientes, determinaron que los tratamientos con yeso y azufre producen importantes reducciones del PSI en las capas más superficiales; en la capa de 0 a 20 cm el yeso y el azufre producen disminuciones del 79 y 82% respecto al testigo, mientras que en las capas de 20 a 40 cm la reducción con respecto al testigo es del 50%. Concluyeron que en los tratamientos con aplicación de yeso y azufre se lograron las mayores reducciones en salinidad y porcentaje de sodio intercambiable. Esto coincide con lo encontrado en este ensayo donde el azufre tuvo un efecto mejor que el yeso. Con el primero el incremento de PSI fue de 115 % entre el primer muestreo y el último, mientras que con el yeso el incremento fue de 157 % y en el testigo de 180 %.

Por su parte, **Andreani et al., (1999)** hallaron que el yeso es la enmienda más utilizada para reducir el PSI en los suelos, causante de los problemas de infiltración. En el sur de Santa Fe, se realizaron experiencias con esta enmienda, las cuales sirvieron para demostrar la efectividad del yeso para disminuir la sodificación. **Bohn et al., (1993)**, afirman que la recuperación de un suelo sódico exige disminuir el PSI hasta valores aceptables, es decir, reemplazar parte del sodio adsorbido por otros cationes. Esto se

consigue de diversas formas, pero todas ellas tienen en común la adición de calcio en forma de enmiendas de yeso, cloruro cálcico, etc.

Tabla 3.8. Efecto de los tratamientos de riego, enmienda y profundidad sobre el porcentaje de sodio intercambiable (**PSI**) en el suelo.

Ambiente	Tratamiento	Ciclos de lechuga					Promedio
		1º	2º	3º	4º	5º	
R1	Testigo	19,00	21,25	26,05	30,25	33,85	26,08
	Yeso	15,05	17,20	16,55	19,60	23,55	18,39
	Azufre	16,70	15,80	16,15	21,25	19,20	17,82
	DMS	4,17	19,48	18,92	1,58	20,84	8,58
	sign	ns	ns	ns	**	ns	ns
	0-20	19,13	21,87	20,33	27,33	25,67	22,87
	20-40	14,70	14,30	18,83	20,00	25,40	18,65
	DMS	2,49	11,61	11,28	0,94	12,42	5,11
	sign	*	ns	ns	**	ns	ns
	CV	4,19	18,28	16,40	1,13	13,85	7,02
R2	Testigo	18,65	24,15	27,05	31,40	34,15	27,08
	Yeso	15,95	14,35	25,85	26,95	26,05	21,83
	Azufre	15,95	12,70	15,00	18,90	23,25	17,16
	DMS	7,09	34,59	24,04	18,07	8,09	1,50
	sign	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	0-20	19,57	21,03	23,97	26,47	29,90	24,19
	20-40	14,13	13,10	21,30	25,03	25,73	19,86
	DMS	4,22	20,61	14,32	10,77	4,82	0,89
	sign	*	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	7,14	34,40	18,03	11,91	4,94	11,42

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *: Significativo al 0,05; **: Significativo al 0,01; ***: Significativo al 0,001 y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

3.1.2 Variables físicas

3.1.2.1 Infiltración

En la **Tabla 3.9** se observan los valores de infiltración acumulada inicial en cada parcela experimental y los valores de infiltración acumulada final en cada subparcela experimental en un tiempo total de riego de dos horas.

En las **Figuras 3.1.1 a 3.1.24** se presentan las curvas de infiltración final obtenidas para cada subparcela experimental.

Los datos de las mediciones a campo se ajustaron a través del análisis de regresión.

Tabla 3. 9: Infiltración acumulada inicial y final para cada tratamiento después de dos horas de medición.

Parcela	Inf. acum. inicial (mm)	Inf. acum. final (mm)		
		Testigo	Yeso	Azufre
1	255	190	240	235
2	265	240	260	255
3	260	235	260	250
4	240	220	245	235
5	240	210	220	240
6	265	250	260	260
7	270	240	250	265
8	275	210	245	250

El análisis estadístico de estos datos indican un efecto significativo de los tratamientos con enmiendas sobre la lámina infiltrada acumulada en 120 minutos (da 120) y la infiltración básica (IB), en los dos ambientes de riego analizados (**Tabla 3.10**)

Indistintamente de la parcela evaluada, en todos los casos, la infiltración acumulada final del testigo es menor a la infiltración acumulada inicial. En el caso de los tratamientos yeso y azufre también hay disminución de la infiltración, pero no tan marcada como en el testigo.

Tabla 3.10: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre la lámina infiltrada

Ambiente	Tratamiento	da 120	IB	Tbmin	li	K	m
R1	Inicio	255,0	90,9	170,2	443,5	10,73	0,72
	Testigo	221,3	50,6	257,6	515,1	15,20	0,57
	Final Yeso	248,8	51,3	281,6	674,4	22,54	0,53
	Azufre	236,3	57,0	249,9	577,5	17,25	0,58
	DMS	33,1	20,9	84,1	292,9	12,1	0,1
	sign	*	***	**	ns	Ns	**
	CV	7,60	18,50	19,36	29,24	40,73	12,89

Ambiente	Tratamiento	da 120	IB	Tbmin	li	K	m
R2	Inicio	262,5	73,4	203,2	475,1	12,13	0,66
	Testigo	227,5	88,3	132,8	289,4	6,27	0,78
	Final Yeso	241,3	65,4	223,2	536,7	16,10	0,63
	Azufre	253,8	72,2	193,2	419,1	10,47	0,68
	DMS	32,2	21,4	91,6	271,1	10,6	0,2
	sign	*	*	ns	ns	Ns	ns

CV	7,21	15,81	26,91	34,82	52,03	12,30
----	------	-------	-------	-------	-------	-------

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa: *: Significativo al 0,05; **: Significativo al 0,01; ***: Significativo al 0,001 y **CV**: coeficiente de variación en por ciento.

Lámina infiltrada en 120 minutos (da 120) en mm, la infiltración básica (IB: mm), tiempo para alcanzar la infiltración básica (Tbmin: en minutos), infiltración instantánea (Ii: mm) en el primer minuto, y las constantes de Kostiakov k y m. (o a y b)

El mayor aumento del PSI en el testigo en relación al yeso y el azufre puede explicar la marcada disminución de la infiltración en dicho tratamiento. Coincide con **Ausilio y Colomar (1998)**, **Armstrong et al., (1996)**, **Pizarro Cabello (1990)**, quienes expresan que un elevado PSI provoca deterioro de la estructura del suelo, lo cual produce efectos desfavorables sobre la estabilidad estructural debido al hinchamiento y la dispersión coloidal. También **Oster (1994)** atribuye los cambios en las propiedades hidráulicas y la estructura de los suelos a la dispersión de los coloides, generada por un elevado PSI, produciendo una reducción en la velocidad de infiltración del agua.

El agua de riego utilizada en este ensayo es bicarbonatada sódica, con un elevado valor de RAS (30,94 en el último análisis de agua). La utilización de esta agua para regar bajo cubierta provocó el aumento de la concentración de sodio en el suelo, esto corroborado con las análisis de suelo en donde se ve claramente el aumento de la concentración del sodio y del PSI en todos los casos, con la consiguiente pérdida de permeabilidad, que se ve reflejada en los valores de infiltración acumulada al final de los cinco ciclos de lechuga, principalmente en el testigo. **Costa (1996)**, coincide en que, cuando las aguas que se usan para riego son bicarbonatadas sódicas, la concentración de sodio en el suelo aumenta y se induce la precipitación de carbonato de calcio. Esto ocasiona disminución de la permeabilidad y alteración de la estructura del suelo. **Camacho Ferre (2004)** explica que los problemas de infiltración aparecen en función de la calidad del agua de riego, dados por la CE y RAS, además del tipo de arcilla que posea el suelo. La infiltración aumenta cuando lo hace la CE y disminuye cuando aumenta el RAS. Altas relaciones Na^+/Ca^{2+} que dan origen a RAS muy altos, afectan a la infiltración por el hinchamiento de las arcillas del suelo. Esto origina una clara disminución de la porosidad del suelo. **Irurtia y Mon (1998)** reportan que en sitios regados con agua de bicarbonatada sódica durante 5 años se registraron leves incrementos del pH (de 5,9 a 6,1) y de la salinidad. En cambio, las variables físicas estudiadas mostraron claras tendencias de deterioro. También **Costa (1999)** señala que regando dos años con aguas de riego de RAS 15, 17 y 19 se produjeron incrementos en el valor del RAS del horizonte superficial de 2,5, 6 y 14 respectivamente mientras que la lámina de agua infiltrada sólo se vio afectada con el máximo RAS.

La disminución de la infiltración acumulada final no es tan evidente en los tratamientos de yeso y azufre, siendo en algunos casos igual que la infiltración inicial. Tampoco se

evidencia grandes diferencias si comparamos los valores de infiltración final del tratamiento yeso con el tratamiento azufre. Esto sugiere un efecto positivo de ambas enmiendas sobre la infiltración, sin poder precisar cuál de las dos es la más adecuada para mantener la permeabilidad del suelo. **Quinteros et al., (2000)** concluyeron en su trabajo que la enmienda con yeso representa una alternativa adecuada para corregir problemas de suelos propensos a la dispersión. La adición de yeso, mediante la disminución del sodio intercambiable, produjo una recuperación en las condiciones físicas del suelo, repercutiendo en un incremento de la productividad de forraje y posibilitando una mejor utilización del fertilizante por parte del cultivo. Por otro lado, **Zérega y Adams (1991)**, en un ensayo donde evaluaron los efectos del azufre sobre un suelo salino-sódico bajo condiciones de invernadero determinaron que solamente el azufre ejerció efectos mejoradores sobre las propiedades químicas del suelo. Además, observaron de manera evidente el mejoramiento de la tasa de penetración de agua en el suelo.

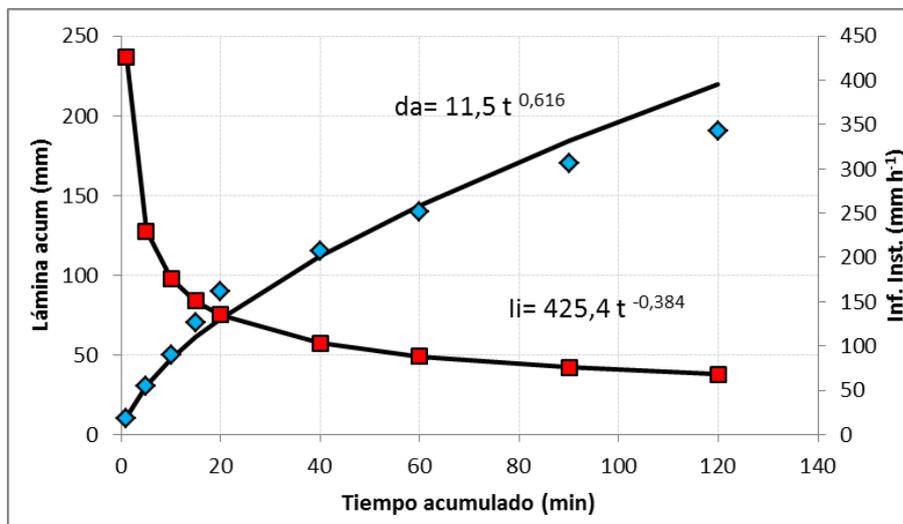


Figura 3.1.1. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/ Testigo

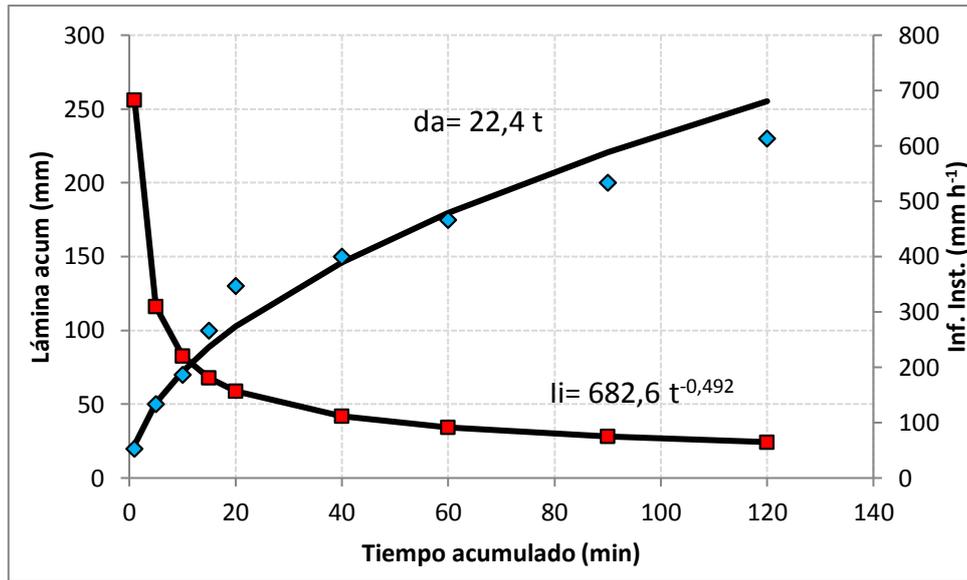


Figura 3.1.2. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/Yeso

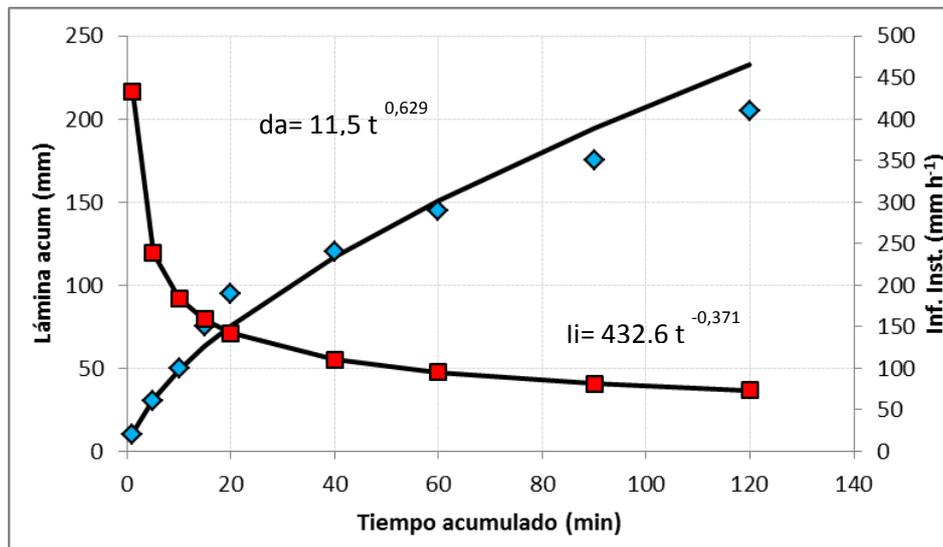


Figura 3.1.3. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 1/Azufre

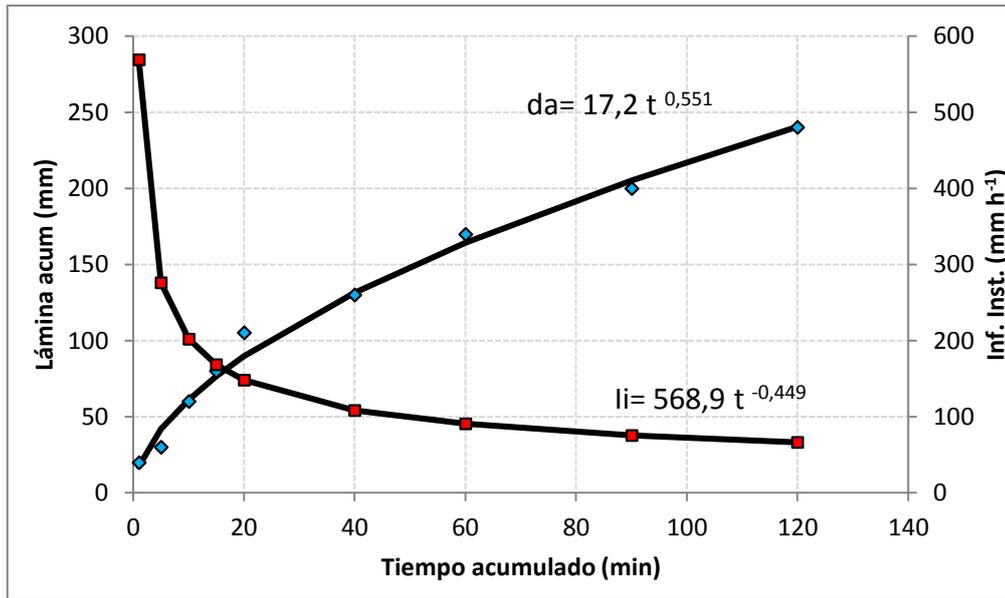


Figura 3.1.4. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Testigo

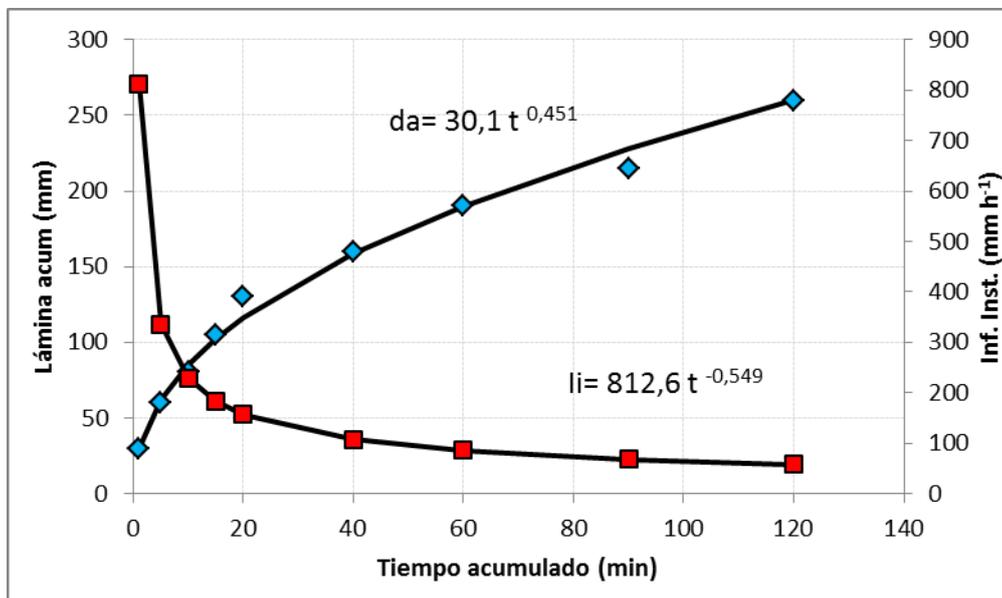


Figura 3.1.5. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Yeso

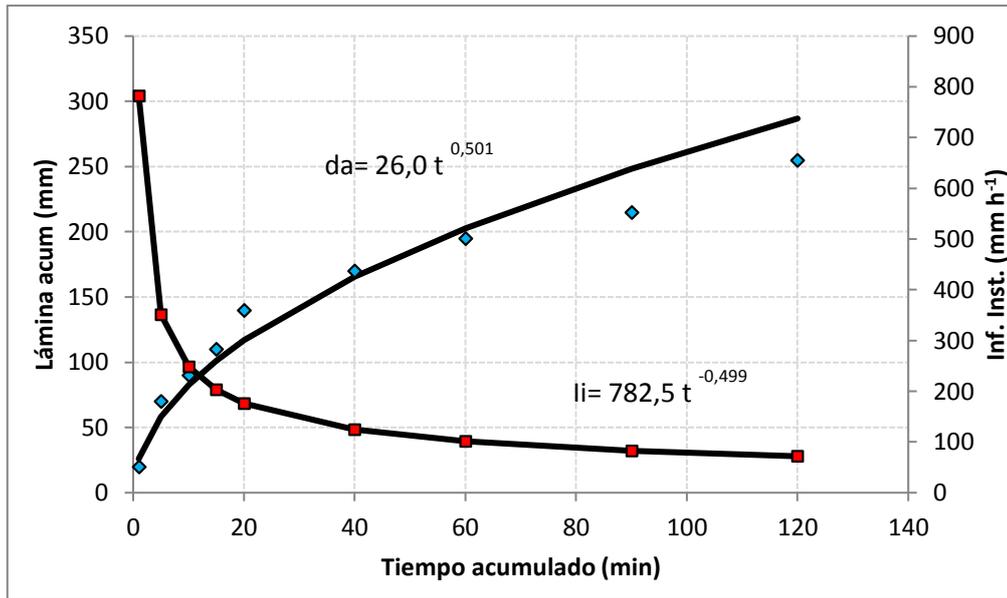


Figura 3.1.6. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 2/ Azufre

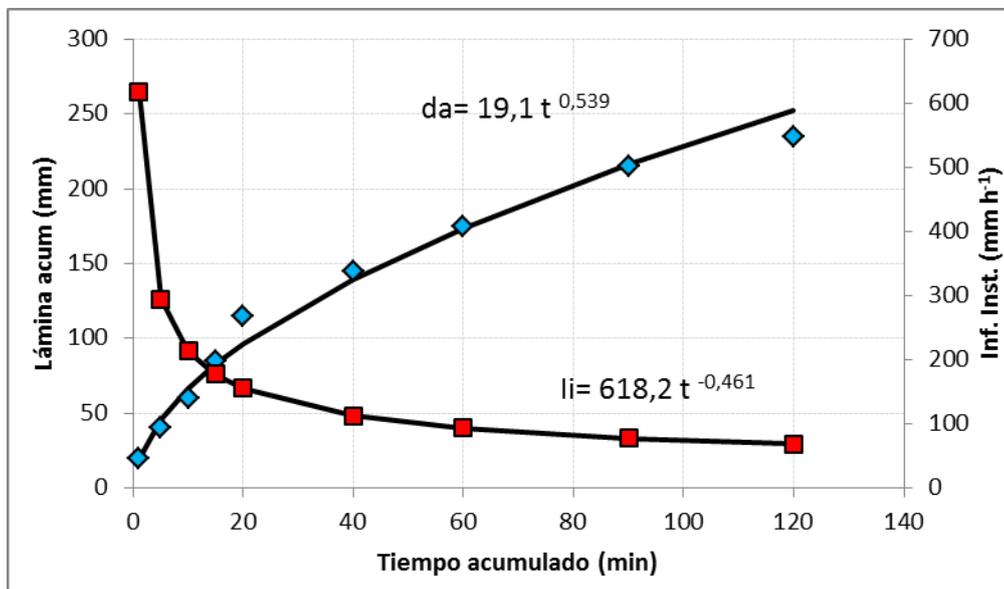


Figura 3.1.7. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Testigo

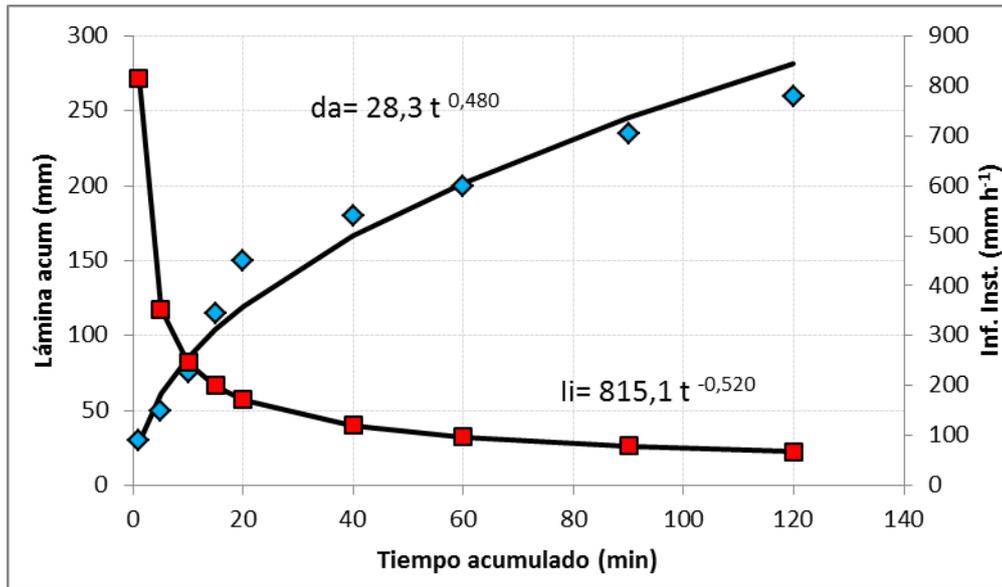


Figura 3.1.8. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Yeso

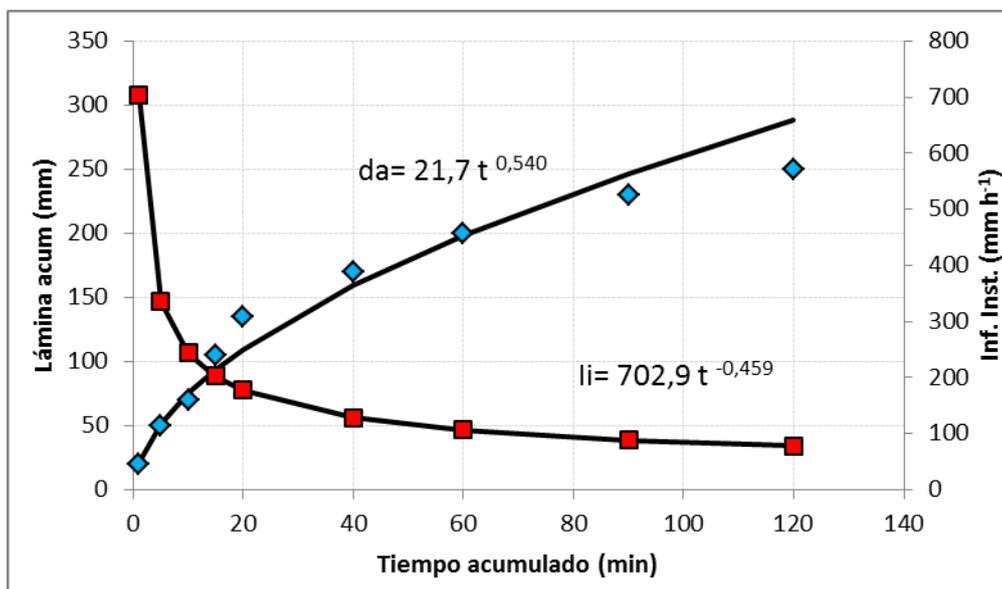


Figura 3.1.9. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 3/ Azufre

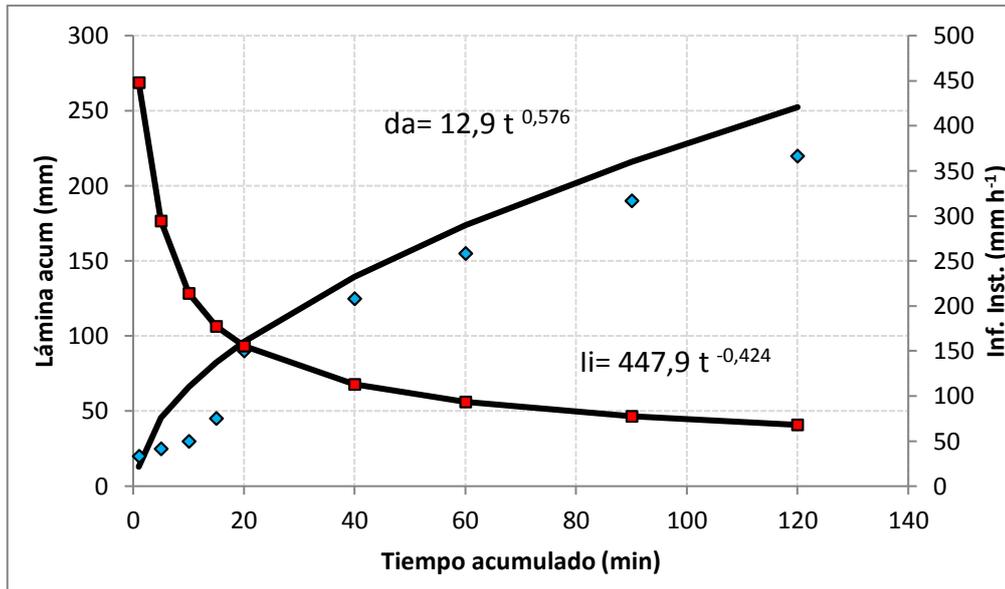


Figura 3.1.10. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Testigo

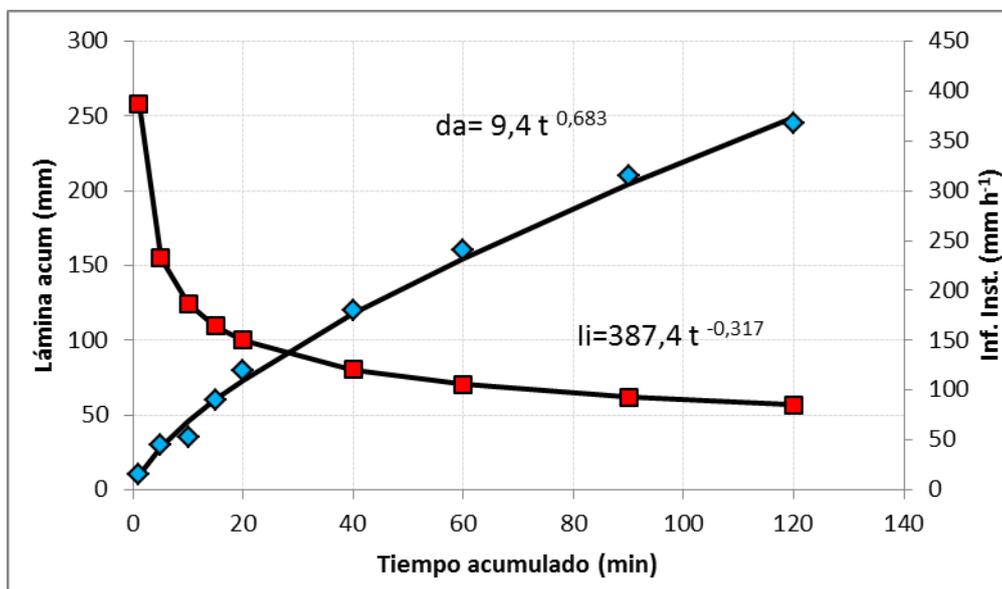


Figura 3.1.11. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Yeso

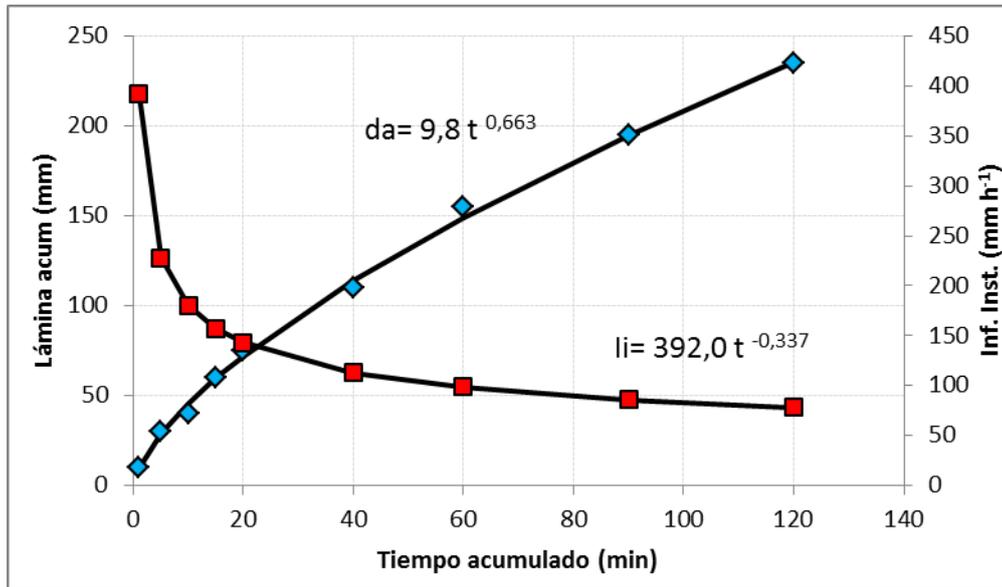


Figura 3.1.12. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 4/ Azufre

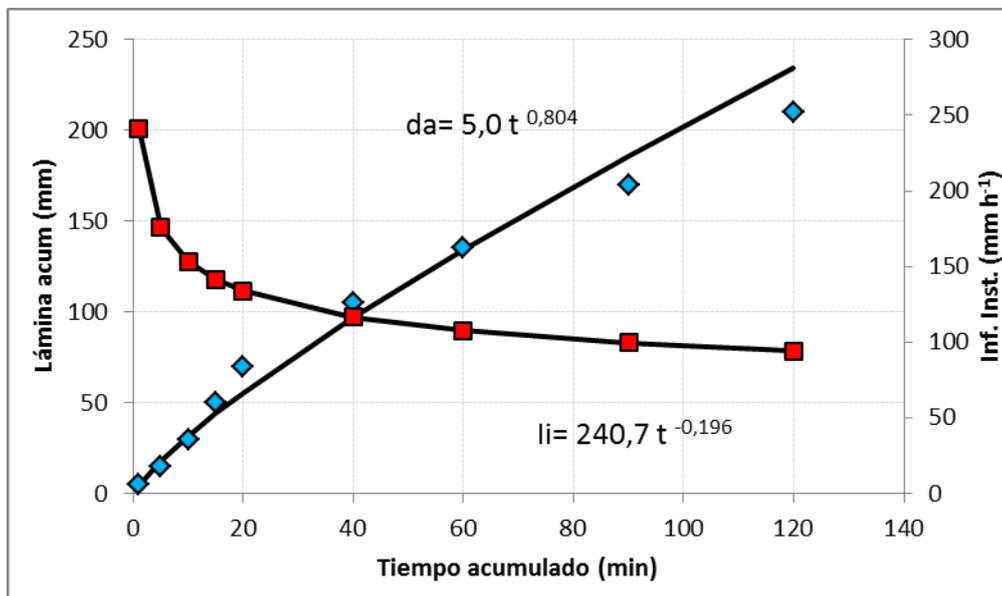


Figura 3.1.13. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Testigo

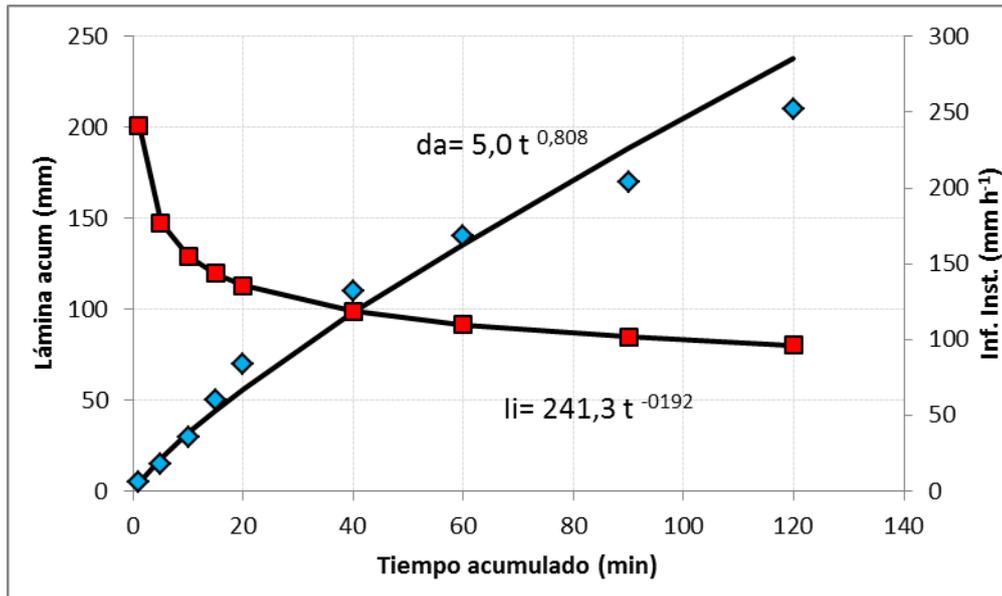


Figura 3.1.14. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Yeso

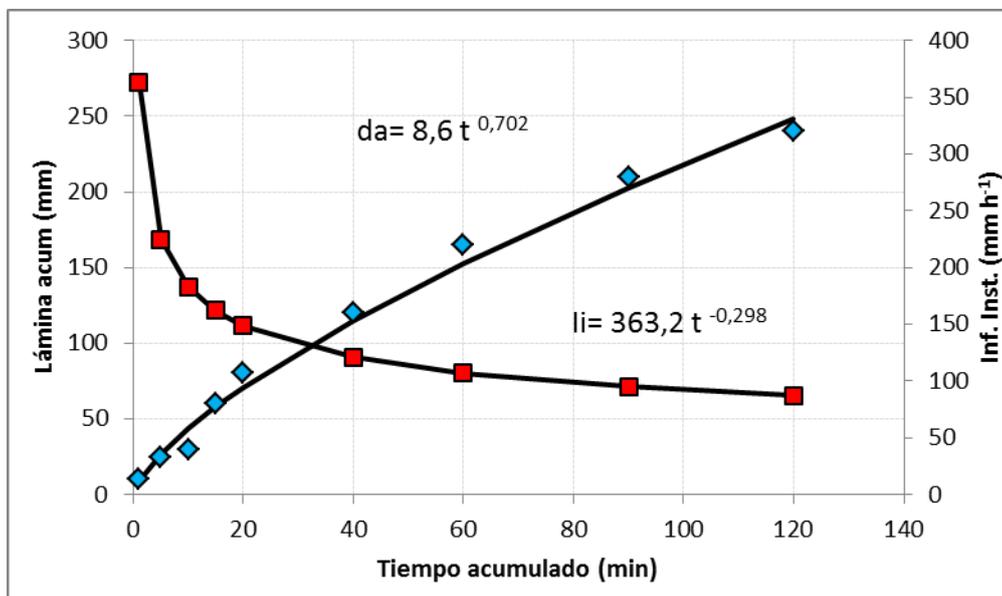


Figura 3.1.15. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 5/ Azufre

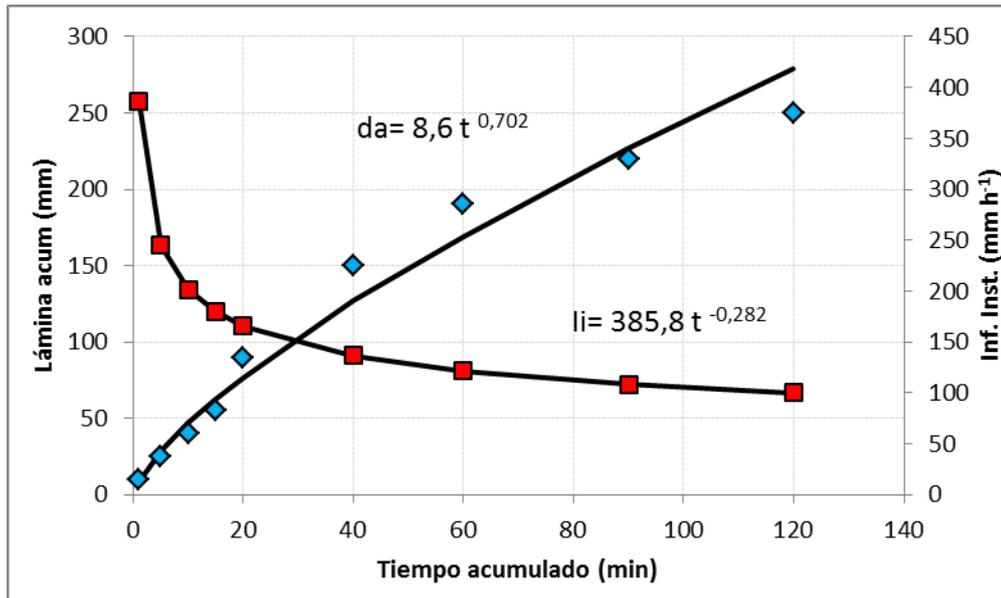


Figura 3.1.16. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Testigo

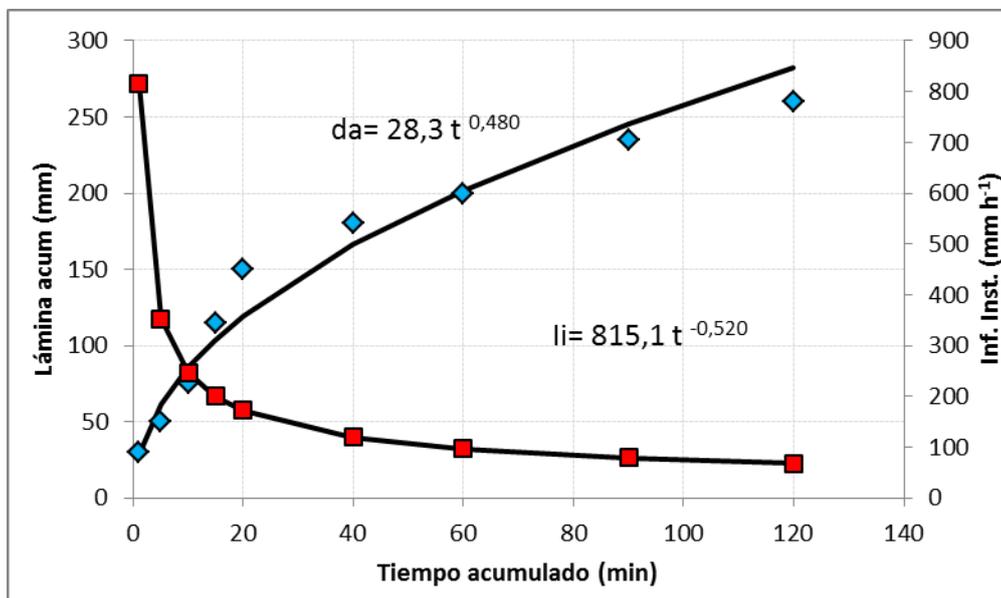


Figura 3.1.17. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Yeso

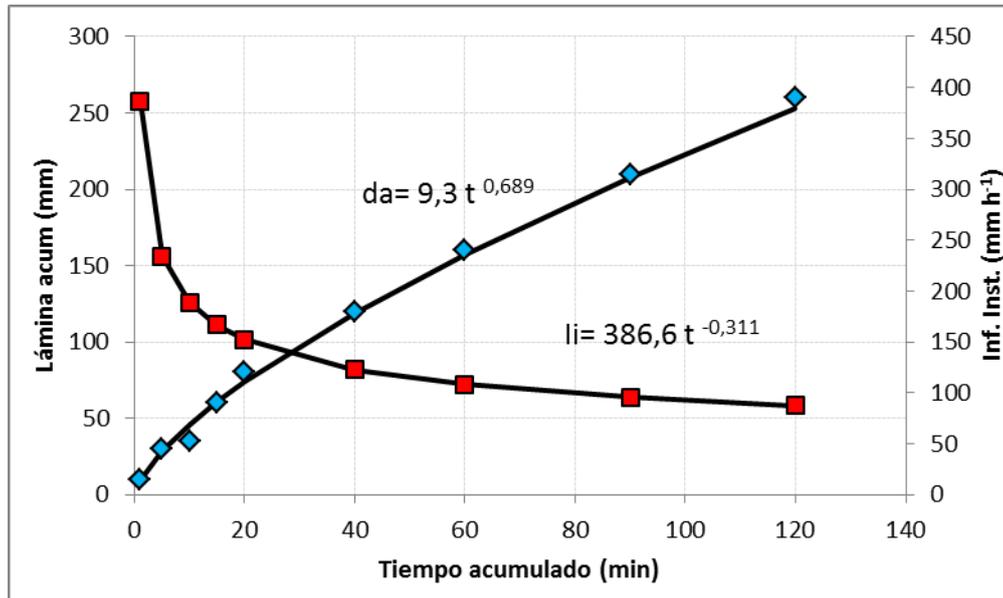


Figura 3.1.18. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 6/ Azufre

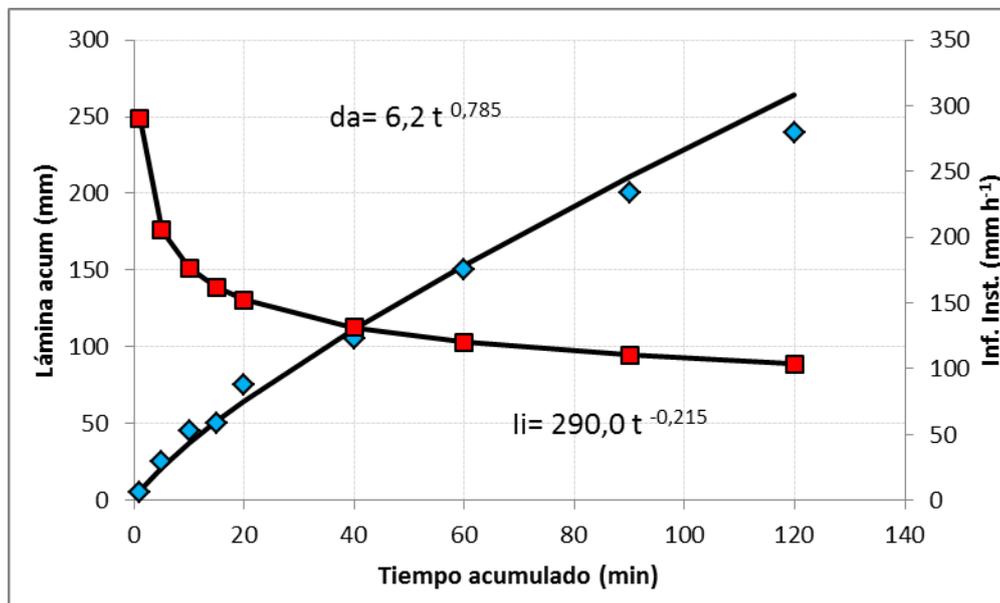


Figura 3.1.19. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Testigo

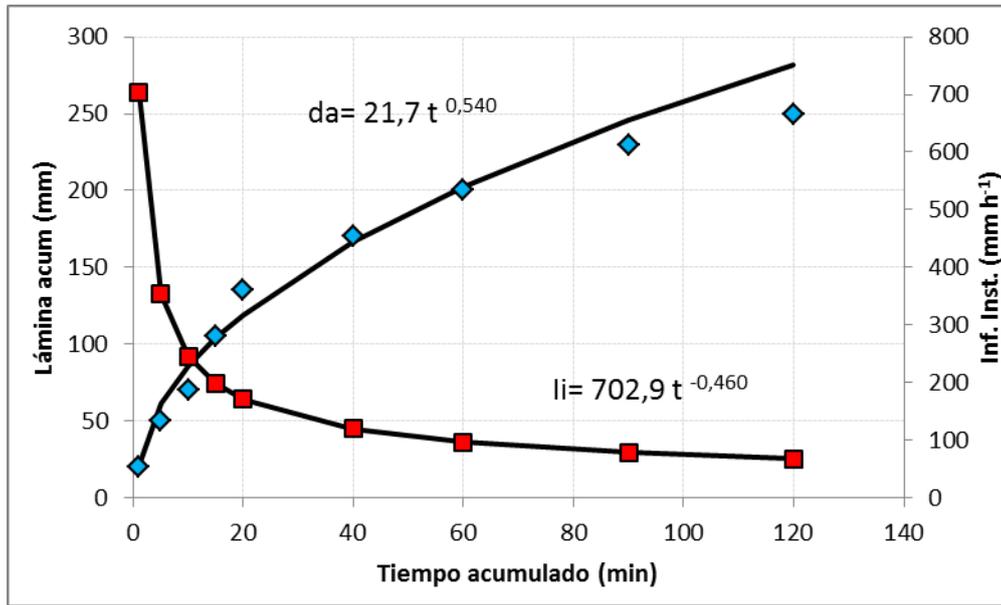


Figura 3.1.20. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Yeso

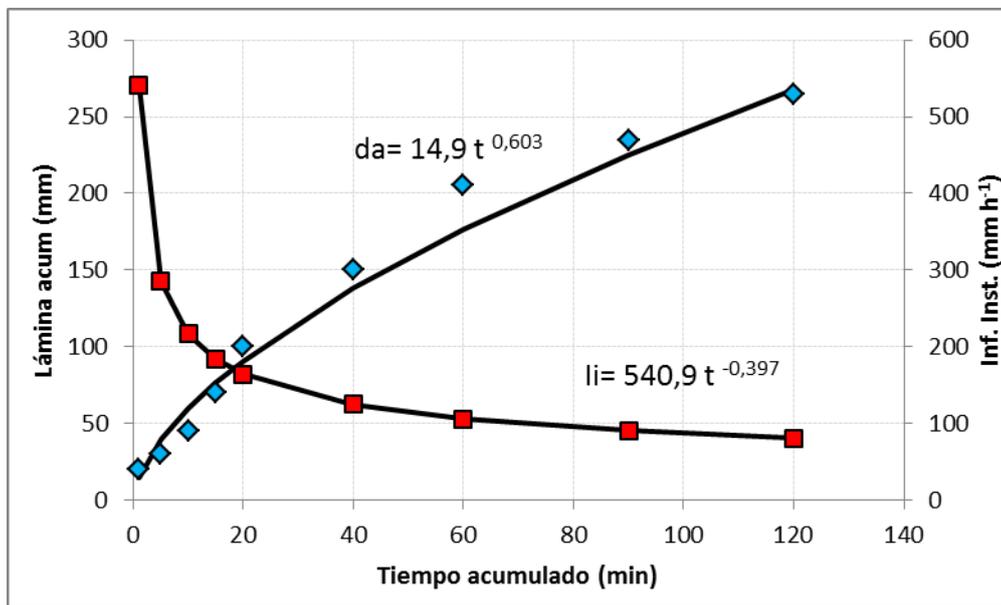


Figura 3.1.21. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 7/ Azufre

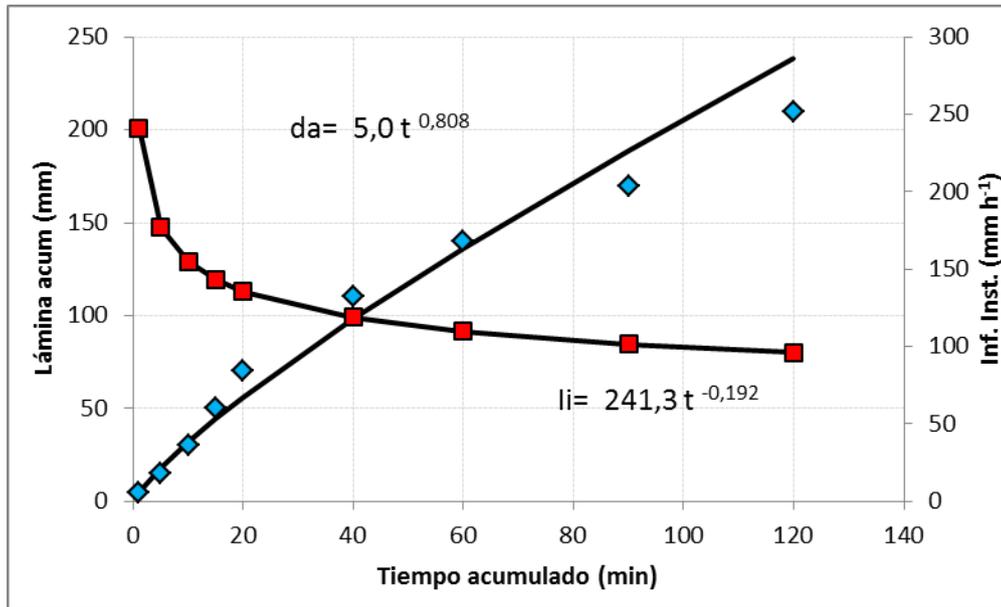


Figura 3.1.22. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Testigo

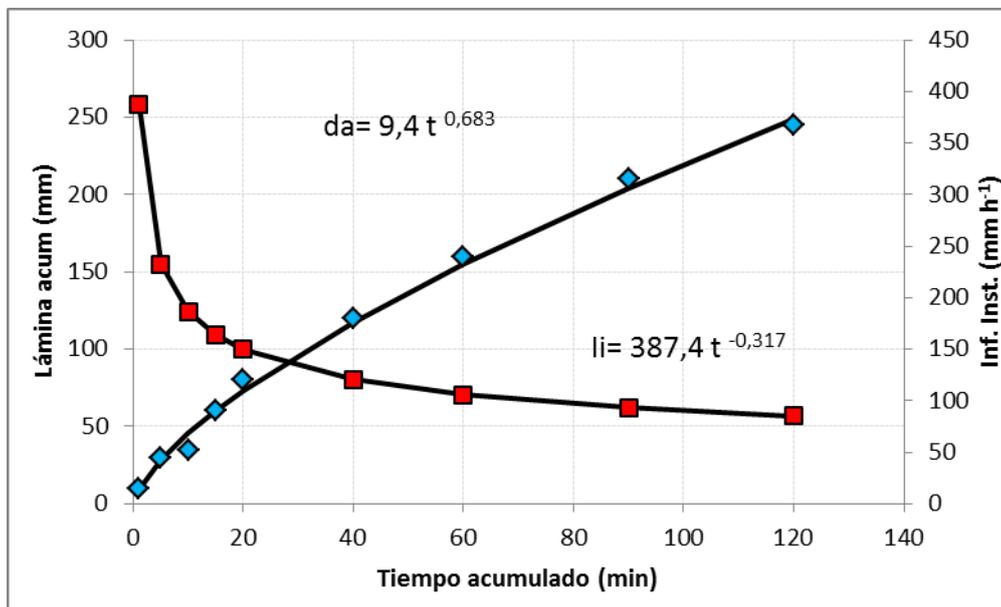


Figura 3.1.23. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Yeso

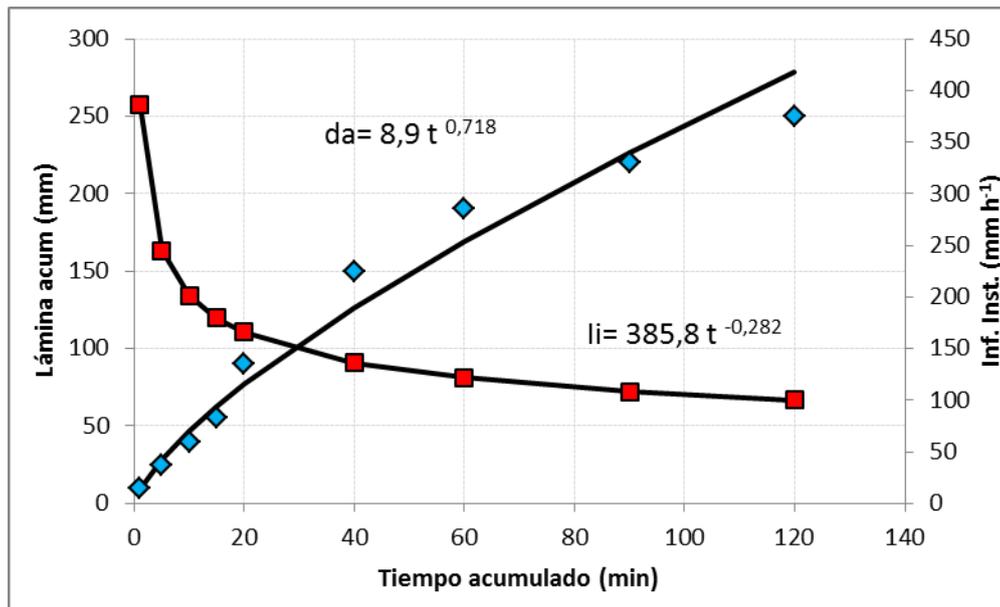


Figura 3.1.24. Lámina acumulada final (da) en mm e infiltración instantánea final en mm/h (li) en Parcela 8/ Azufre

Figuras 3.1 Curvas de infiltración final para cada subparcela experimental

3.1.2.2 Conductividad hidráulica

En la **Tabla 3.11** y **Figura 3.2** se comparan los datos correspondientes a la conductividad hidráulica inicial determinada al inicio del ensayo y la conductividad hidráulica final obtenida luego de un año de cultivo bajo cubierta.

Tabla 3.11: Comparación entre la K (conductividad hidráulica) inicial y la K (conductividad hidráulica) final (mm/h) para cada subparcela experimental.

Parcela	K inicial	K Final		
		Testigo	Yeso	Azufre
1	86,5	74,4	84,7	77,5
2	108,3	98,8	102,4	101,5
3	92,8	83,2	92,0	89,0
4	70,0	63,4	69,0	69,8
5	112,8	103,0	109,7	107,8
6	78,4	70,5	81,7	76,2
7	74,2	70,7	75,2	75,0
8	67,4	62,2	65,6	65,9

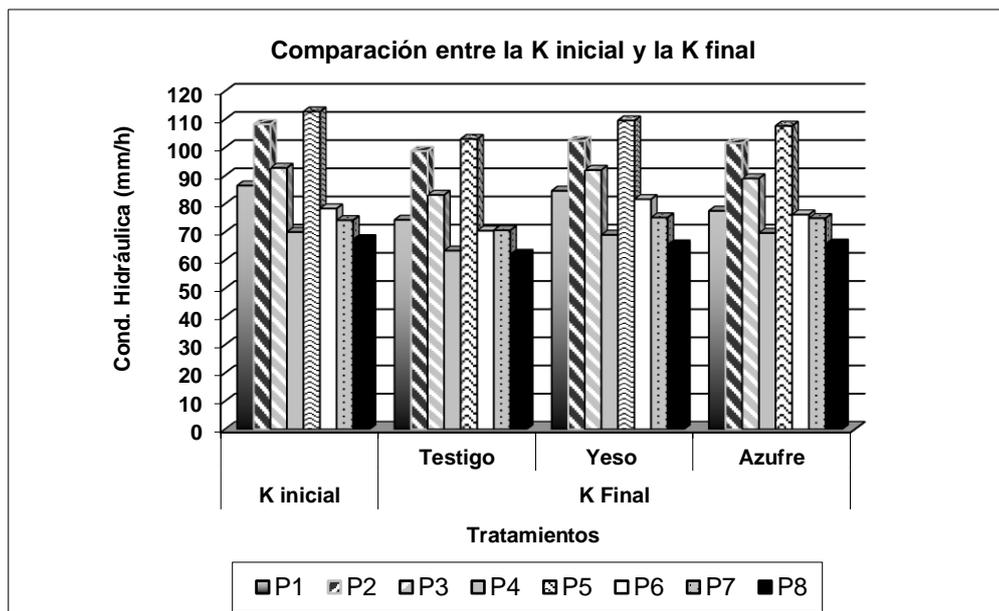


Figura 3.2. Comparación entre la K inicial y la K final (mm/h) para cada subparcela experimental.

El análisis estadístico de las conductividades hidráulicas para cada uno de los ambientes de riego por separado indica que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos y el valor inicial, debido al alto coeficiente de variabilidad. Sin embargo, se nota un ordenamiento o una tendencia lógica (**Tabla 3.12**).

Tabla 3.12. Efecto de los tratamientos de enmiendas sobre la Conductividad hidráulica en mm/h en los dos ambientes de riego R1 y R2

Tratamiento		R1	R2
Inicio		89,4	83,2
Final	Testigo	79,9	76,6
	Yeso	87,0	83,0
	Azufre	84,5	81,2
	DMS	26,6	34,2
	sign	ns	ns
	CV	17,24	23,31

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo y **CV**: coeficiente de variación en por ciento.

En la **Tabla 3.13** se presentan los porcentajes de disminución de la conductividad hidráulica final en relación a la conductividad hidráulica inicial. Los valores negativos que se observan son los casos en que la conductividad hidráulica final fue superior a la inicial.

Tabla 3.13: Porcentaje de disminución de la conductividad hidráulica final en relación a la conductividad hidráulica inicial (mm/h) para cada subparcela experimental.

Parcela	K inicial	% de disminución		
		Testigo	Yeso	Azufre
1	86,52	14,0	2,1	10,4
2	108,31	8,8	5,5	6,2
3	92,79	10,3	0,8	4,0
4	70,05	9,5	1,5	0,5
5	112,77	8,7	2,8	4,5
6	78,36	10,0	-4,2*	2,7
7	74,23	4,9	-1,3*	-0,98*
8	67,45	7,7	2,8	2,3

Nota: * valores negativos indican que la K final fue mayor a la K inicial

El análisis estadístico de estos datos revela un efecto muy significativo ($p=0,05$) sobre el porcentaje de disminución de la conductividad hidráulica en los dos ambientes de riego (**Tabla 3.14**).

Tabla 3.14. Efecto de los tratamientos con enmiendas sobre la disminución de la conductividad hidráulica del suelo (expresada en %) al final del ensayo en los dos ambientes de riego.

Tratamiento		R1	R2
Final	Testigo	10,7	7,8
	Yeso	2,5	0,02
	Azufre	5,3	2,15
DMS		5,9	5,3
sign		*	**
CV		48,75	81,10

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; *: Significativo al 0,05; **: Significativo al 0,01 y **CV**: Coeficiente de variación en por ciento.

Al interpretar los valores de conductividad hidráulica en el suelo es importante recordar que ésta está relacionada con el movimiento del agua en el mismo y por ende es útil a la hora de solucionar problemas de riego, drenaje y conservación del suelo. Al igual que sucedió con la infiltración, la conductividad hidráulica final del suelo se vio afectada después de un año de cultivo en invernadero. La principal causa que produjo la disminución de la conductividad hidráulica ha sido el aumento de la concentración de sodio en el suelo debido al uso de agua bicarbonatada sódica para regar, lo que se evidencia con el aumento del PSI en el suelo, sobre todo en las parcelas testigo. En la **Tabla 3.13** se observa que, el porcentaje de disminución de la conductividad hidráulica en todos los casos es mayor en el testigo que en los tratamientos de yeso y azufre. Esa

disminución en la conductividad hidráulica en el testigo claramente tiene relación directa con el aumento del PSI. No se evidencia tan claramente en los tratamientos de yeso y azufre donde los valores obtenidos de las mediciones son dispares, no permitiendo hacer una interpretación acertada. Sin embargo, se observa que la aplicación de yeso contrarresta mejor el efecto negativo del agua carbonatada sódica (**Tabla 3.14**). Según **Gardner et al., (1992)** la conductividad hidráulica es afectada por el exceso de sodio (Na) presente o adicionado al suelo, medido por el porcentaje de sodio intercambiable.

3.2 Caracterización físico-química del agua en distintas fechas

En la **Tabla 3.15** se detalla el análisis del agua para cada fecha de muestreo.

Tabla 3.15: Análisis de agua de EEA INTA Anguil realizados durante el ensayo en tres fechas de muestreo.

Determinaciones	Fecha de muestreo					
	20/02/2013		20/06/2013		20/02/2014	
pH	8,56		8,61		8,84	
CE dS m⁻¹	1,746		1,686		2,050	
Unidades	me L ⁻¹	mg L ⁻¹	me L ⁻¹	mg L ⁻¹	me L ⁻¹	mg L ⁻¹
Calcio (Ca)	0,45	9,0	0,48	9,6	0,4	8,0
Magnesio (Mg)	0,32	3,9	0,35	4,3	0,44	5,3
Sodio (Na)	14,54	334	14,4	331	20	460
Potasio (K)	0,12	4,7	0,11	4,3	0,12	4,7
Carbonatos (CO₃²⁻)	4,6	138	4,38	131,4	4,8	144
Bicarbonatos (HCO₃⁻)	9,8	598	9,47	578	9,75	595
Cloruros (Cl⁻)	2,2	78	2,4	85	3,81	135
Sulfatos (SO₄²⁻)	0,86	41,3	0,61	29,3	1,96	94,1
RAS	23,43		22,35		30,86	
Dureza	38,6		41,8		41,9	
CSR	13,63		13,02		13,71	

Nota: El carbonato de sodio residual de estas aguas es mayor de 13 me L⁻¹ lo que la convierte en un agua no recomendable para riego.

3.3 Mediciones en la planta

Se evaluó el rendimiento del cultivo expresado en kilogramo por metro cuadrado para determinar si hubo algún efecto de los tratamientos aplicados. También se evaluó el crecimiento vegetativo del cultivo para cada tratamiento de enmiendas. Se construyeron las curvas de crecimiento en los cinco ciclos de lechuga.

3.3.1 Evaluación del rendimiento del cultivo

En la **Tabla 3.16** se presenta el análisis estadístico del rendimiento final de lechuga expresado en kilogramo por metro cuadrado durante los cinco ciclos consecutivos de cultivo, para los dos ambientes de riego.

En el primer ciclo, en el ambiente R2, los rendimientos obtenidos en las parcelas tratadas tanto con azufre como con yeso presentan una diferencia altamente significativa con respecto al testigo ($p= 0,001$). En el segundo ciclo, en R1 hay diferencia significativa del yeso con respecto al testigo ($p= 0,05$). En el cuarto ciclo, tanto en R1 como en R2 se observan diferencias significativas (en R1 $p= 0,01$ y en R2 $p=0,05$) y en el quinto ciclo, solo en R1 hay diferencia muy significativa entre los tratamientos.

Tabla 3.16: Rendimiento final de lechuga expresado en kg.m^2 para cada tratamiento durante los cinco ciclos de cultivo (25 plantas.m^2)

Ambiente	Tratamiento	Ciclo				
		1	2	3	4	5
R1	Testigo	3,59	1,42	1,77	1,64	1,56
	Azufre	4,09	2,22	2,41	2,14	1,99
	Yeso	4,43	2,86	2,56	2,35	2,19
	DMS	1,76	1,44	0,96	0,49	0,43
	Sign	ns	*	ns	**	**
	CV	22,03	33,73	21,66	12,24	11,27
R2	Testigo	3,67	2,44	2,05	1,92	1,89
	Azufre	4,17	3,06	2,38	2,27	2,16
	Yeso	4,53	3,23	2,68	2,44	2,31
	DMS	0,41	0,90	0,67	0,47	0,66
	Sign	***	ns	ns	*	ns
	CV	5,06	15,74	14,26	10,70	15,85

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *: Significativo al 0,05; **: Significativo al 0,01; ***: Significativo al 0,001 y **CV**: coeficiente de variación en por ciento.

Haciendo una lectura general de los valores se observa una tendencia en los dos ambientes de riego y en los cinco ciclos de cultivo, que es que, el tratamiento con yeso es el que mayor rendimiento presentó, aunque en algunos ciclos como en el tercero sin diferencia estadística significativa. El azufre siempre rindió más que el testigo pero menos que el yeso. **Andriolo et al., (2005)** evaluaron el crecimiento, desarrollo y rendimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Vera bajo un sistema hidropónico, en crecientes niveles de salinidad. Determinaron que, para fines comerciales, a niveles superiores de $2,0 \text{ mS m}^{-1}$ y $2,6 \text{ mS m}^{-1}$ el peso fresco de las plantas y el crecimiento disminuyeron respectivamente. También **Oliveira et al., (2011)**, evaluaron el rendimiento de distintos

cultivares de lechuga en invernadero regados con agua salina. Concluyeron que, el número de hojas, el área foliar y la biomasa aérea disminuyen linealmente con el incremento de la salinidad. Asimismo, **Dias et al., (2011)**, en un ensayo con dos cultivares de lechuga en hidroponia, concluyen que la lechuga es sensible al aumento de la salinidad de la solución nutritiva, lo que reduce el número de hojas, área foliar y el peso fresco y seco de los brotes. **Zhilong Bie et al., (2004)** encontraron que el área foliar, peso seco, longitud de hoja, ancho de la hoja, tasa fotosintética y conductancia estomática de la lechuga disminuyeron con crecientes concentraciones de sulfato y bicarbonato de sodio. Coincidente con los datos de este trabajo, **Muguero (2014)**, en un ensayo realizado en lechuga bajo invernadero regado con aguas bicarbonatadas sódicas, concluyó que la productividad del cultivo mejoró con la aplicación de yeso en relación a los otros tratamientos aplicados (drenaje solo) y al testigo.

También se evaluó el rendimiento considerando el tamaño de la planta de lechuga, expresado éste en peso fresco por planta (kg) (**Tabla 3.17**). En el ambiente R1, hubo diferencias significativas en el 3º ciclo ($p=0,05$) y muy significativas en el 4º y 5º ciclo ($p=0,01$), de los tratamientos azufre y yeso con respecto al testigo. Es decir, que se cosecharon plantas más grandes en los últimos tres ciclos de cultivo. En R2, hubo diferencias significativas en el 2º y 3º ciclo ($p=0,05$) y muy significativas en el 4º y 5º ciclo ($p=0,01$), también de ambas enmiendas en relación al testigo.

Tabla 3.17: Rendimiento final de lechuga expresado en peso fresco por planta (kg) para cada tratamiento durante los cinco ciclos de cultivo.

Ambiente	Tratamiento	Ciclo				
		1	2	3	4	5
R1	Testigo	0,19	0,17	0,12	0,11	0,10
	Azufre	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16
	Yeso	0,23	0,17	0,21	0,19	0,18
	DMS	0,05	0,17	0,07	0,06	0,06
	Sign	ns	ns	*	**	**
	CV	11,94	46,89	20,91	20,43	20,34
R2	Testigo	0,20	0,17	0,18	0,12	0,11
	Azufre	0,22	0,23	0,22	0,19	0,17
	Yeso	0,24	0,23	0,23	0,21	0,19
	DMS	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04
	Sign	ns	*	*	**	**
	CV	11,36	14,56	10,2	13,38	13,54

Nota: **DMS**: diferencia mínima significativa; **ns**: no significativo; *: Significativo al 0,05; **: Significativo al 0,01; y **CV**: coeficiente de variación en por ciento.

3.3.2 Evaluación del crecimiento vegetativo del cultivo

Se evaluó el crecimiento vegetativo del cultivo en cada ciclo, para cada tratamiento de enmienda y para cada ambiente (R1 y R2). Se construyeron las respectivas curvas de crecimiento con el peso fresco de la parte aérea y en las tres fechas de muestreo. El análisis de estos datos está estrechamente relacionado con el análisis anterior de rendimiento final del cultivo de lechuga a lo largo de los cinco ciclos.

En la **Tabla 3.18** se presenta el resultado del análisis estadístico del efecto de los tratamientos con enmiendas sobre el peso fresco, el peso seco y el porcentaje de materia seca de lechuga durante el primer ciclo de cultivo, considerando los valores obtenidos en tres fechas de muestreo durante el ciclo para ambos ambientes de riego.

En el primer muestreo no se observan diferencias significativas en R1 y R2, lo cual es lógico si consideramos el escaso desarrollo del cultivo en esa instancia. En el segundo y tercer muestreo se evidencian diferencias significativas ($p=0,05$) solamente para R1 en el peso fresco y peso seco. En el segundo muestreo esa diferencia es entre azufre y yeso en relación al testigo y en el tercer muestreo, ya cuando el cultivo estaba por cosecharse, la diferencia se da entre el yeso y el testigo solamente, aunque los valores en azufre son muy similares de los de yeso. En R2, aunque hay diferencias importantes de peso en los tratamientos con yeso y azufre en relación al testigo, no alcanzaron a ser significativas estadísticamente.

En las **Figura 3.3** se observan las curvas de crecimiento del 1º ciclo para el ambiente R1 y R2.

Tabla 3.18: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 1º ciclo.

Fecha	Trat.	Ambiente R1			Ambiente R2		
		PF	PS	%MS	PF	PS	%MS
18/03	T	2,03	0,17	8,25	1,00	0,09	9,25
	S	2,30	0,20	8,46	1,35	0,11	8,07
	Y	2,25	0,20	9,00	1,75	0,16	9,14
	DMS	1,42	0,13	1,39	0,76	0,07	1,35
	Sign.	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	32,85	34,92	8,21	28,23	29,33	7,74
05/04	T	23,70	1,36	6,62	19,90	1,15	6,33
	S	67,68	5,05	7,19	43,20	2,65	6,03
	Y	73,60	5,23	7,05	44,15	2,79	6,23
	DMS	43,65	3,36	2,60	28,91	1,94	2,10
	Sign.	*	*	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	40,21	43,88	18,94	40,96	44,80	17,16

	T	77,48	5,12	6,41	115,73	7,63	6,62
	S	150,50	9,17	6,17	163,18	9,48	5,92
18/04	Y	156,40	9,32	6,00	172,30	9,99	6,04
	DMS	74,26	4,63	1,07	94,76	4,00	1,39
	Sign	*	*	ns	ns	ns	ns
	CV	29,36	29,81	8,76	31,91	22,43	11,40

Nota: **Trat:** tratamiento; **PF:** peso fresco en gramos; **PS:** peso seco en gramos; **%MS:** porcentaje de materia seca; **T:** testigo; **S:** azufre; **Y:** yeso; **DSM:** diferencia mínima significativa; **Sign.:** significancia y **CV:** coeficiente de variación.

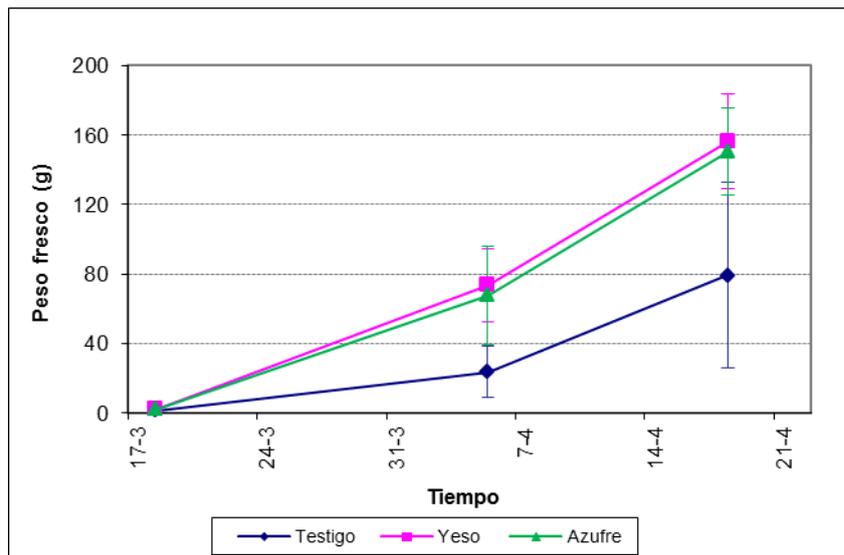


Figura 3.3.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 1º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

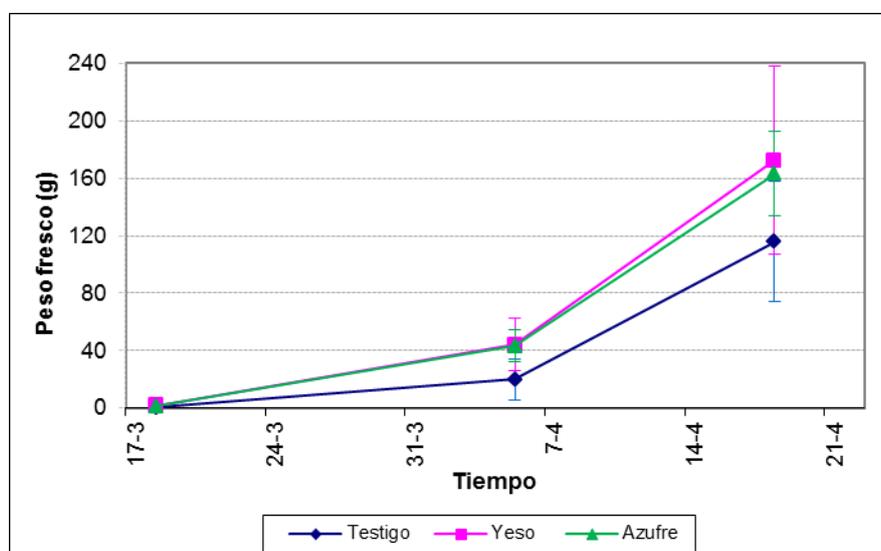


Figura 3.3.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 1º ciclo en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

En la **Tabla 3.19** se presenta el resultado del análisis estadístico del efecto de los tratamientos con enmiendas sobre el peso fresco, el peso seco y el porcentaje de materia seca de lechuga durante el segundo ciclo de cultivo, considerando los valores obtenidos en tres fechas de muestreo durante el ciclo para ambos ambientes de riego.

Como en el primer ciclo de cultivo, en la primera fecha de muestreo no se observan diferencias significativas en R1 y R2. En el segundo muestreo, en R1, la variable peso fresco presenta una diferencia muy significativa ($p= 0,01$), tanto del yeso como del azufre con respecto al testigo y en el tercer muestreo, tanto en R1 como en R2, las diferencias son aún más acentuadas en las variables peso fresco y peso seco, siendo altamente significativa (en R1) las diferencias encontradas del yeso y azufre en relación al testigo ($p= 0,001$). En este ciclo de lechuga en particular, queda demostrado claramente el efecto del agregado de enmiendas (yeso y azufre) al suelo sobre el desarrollo y crecimiento del cultivo de lechuga en invernadero, manifestándose también en el testigo los efectos negativos de regar con agua de mala calidad.

Balcaza (2000) afirma que el esfuerzo mayor que debe realizar la planta para alimentarse de la solución del suelo, genera un gasto de energía adicional y con ello menores posibilidades de crecimiento, menor rendimiento y calidad de los cultivos. Por eso, cuánto más salina sea la solución del agua del suelo, mayores dificultades para absorber agua por parte de las plantas. Por su parte, **Di Benedetto (2005)** indica que la lechuga resiste niveles moderados de salinidad, aunque en invernaderos, el desarrollo del cultivo puede verse afectado por el incremento de sales solubles.

Cuando las aguas que se emplean para riego son salinas, bicarbonatadas sódica, se presenta una situación de estrés para el cultivo que tiene varias implicancias fisiológicas sobre el mismo: incremento de la concentración osmótica interna, disminución de la superficie foliar, se modifica la tasa fotosintética y la translocación de fotoasimilados, generando una disminución de los metabolitos necesarios para el crecimiento de los órganos en expansión. Finalmente, en un cultivo como la lechuga, donde lo que se comercializa son las hojas, lo que se ve afectado en última instancia es el rendimiento y la calidad comercial.

Tabla 3.19: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (g), el peso seco (g) y el porcentaje de materia seca de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 2º ciclo

Fecha	Trat.	Ambiente R1			Ambiente R2		
		PF	PS	%MS	PF	PS	%MS
31/05	T	1,77	0,14	7,93	1,28	0,10	7,74
	S	1,95	0,17	8,69	1,50	0,12	8,13
	Y	2,13	0,17	7,75	1,78	0,15	8,22
	DMS	1,48	0,15	2,56	0,84	0,08	2,60
	Sign.	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	38,38	47,54	15,95	27,93	32,53	16,44
18/06	T	18,03	1,12	6,49	16,05	0,97	6,41
	S	60,60	3,88	6,36	37,30	2,13	5,63
	Y	65,05	3,97	6,00	42,45	2,34	5,39
	DMS	35,07	2,82	2,12	21,94	1,55	1,94
	Sign	**	*	<i>ns</i>	*	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	37,09	47,81	17,10	34,80	43,35	16,88
08/07	T	77,08	4,47	5,81	87,08	7,63	6,62
	S	120,10	7,75	6,47	163,18	9,48	5,92
	Y	128,45	8,14	6,37	172,30	9,99	6,04
	DMS	23,08	0,86	0,56	23,18	2,18	1,76
	Sign	***	***	*	**	**	<i>ns</i>
	CV	10,77	6,40	4,60	9,73	13,95	13,44

Nota: **Trat:** tratamiento; **PF:** peso fresco en gramos; **PS:** peso seco en gramos; **%MS:** porcentaje de materia seca; **T:** testigo; **S:** azufre; **Y:** yeso; **DSM:** diferencia mínima significativa; **Sign.:** significancia y **CV:** coeficiente de variación

En las **Figura 3.4** se observan las curvas de crecimiento del 2º ciclo para el ambiente R1 y R2.

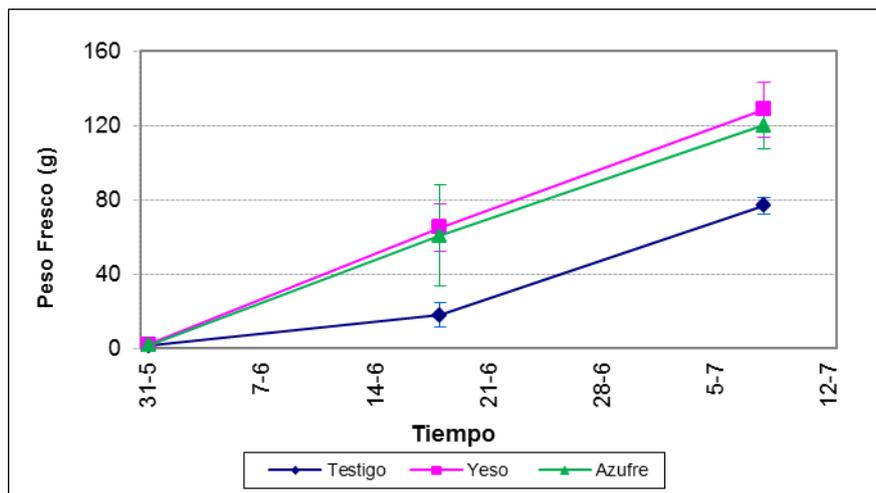


Figura 3.4.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el **2º ciclo**, en el ambiente **R1** para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

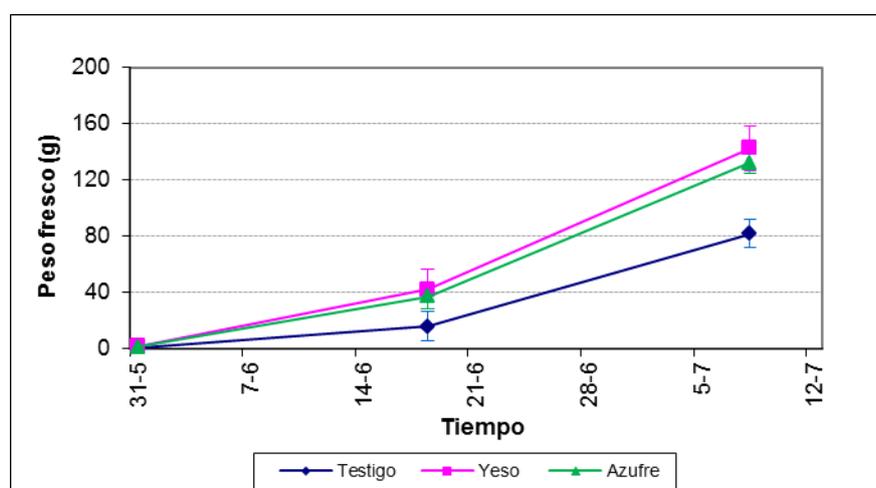


Figura 3.4.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el **2º ciclo**, en el ambiente **R2** para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

En la **Tabla 3.20** se presenta el resultado del análisis estadístico del efecto de los tratamientos con enmiendas sobre el peso fresco, el peso seco y el porcentaje de materia seca de lechuga durante el tercer ciclo de cultivo, considerando los valores obtenidos en tres fechas de muestreo durante el ciclo para ambos ambientes de riego.

En el primer muestreo no se observan diferencias significativas en R1 y R2. Coincidente con lo que sucedió en el primer ciclo, en el segundo muestreo se observan diferencias significativas para peso fresco y peso seco en R1 ($p= 0,05$).

En el tercer muestreo, en un período más avanzado del cultivo, las diferencias encontradas tanto de peso fresco como de peso seco, son muy significativas ($p= 0,01$), sobre todo en R1. En R2 aparece diferencia significativa ($p= 0,05$) en el porcentaje de materia seca en el tratamiento azufre en relación al testigo.

Tabla 3.20: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (PF, g) y el peso seco (PS, g) y el porcentaje de materia seca (MS) de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 3º ciclo.

Fecha	Trat.	Ambiente R1			Ambiente R2		
		PF	PS	%MS	PF	PS	%MS
17/09	T	1,80	0,15	8,21	1,90	0,14	7,79
	S	1,73	0,14	7,67	2,10	0,17	7,93
	Y	2,08	0,18	8,52	2,33	0,20	8,68
	DMS	1,35	0,14	3,65	1,05	0,07	1,50
	Sign. CV	ns 36,75	ns 45,71	ns 22,72	ns 25,33	ns 22,1	ns 18,64
07/10	T	18,50	1,18	6,87	21,95	1,33	6,61
	S	57,45	4,26	7,09	40,95	2,51	6,06
	Y	61,78	4,02	6,38	42,13	2,68	6,25
	DMS	36,63	3,12	2,49	28,19	1,86	2,10
	Sign. CV	* 40,41	* 50,08	ns 18,61	ns 40,78	ns 43,46	ns 16,85
24/10	T	43,60	2,90	6,20	95,65	6,83	7,07
	S	133,55	8,11	6,11	147,25	7,90	5,43
	Y	143,13	8,75	6,30	156,00	9,01	5,87
	DMS	59,72	3,33	1,66	48,07	2,80	1,46
	Sign. CV	** 28,33	** 25,62	ns 13,56	* 18,31	ns 17,94	* 12,09

Nota: **Trat:** tratamiento; **PF:** peso fresco en gramos; **PS:** peso seco en gramos; **%MS:** porcentaje de materia seca; **T:** testigo; **S:** azufre; **Y:** yeso; **DSM:** diferencia mínima significativa; **Sign.:** significancia y **CV:** coeficiente de variación

En las **Figura 3.5** se observan las curvas de crecimiento del 3º ciclo para el ambiente R1 y R2.

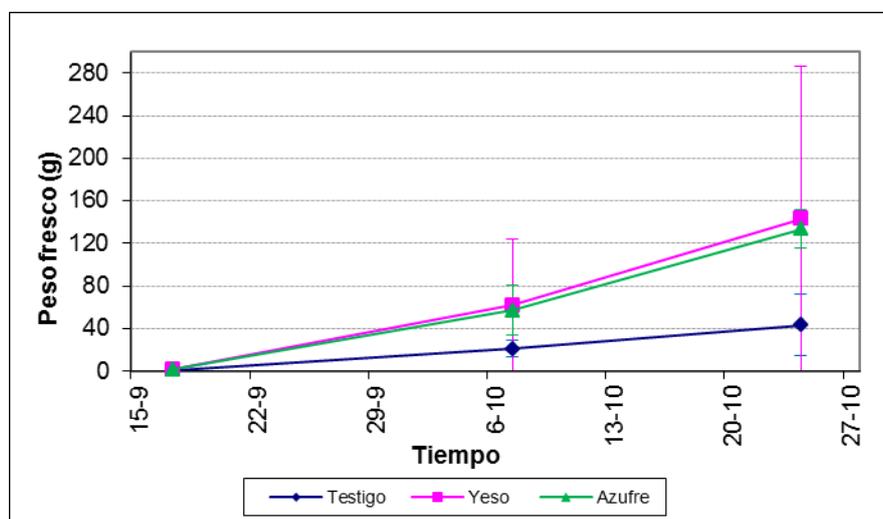


Figura 3.5.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 3º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

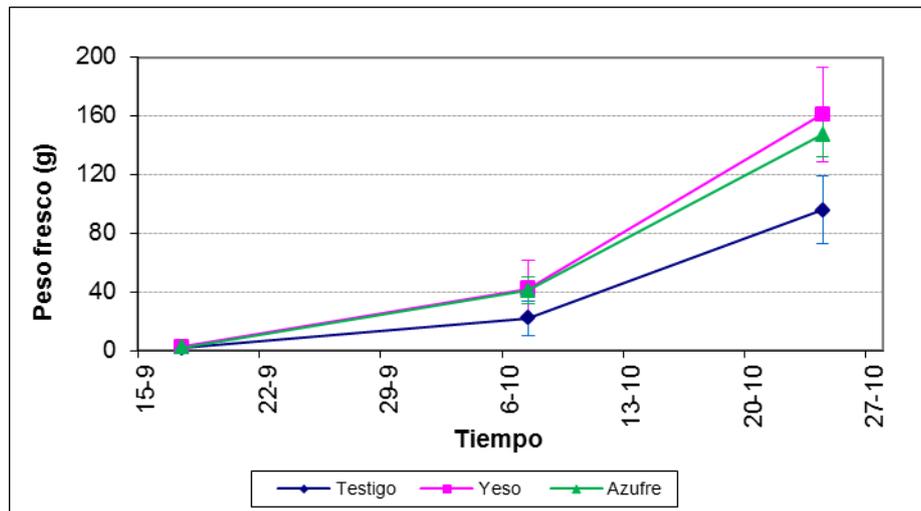


Figura 3.5.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 3º ciclo, en el ambiente R2 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

En la **Tabla 3.21** se presenta el resultado del análisis estadístico del efecto de los tratamientos con enmiendas sobre el peso fresco, el peso seco y el porcentaje de materia seca de lechuga durante el cuarto ciclo de cultivo, considerando los valores obtenidos en tres fechas de muestreo durante el ciclo para ambos ambientes de riego.

En el primer muestreo no se observan diferencias significativas en R1 y R2 de ninguna variable analizada. En el segundo muestreo y contrario a lo que viene sucediendo, la diferencia significativa ($p= 0,05$) se presenta en R2 solamente, para las variables peso fresco y peso seco. En el tercer muestreo, se observan diferencias significativas en peso fresco y porcentaje de materia seca para ambos ambientes de riego ($p= 0,05$).

Tabla 3.21: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (PF, g), el peso seco (PS, g) y el porcentaje de materia seca (%MS) de lechuga en tres fechas de muestreo durante el 4º ciclo

Fecha	Trat.	Ambiente R1			Ambiente R2		
		PF	PS	%MS	PF	PS	%MS
23/11	T	1,42	0,10	7,19	1,06	0,10	8,98
	S	1,28	0,11	8,97	1,60	0,13	7,80
	Y	1,80	0,17	9,18	1,68	0,15	8,61
	DMS	1,02	0,08	2,61	0,65	0,07	2,12
	Sign.	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	CV	34,37	30,93	15,67	22,82	30,63	12,69
05/12	T	20,68	1,14	6,22	23,20	1,36	6,75
	S	43,73	2,67	6,00	67,60	5,05	7,19
	Y	43,48	2,76	6,26	73,85	5,16	6,96
	DMS	29,39	1,92	2,21	44,03	3,33	2,62
	Sign	ns	ns	ns	*	*	ns
	CV	41,40	44,43	18,21	40,63	43,73	19,06

	T	96,58	6,89	7,08	43,00	2,88	6,24
	S	147,23	7,89	5,43	130,93	8,02	6,17
27/12	Y	160,95	9,02	5,76	141,35	8,72	6,35
	DMS	55,99	2,87	1,61	57,85	2,80	1,46
	Sign	*	ns	*	*	ns	*
	CV	21,02	18,30	13,38	18,31	17,94	12,09

Nota: **Trat:** tratamiento; **PF:** peso fresco en gramos; **PS:** peso seco en gramos; **%MS:** porcentaje de materia seca; **T:** testigo; **S:** azufre; **Y:** yeso; **DSM:** diferencia mínima significativa; **Sign.:** significancia y **CV:** coeficiente de variación

En las **Figura 3.6** se observan las curvas de crecimiento del 4º ciclo para el ambiente R1 y R2.

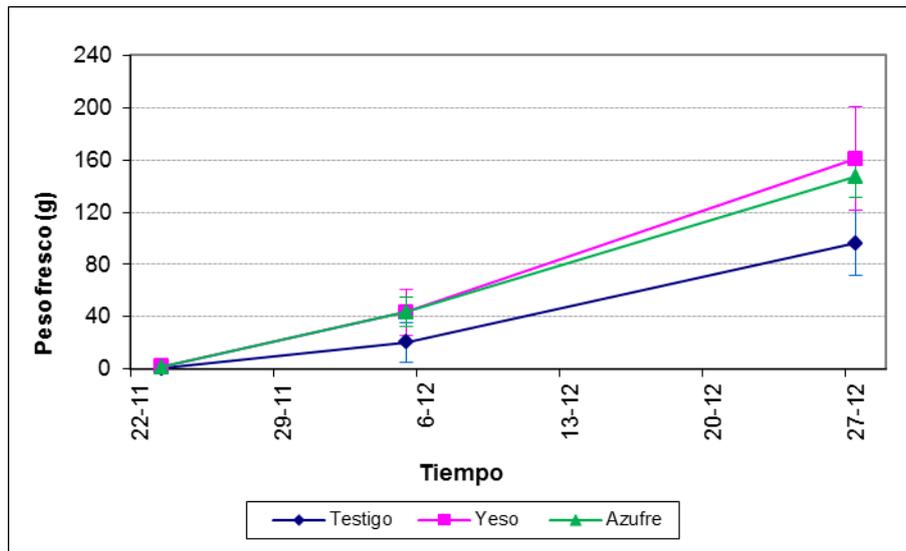


Figura 3.6.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el 4º ciclo, en el ambiente R1 para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

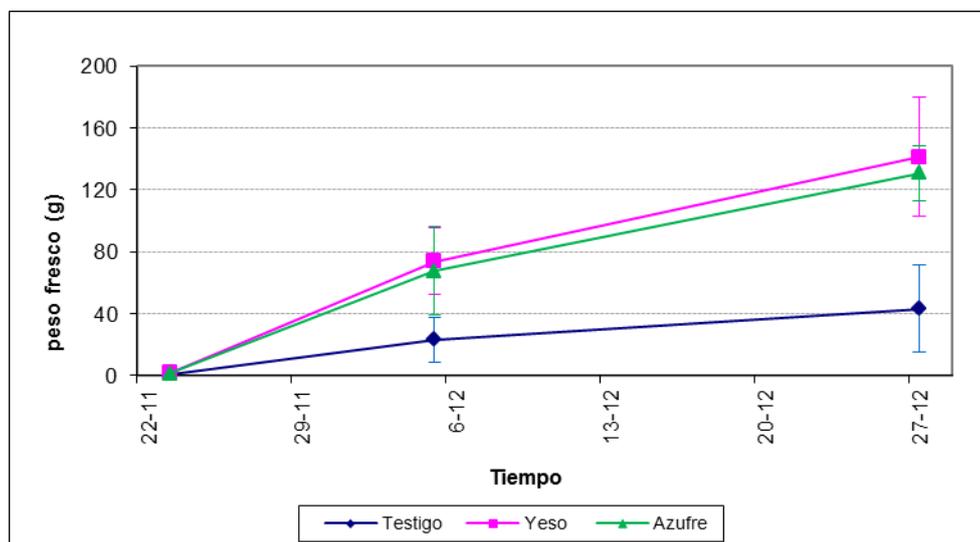


Figura 3.5.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el **4º ciclo**, en el ambiente **R2** para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

En la **Tabla 3.22** se presenta el resultado del análisis estadístico del efecto de los tratamientos con enmiendas sobre el peso fresco, el peso seco y el porcentaje de materia seca de lechuga durante el quinto y último ciclo de cultivo, considerando los valores obtenidos en tres fechas de muestreo durante el ciclo para ambos ambientes de riego. En el primer muestreo no se observan diferencias significativas en R1 y R2 de ninguna variable analizada. En el segundo muestreo el comportamiento fue similar al cuarto ciclo. En el tercer muestreo se encontraron diferencias muy significativas en R1 ($p= 0,01$) y significativas en R2 ($p= 0,05$), solo para peso fresco.

Tabla 3.22: Efecto de los tratamientos con enmiendas en los dos ambientes de riego sobre el peso fresco (PF, g), el peso seco (PS, g) y porcentaje de materia seca (%MS) de lechuga en tres fechas de muestreo durante el **5º ciclo**.

Fecha	Trat.	Ambiente R1			Ambiente R2		
		PF	PS	%MS	PF	PS	%MS
26/02	T	1,82	0,16	8,64	1,85	0,16	8,68
	S	1,93	0,16	7,68	2,03	0,16	7,79
	Y	2,10	0,19	9,21	2,20	0,19	8,72
	DMS	1,67	0,15	2,54	1,00	0,09	3,09
	Sign.	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	43,46	45,95	15,14	24,95	26,05	18,63
10/03	T	21,05	1,31	6,89	22,63	1,33	6,72
	S	39,83	2,48	6,15	68,85	5,18	7,23
	Y	40,85	2,66	6,41	73,80	5,22	7,03
	DMS	27,24	1,93	2,35	43,69	3,43	2,56
	Sign.	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	*	*	<i>ns</i>
	CV	40,69	43,18	18,39	40,17	44,35	18,52
25/03	T	42,53	2,86	6,28	94,23	6,77	7,26
	S	133,28	8,07	6,11	145,20	7,86	5,48
	Y	139,63	7,92	5,91	162,15	9,02	5,75
	DMS	59,00	3,40	2,05	56,40	2,82	1,97
	Sign.	**	**	<i>ns</i>	*	<i>ns</i>	<i>ns</i>
	CV	28,42	27,42	17,06	21,44	18,09	16,15

Nota: **Trat:** tratamiento; **PF:** peso fresco en gramos; **PS:** peso seco en gramos; **%MS:** porcentaje de materia seca; **T:** testigo; **S:** azufre; **Y:** yeso; **DSM:** diferencia mínima significativa; **Sign.:** significancia y **CV:** coeficiente de variación

En las **Figura 3.7** se observan las curvas de crecimiento del 5º ciclo para el ambiente R1 y R2.

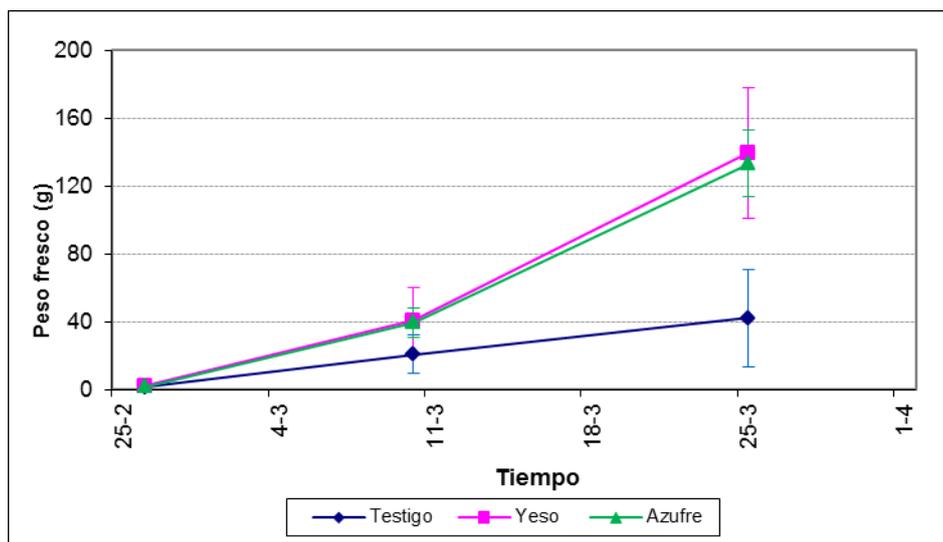


Figura 3.7.1: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el **5º ciclo**, en el ambiente **R1** para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

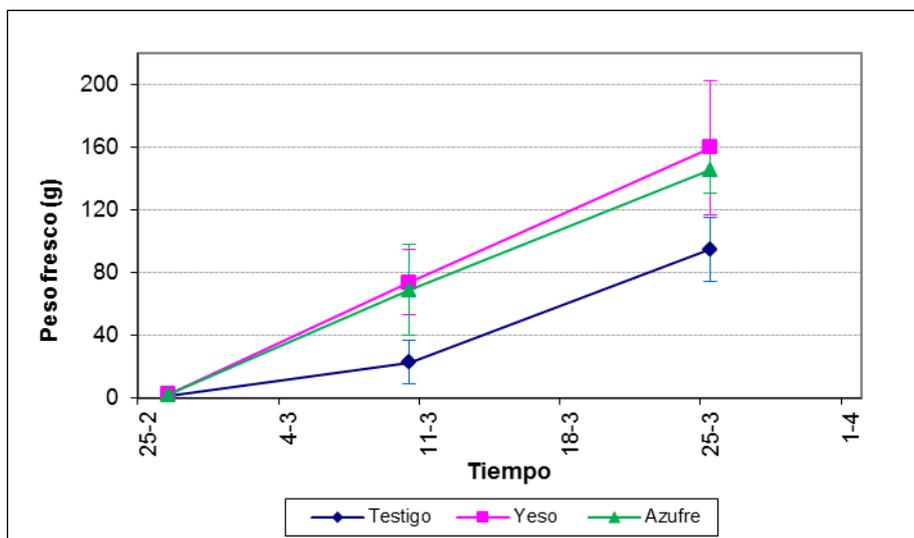


Figura 3.7.2: Curva de crecimiento del cultivo de lechuga en el **5º ciclo**, en el ambiente **R2** para los tres tratamientos con sus respectivos errores estándar.

Si hacemos un análisis general de los cinco ciclos, claramente se observa una tendencia marcada: los tratamientos de yeso y azufre en relación al testigo, favorecen indirectamente el rendimiento final del cultivo, evidenciándose principalmente en el peso fresco. La acción directa del agregado de enmiendas al suelo es mejorar las condiciones físicas y químicas del mismo, lo cual ya fue discutido anteriormente. Esa mejora en las condiciones edáficas, repercuten directamente en el crecimiento y desarrollo del cultivo,

por ende, los rendimientos alcanzados son superiores a los que se lograrían sin el uso de estas enmiendas. Los resultados obtenidos no clarifican del todo cuál de las dos enmiendas sería la mejor. Sí se observa, que en valores absolutos, en todos los ciclos, el tratamiento con yeso fue el que mayores rendimientos generó, sin ser éstos muy superiores a los obtenidos en el tratamiento con azufre.

3.4 Cálculo del k_c para lechuga bajo las condiciones del cultivo

Los valores de evaporación del Piché sobreestiman la demanda de agua del cultivo, sobre todo cuando las temperaturas ambientes son elevadas, lo que se observa en los valores bajos de k_c obtenidos para los meses de noviembre y diciembre (**Tabla 3.23**). Por lo tanto, el uso del evaporímetro no es recomendable a escala diaria pero si puede servir para estimar el agua consumida en el ciclo. Debería realizarse un ensayo donde se controle mejor el consumo diario de agua y correlacionarlo con las lecturas del evaporímetro Piché.

Tabla 3.23: Cálculo de los K_c de lechuga para cada ciclo de cultivo

Ciclo	Fecha inicio	Fecha cosecha	Días ciclo	T° m máx	HR	Amb.	dr mm	Dren mm	ΔSW mm	Ev Piché	ET _c	k_c
1	01/03/13	22/04/13	52	28,7	67,7	R1	41,2	10	22,5	111,4	53,7	0,48
						R2	52,6	20	28,1	111,4	60,7	0,55
2	07/05/13	09/08/13	94	24,9	65,2	R1	34,6	10	65,1	262,3	89,8	0,34
						R2	43,9	20	54,2	262,3	78,2	0,30
3	04/09/13	28/10/13	54	32,4	67,1	R1	34,6	10	21,2	180,2	45,8	0,25
						R2	44,6	20	34,3	180,2	59,0	0,33
4	12/11/13	30/12/13	48	46,1	59,6	R1	46,5	10	25,9	353,8	62,4	0,18
						R2	58,7	20	32,1	353,8	70,8	0,20
5	13/02/14	27/03/14	42	35,1	70,5	R1	49,5	10	24,9	184,1	64,4	0,35
						R2	62,5	20	32,3	184,1	74,9	0,41

Nota: **T° m máx**: temperatura media máxima en °C; **HR**: porcentaje de humedad relativa media; **Amb**: ambiente de riego; **dr mm**: lámina de riego en mm; **Dren mm**: drenaje estimado a partir de las disminuciones de CE a lo largo del ciclo; **ΔSW mm**: disminuciones de humedad en el suelo entre riegos en mm; **Ev. Piché**: evaporación medida con el evaporímetro Piché en mm; **ET_c**: evapotranspiración calculada en mm $ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW$ donde R: riego, P: precipitación, ES: escurrimiento, D: drenaje, C: ascenso capilar, ΔFS : flujo subsuperficial hacia dentro o hacia fuera, ΔSW : variación del contenido de humedad del suelo. Se considera P, ES, C y DFS igual a 0; k_c coeficiente del evaporímetro Piché promedio para todo el ciclo.

4. CONCLUSIONES

Con respecto a la primera hipótesis planteada “**El agregado de yeso o de azufre mejorarán la infiltración del agua y la conductividad hidráulica**”, se acepta dicha hipótesis y se concluye lo siguiente:

Regar con agua de elevado valor de RAS, provoca un aumento en la concentración de sodio en el suelo con la consiguiente pérdida de permeabilidad del mismo, reflejado esto, con la disminución de la infiltración al final de los cinco ciclos de cultivo de lechuga.

En el testigo, la infiltración acumulada final es menor a la infiltración acumulada inicial. En el caso de los tratamientos yeso y azufre también hay disminución de la infiltración, pero no tan marcada como en el testigo.

Existe un efecto positivo de ambas enmiendas sobre la infiltración, sin poder precisar cuál de las dos es la más adecuada para mantener la permeabilidad del suelo, aun cuando este se riegue con aguas bicarbonatadas sódicas.

La conductividad hidráulica final del suelo disminuyó después de un año de cultivo en invernadero, debido al aumento concentración de sodio, siendo mayor (o más marcada) en el testigo que en los tratamientos con yeso y azufre.

La disminución de la conductividad hidráulica en todos los casos es mayor en el testigo que en los tratamientos de yeso y azufre.

El uso de yeso como enmienda causa una menor disminución de la conductividad hidráulica en el suelo, aunque no se evidencia tan claramente su diferencia con el azufre.

Con respecto a la segunda hipótesis planteada “**El agregado de yeso o de azufre contrarrestará el efecto dispersante del uso de aguas sódicas en cultivos continuos en invernáculos**” se acepta dicha hipótesis y se concluye lo siguiente:

La dispersión de un suelo está directamente relacionada al contenido de sodio del mismo.

El agregado de enmiendas inorgánicas reduce sustancialmente el aumento del PSI (porcentaje de sodio intercambiable) en el suelo. Para la reducción del PSI, el azufre tuvo mejor efecto que el yeso.

El contenido de sodio en las parcelas testigo va aumentando a lo largo de los cinco ciclos del cultivo, siendo superior ese incremento que en las parcelas donde se incorporó yeso o azufre. No queda claro en este ensayo con que enmienda (yeso o azufre) se logran menores contenidos de sodio en el suelo. Aunque sin lugar a dudas, al regar con aguas bicarbonatadas sódicas, si no se incorpora alguna enmienda que atenué su efecto, el contenido de sodio en el suelo se acrecienta a lo largo del tiempo.

Con respecto a la tercera hipótesis planteada **“En suelos modificados o tratados con enmiendas químicas es necesario aplicar láminas de riego más altas para asegurar la eliminación del sodio por lixiviación”**, se rechaza dicha hipótesis en relación a los datos obtenidos y se concluye lo siguiente:

En este caso, no fue suficiente la lámina de lavado para eliminar el sodio del perfil del suelo, aunque se considera que aplicando más lámina de lavado se lograría disminuir el contenido de sodio en el suelo.

Con respecto a la cuarta hipótesis planteada **“La modificación de las condiciones del suelo por efecto combinado de enmiendas y riego permite mejorar el rendimiento y la calidad de lechuga bajo invernadero”**, se acepta la hipótesis y se concluye lo siguiente:

En invernadero, el riego continuado con agua de mala calidad (bicarbonatada sódica) produce una disminución en los rendimientos del cultivo de lechuga a lo largo del tiempo.

En todos los casos, en el tratamiento con yeso se observan los mayores rendimientos, aunque en algunos ciclos como en el tercero sin diferencia estadística significativa con el testigo.

En ningún ciclo ni en ningún ambiente de riego, se observa diferencias significativas sobre el rendimiento entre el yeso y el azufre.

Las parcelas tratadas con azufre siempre rindieron más que las testigos pero menos que las tratadas con yeso.

El efecto del agregado de enmiendas al suelo es positivo en relación al tamaño de las plantas cosechadas, siendo éstas de mayor peso fresco que las cosechadas en las parcelas testigo.

Otras conclusiones:

La conductividad eléctrica del suelo aumenta con el agregado de enmiendas inorgánicas como el yeso y el azufre, siendo menor ese incremento cuando la lámina de riego aplicada es mayor.

El agregado de azufre al suelo determina un descenso progresivo del pH del mismo. La incorporación de yeso ayuda a que el pH se mantenga medianamente constante a lo largo de los cinco ciclos de lechuga, siendo menor en todos los casos a las parcelas testigo. Sin el agregado de enmiendas, el pH alcanza valores muy alcalinos, los cuales condicionan el cultivo de lechuga en esos suelos.

El agregado de enmiendas inorgánicas no modifican las concentraciones de magnesio ni de potasio en el suelo.

En las parcelas tratadas con yeso, como era de esperarse, la concentración del catión calcio es mayor que en las no tratadas (testigo y azufre), siendo inferior en el ambiente R2 como consecuencia del lavado.

Es interesante comentar el hecho que en general el azufre tuvo un efecto más beneficioso que el yeso en cuanto a las variables físicas estudiadas, aunque no significativas desde el punto de vista estadístico, pero en cuanto a la respuesta del cultivo en general se vio que el yeso tuvo mejor resultado. Esto puede deberse a que el aporte de Ca del yeso tuvo un efecto positivo que mejoró el balance nutricional de la lechuga. Hay que tener en cuenta que tanto el suelo como el agua aportan pequeñas cantidades de este elemento por lo cual se puede sospechar que se encuentra cerca del nivel crítico necesario para la planta.

4.1 Perspectivas futuras

Es importante continuar evaluando la respuesta a la aplicación de enmiendas en el suelo de diferentes cultivos hortícolas bajo invernadero regados con agua de mala calidad. En este trabajo se evaluó el cultivo de lechuga, por ser este el más importante para los productores de la zona, aunque hay otros cultivos que actualmente están cobrando importancia relativa, como el tomate y el pimiento, entre otros. Las investigaciones futuras deberían continuar evaluando a lo largo del tiempo, como varían los parámetros físico-químicos del suelo, cuando este es regado sistemáticamente con agua de baja calidad,

teniendo en cuenta diferentes tipos de suelo. Asimismo, sería recomendable estandarizar la metodología para el muestreo del suelo: momento oportuno, profundidad de acuerdo al cultivo y tipo de suelo, métodos de laboratorio, etc.

En cuanto al agregado de enmiendas, también se debería sistematizar el tipo, la cantidad, el momento y la forma de aplicación, el efecto residual de las mismas en suelo, teniendo en cuenta el cultivo, el tipo de suelo y la calidad del agua de riego.

Los resultados expresados en esta tesis tienen su implicancia en la práctica, como quedó demostrado con los resultados obtenidos y posteriores conclusiones, aunque quedan limitados al cultivo de lechuga bajo invernadero.

Bibliografía

Alconada, M. & F. Minghinelli. 1998. Calidad de agua de riego según diferentes criterios: influencia sobre la salinización-alcalinización de suelos con cultivos protegidos en el gran La Plata. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 229-230.

Andreani, J.; Pecorari, C. & Ramuno, J. 1999. Evaluación de correctores químicos en el suelo. INTA – Proyecto de Intensificación de la producción de granos (IPG). Novedades en siembra directa, riego y fertilización. Serie Informe de avance N° 6. Pergamino, 15-17.

Andriolo, J.L.; da Luz, G.L.; Witter, M.H.; Godoi, R.; Barros, G.T. & Bortolotto, O.C. 2005. Crescimento e produtividade da alface em condições salinas. Horticultura Brasileira. Vol. 23 N°4.

Andriulo, A.; Galetto, M. L.; Ferreyra, C.; Cordone, G.; Sasal, C.; Abrego, F.; Galina, J. y Rimatori, F. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. I: Propiedades físico- Químicas. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Villa Carlos Paz, Mayo de 1998, 247-258.

Armstrong, A. S. B.; Rycroft, D. W. & Tanton, T.W. 1996. Seasonal movement of salts in naturally structured saline-sodic clay soils. Agric. Water Manag. 32:15-27.

Atloe, O.J. & Olson, R. A. 1966. Factor affecting rate of oxidation in soils of elemental sulfur and that added in rock, phosphate-sulfur fusion. Soil Science. 101: 317-325

Ausilio, A. & Colomar, P. L. 1998. Evaluación de la calidad del agua utilizada para riego en el cinturón hortícola de Rosario: distritos Pérez y Soldini. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 239-240.

Ayers, R. S. & Westcot, D. W. 1984. Calidad del agua para la agricultura. Estudio FAO. Riego y Drenaje. 29. Roma, 174p

Bajwa, M. S.; Hira, G. S. & Singh, N. T. 1983. Effect of sodium and bicarbonate irrigation waters on sodium accumulation and on maize and wheat yields in Northern India. Irrigation Science. Vol. 4. N° 3. 191-199

Balcaza, L. 2000. Importancia de la calidad del agua de riego en los cultivos bajo cubierta. Boletín electrónico, EEA INTA San Pedro.
http://www.inta.gov.ar/sanpedro/info/doc/hor/lb_001.htm

Balcaza, L. 2001. Aplicación de Yeso en suelos cultivados con hortalizas en invernaderos. Boletín Hortícola Año 9 N° 30.

Balcaza, L. 2003. Deterioro de los suelos cultivados bajo invernáculo. Idia XXI N° 4. Ediciones INTA.

Bernstein, L. 1974. Crop growth and salinity. In: Shilfgaard j. Van (ed) Drainage for agriculture. Agronomy 17:39-54.

Bohn, H. L.; McNeal, B.L. y O'Connor, G.A. 1993. Química del suelo. Ediciones Limusa. México, 370 p

Bower, C. A. & Wilcox, L. V. 1965. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29: 93-94.

Bremner, J.M. y Mulvaney C.S.. 1982. Nitrogen-Total. p. 595-624. In A.L. Page (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.

Bresler, E.; McNeal, B. L. & Carter, D. L. 1982. Saline and sodic soils: Principles-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag, Berlín Heidelberg New York. 236 pp.

Camacho Ferre F., 2004. Técnicas de producción en Cultivos Protegidos. Suelos y aguas utilizados en la horticultura intensiva. Tomo 1 y 2. Ed. Caja Rural Intermediterránea, Cajamar. Almería. 776 pp.

Chapman, S.J. 1990. *Thiobacillus* populations in some agricultural soils. Soil Biology. Biochem. 22:479-482.

Chorom, M. & Rengasamy, P. 1997. Carbonate chemistry, pH, and physical properties of an alkaline sodic soil as affected by various amendments. Australian Journal of Soil Research, Vol. 35, N° 1, 149-162.

Costa, J. L. 1996. Calidad de aguas para riego. En: "Curso de riego suplementario, Sistemas de aspersión". Unidad Integrada Balcarce (INTA- Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce). Tandil 27 de setiembre, 4 y 11 de octubre de 1996.

Costa, J. L. 1999. Calidad de aguas para riego en el sudeste bonaerense. INTA – Proyecto de Intensificación de la producción de granos. Novedades en siembra directa, riego y fertilización. Serie Informe de avance N° 6. Pergamino, 10-12.

Deng, S. & Dick. R.P. 1990. Sulfur oxidation and rhodanese activity in soils. Soil Sci. 150:552-560.

Dias, N.; de Sousa Neto, O.; Cosme, C. R.; Jales, A. O.; Rebouças, J.; & de Oliveira, A.M. 2011. Resposta de cultivares de alface à salinidade da solução nutritiva com rejeito salino em hidroponia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol.15 N°10.

Di Benedetto, A. 2005. Manejo de Cultivos Hortícolas: bases ecofisiológicas y tecnológicas. Cap.2. Orientación Gráfica Editora S.R.L. 384 p.

Eaton, M. F. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69: 123-133.

Fuentes Yagüe, J. L. 1995. Técnicas de riego. Ministerio de Agricultura. España, 45 p.

Gale, G, Koenig, R & Barnhill, J 2001, Managing soil pH in Utah, Utah State University, viewed 15 March 2008, <http://extension.usu.edu/files/publications/publication/AG-SO-07.pdf>.

Gardner, W. K., Fulton, M. C. & Flood R G. 1992. Reclamation of failed subsurface drainage system on unstable clay soil. Austr. J. Exp. Agric. 31:93-97.

Giai, S. B & Tullio, J.O. 2008. Características de los principales acuíferos de la provincia de La Pampa. Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 12: 51-68. Buenos Aires.

Hussain, N.; Hassan, G.; Arshhadullah, M. & Mujeeb, F. 2001. Evaluation of amendments for the improvement of physical properties of sodic soil', International Journal of Agriculture and Biology, Vol. 3, N° 3, 319-322.

Irurtia, C. B. & Peinemann, N. 1987. Ensayo de recuperación a campo de un suelo salino mediante el lavado y el uso de enmiendas. IDIA. N° 457 -462, 46 – 59.

Irurtia, C. B. & Mon, R. 1998. Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la región pampeana después de 5 años de riego suplementario. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Villa Carlos Paz, Mayo 1998: 241- 242.

Keren, R. & Shaimberg, I.1981. Effect of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. Soil Science Society American. J. 45:103-107.

Lazovich, M. R., Costa, J. L. & Godz, P. 1985. Efecto de enmiendas y lavado sobre el desplazamiento catiónico y producción de materia seca de un Natracuol, en invernáculo. Ciencia del suelo. Vol. 3. N° 1-2, 95-101.

Longo, A., Ferratto, J., Mondino, C. y Grasso, R. 2005. Incorporación de yeso y azufre en un suelo salino-sódico: su efecto sobre el rendimiento y calidad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo invernadero. Revista FAVE, Ciencias Agrarias Vol. 4. N° 1-2: 31-36.

López-Aguilar, R., Rodríguez-Quezada, G., Naranjo-Murillo, A., Beltrán-Morales, L, Troyo-Diéguez, E., Casanova-Cruz, A & Peralta-Patrón, O. 2012. Uso de yeso para una agricultura orgánica sustentable en zonas áridas y semiáridas. Interciencia ISSN 0378 1844, Vol 37. N°8. pp 594-601.

Maas, E. V. 1984. Crop tolerance. California. Agriculture. 38 (10): 20-21.

Magnífico, V. & Ferrari, I. 1987. L'acidificazione dei terreni calcarei: un mezzo per aumentare la disponibilità dei microelementi nelle culture orticole e floricole. Colture Protette Anno XVI N° 3.

Marouelli, W. A.; Pereira, W.; Silva, H. R.; Silva, Washington Luiz Carvalho y Souza, A. 1999. Resposta da abóbora híbrida tipo tetsukabuto a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1999, Pelotas. A Engenharia Agrícola, Tendências e Inovações. Pelotas: SBEA, Vol. 1.

Mater, A.; Osaman, O.; Sayegh, A. & Boyadgiev, T. 1990. Characteristics of Gypsiferous Soils, Food and Agriculture Organisation, Rome.

Mc George, W.T. 1939. Factors influencing the availability of native soil phosphate fertilizers in Arizona soils. Arizona Agricultural Exposition State Technology. Bul. 40.

Merriam, J.L. & Keller, J. 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management (p. 271). Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, UT

Miyamoto, S. 1998. Use of acids and acidulants on Alkali soils and water. 217-255. In A. Wallace and R.E. Terry (eds.) Handbook of soil conditioners substances that enhance the physical properties of soil. Part III. Mineral soil conditioners. Marcel Dekker, New York, USA.

Muguero, A.F. 2014. Rehabilitación de suelos con impedimentos físicos de uso hortícola degradados por riego con aguas bicarbonatadas sódicas. Tesis para optar por el grado académico de Magister en Cultivos Intensivos. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral.

Oliveira, F.; Carrilho, M.J.; Medeiros, J.F.; Maracajá, P. B. & de Oliveira, M.K.T. 2011. Desempenho de cultivares de alface submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol.15 Nº 8, 771-777.

Oster, J.D.1994. Irrigation with poor quality water. Agric. Water Manag. 25:271-297.

Peinemann, N.; Díaz Zorita, M.; Villamil, M. B.; Lusarreta, H. y Grunewald, D. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Villa Carlos Paz, mayo de 1998, 7-8.

Pilatti, M A; De Orellana, J; Del Carmen Imhoff, S & Pires Da Silva, A. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. Ciencia del suelo [online]. vol. 30, Nº1, pp. 09-21. ISSN 1850-2067.

Pizarro Cabello, F.1990. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. 2da edición. Madrid. Ediciones. Mundi-Prensa. 471 p.

Prieto, D. & Angueira, C. 1996. Calidad de agua para riego. Módulo II. Curso a distancia de "Métodos de riego". INTA-Procadis. Programa clima y agua. 94 p.

Qadir, M.; Noble, A.D.; Schubert, S.; Thomas, R. J. & Arslan, A. 2006. Sodicy-induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects Land Degradation & Development, Vol. 17, Nº 6, 661-676.

Quinteros, C.; Boschetti, N.; Durand Morat, A. & Fettolini, S. 2000. Recuperación de suelos dispersivos por medio de enmiendas.

<http://www.fertilizando.com/articulos/recuperación%20de%20suelos>.

Quiroga, A. & Frassier, I. 2009. Posibles implicancias del cambio climático sobre los suelos y los sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana. Jornada sobre Cambio Climático y Producción Agropecuaria. Subsecretaría de Asuntos Agrarios, Ministerio de la Producción, Gobierno de La Pampa, INTA, EcoSur, Centro de Estudios Ambientales. 27 Marzo de 2009. Santa Rosa, La Pampa.

Rengasamy, P. & Olsson, K. A. 1991. Sodicy and Soil Structure. Australian Journal Soil Research 29:25-32.

Richards, L. A. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura Nº 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 171 pp.

Rubinsky De Lis, B. 1962. Estudio Experimental sobre mejoramiento de suelos salino-alcalinos realizado en laboratorio e invernáculo. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo. Tomo IX, Nº 2, 41-54.

Sainato, C. M.; Galindo, G. & Heredia, O. 2006. Agua Subterránea. Exploración y utilización agropecuaria. Ed. Facultad de Agronomía UBA. 115 p.

Salas, H. P. & Lovera, E. F. 1998. Efecto del riego suplementario sobre algunas características del suelo. INTA, EEA - Manfredi. Proyecto IPG, 9 p.

Sierra, C., Lancelloti, M. y Vidal, P. 2007. Azufre Elemental como Corrector del pH y la Fertilidad de Algunos Suelos de la III y IV Región de Chile. Agricultura Técnica (Chile) 67(2):173-181

Suárez, D.L. 1981. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:469-475.

Tejera N.A., Soussi M & Lluch C. 2006. Physiological and nutritional indicators of Tolerance to salinity in chickpea plants growing under symbiotic conditions, Environ. Exp. Bot. 58: 17–24).

Thicoipe JP. 1997. Laitues. Ctifl. Francia. 281 p.

USDA U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agric. Handb. 60. U. S. Gov. Print. Office, Washington DC.

USDA. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Handbook 60. Ed. L.A. Richard. Versión española 1962. México.

Valerdi, M. 2007. Encuesta Hortícola Provincial 2007. Dirección de Producciones Alternativas. Secretaría Ejecutiva del Instituto de Promoción Productiva. Ministerio de la Producción. Gobierno de La Pampa. 9 p.

Wainstein, P. 1969. Clasificación de las aguas de riego de Mendoza. Informe científico técnico N° 15. Mendoza. Instituto de Suelos y Riego. Facultad de Ciencia Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo.

Wilcox, L. V.; Blair G. Y. & Bower C.A. 1953. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Sci. 77: 259-266.

Zérega, L. & Adams, M.1991. Efectos de la cachaza y el azufre sobre un suelo salino-sódico del estado de Carabobo bajo condiciones de invernadero. Caña de azúcar, Vol. 9 N° 2, 110-126.

Zhilong Bie, Tadashi Ito Shinohara and Yutaka. 2004. Effects of sodium sulfate and sodium bicarbonate on growth, gas exchange and mineral composition of lettuce *Scientia Horticulturae*, 99: 215-224

