

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO Y MANEJO EN LAVADO DE
SUELOS SALINOS MEDIANTE SOFTWARE HYDRUS 2D

WLADIMIR STEFANO MÉNDEZ JELVES

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN – CHILE

2025

**EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO Y MANEJO EN LAVADO DE
SUELOS SALINOS MEDIANTE SOFTWARE HYDRUS 2D**

Aprobado por:

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Guía

Eduardo A. Holzapfel Hoces
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Emérito

Profesor Co-Guía

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

José Luis Arumí
Ingeniero Civil, Ph.D.
Profesor Titular

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Ph. D.
Profesora Asociado

Decana

DEDICATORIA

Quisiera dedicar este trabajo y todos estos años de carrera a mis padres, Luis Osvaldo Méndez Jeldres y Marcia Inés Jelves Castro. Si bien me cuesta expresarme con ellos, y demostrarles mi amor, quisiera decirles a través de este trabajo que ellos son mi vida y que los amo profundamente. Gracias por todo lo que han hecho por mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Dios, estoy convencido que ha sido quien me ha brindado todas las oportunidades.

Agradecer también al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), ya que fui becado al realizar este trabajo por el proyecto ANID/FONDAP/1523A0001.

Doy mis agradecimientos a todas aquellas personas que estuvieron conmigo, principalmente a mis padres por todo el apoyo incondicional; a mis amigos y compañeros, por todas las alegrías, las risas, las penas y los buenos momentos que tuvimos en esta maravillosa etapa universitaria; a mi profesor guía José Luis Arumí, por ayudarme y guiarme para realizar este trabajo.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
2.1.Objetivo general.....	5
2.2.Objetivos específicos.....	5
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	6
3.1.Suelos salinos.....	6
3.2.Lavado de sales.....	7
3.3.Sistemas de riego.....	8
3.4.Software HYDRUS 2D.....	9
4. METODOLOGÍA.....	12
4.1. Ubicación y características del suelo.....	12
4.2. Descripción de la modelación en HYDRUS 2D.....	13
4.2.1. Geometría.....	15
4.2.2. Distribución radicular.....	16
4.2.3. Condiciones iniciales.....	17
4.3. Configuración de los sistemas de riego.....	20
4.4. Criterios de evaluación.....	21
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
5.1. Comparación frecuencias de riego.....	22
5.2. Comparación métodos de lavado en goteo.....	25
5.3. Comparación entre goteo y microjet.....	29
5.4. Comparación de lavado entre goteo y microjet.....	33
5.5. Recomendaciones de buenas prácticas.....	35
5.5.1. Frecuencia de riego y su impacto en la lixiviación.....	35
5.5.2. Métodos de lavado: Lavado profundo vs. Distribuido.....	36
5.5.3. Manejo de la tasa de aplicación: Goteo vs. Microjet.....	36

6. CONCLUSIONES	37
7. BIBLIOGRAFÍA	39
8. ANEXO Y APÉNDICES	42

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto		Página
Tabla 1.	Clasificación de suelos salinos según sus características.	7
Tabla 2.	Columna representativa de cada estrato de suelo.....	12
Tabla 3.	Parámetros del suelo para cada estrato, utilizando los modelos de van Genutchten.....	12
Tabla 4.	Evapotranspiración promedio mensual de los meses utilizados para la modelación.....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Tipos de suelos según valores de CE y PSI.....	7
Figura 2.	a) Modelo geométrico para goteo, b) Modelo geométrico para microjet, c) Condiciones de borde del flujo de agua, d) Condiciones de borde del transporte de solutos.....	16
Figura 3.	Dominio de extracción radicular en paltos.....	17
Figura 4.	Representación gráfica del contenido de humedad inicial del perfil de suelo.....	18
Figura 5.	Contenido de humedad inicial en función de la profundidad.....	18
Figura 6.	Representación gráfica de la concentración de sales inicial en el perfil de suelo.....	19
Figura 7.	Concentración inicial en función de la profundidad.....	19
Figura 8.	Redistribución de sales en riego por goteo para diferentes frecuencias de riego.....	22
Figura 9.	Concentración de sales en función de la profundidad para distintas frecuencias de riego.....	23
Figura 10.	Redistribución de sales en riego por goteo con una frecuencia de riego de 3 días, con diferentes técnicas de lavado.....	26
Figura 11.	Concentración de sales en función de la profundidad con diferentes técnicas de lavado.....	27
Figura 12.	Redistribución de sales en riego por goteo y microjet con una frecuencia de riego de 3 días, sin lámina extra de lavado.....	29
Figura 13.	Concentración de sales en función de la profundidad en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días, sin lámina extra de lavado.....	30

- Figura 14. Redistribución de sales en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días y con lavado profundo una vez al mes..... 33
- Figura 15. Concentración de en función de la profundidad en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días y con lavado profundo una vez al mes..... 34

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Ecuación de Richards.....	10
Ecuación 2. Contenido de humedad en función del potencial mátrico (h) (van Genuchten, 1989).....	10
Ecuación 3. Conductividad hidráulica insaturada (k) en función del potencial mátrico (h) (van Genuchten, 1980).....	11
Ecuación 4. Ecuación de dispersión por convección (CDE).....	11

EVALUACIÓN DE CRITERIOS DE DISEÑO Y MANEJO EN LAVADO DE SUELOS SALINOS MEDIANTE SOFTWARE HYDRUS 2D

EVALUATION OF DESIGN AND MANAGEMENT CRITERIA IN WASHING SALINE SOILS USING HYDRUS 2D SOFTWARE

Palabras claves: Salinidad, lixiviación, goteo, microjet, modelación.

RESUMEN

El lavado de sales es el principal método para enfrentar el problema de la salinidad, producto de la mega sequía que enfrenta Chile. El objetivo de este trabajo es evaluar criterios de diseño y manejo de microriego, para recomendar buenas prácticas de lavado de suelos salinos. Para ello se utilizó el software HYDRUS 2D, que permite simular el movimiento de agua y nutrientes en un suelo. Se hicieron diferentes simulaciones para comparar criterios de frecuencia de riego (FR) y tasa de aplicación (TA), y el manejo de agua durante el proceso. Los resultados mostraron que la FR no es un criterio decisivo, por otra parte, aplicar una lámina extra de agua en cada riego mostró mejores resultados para lavar un suelo salino. Mientras que la TA mostró diferencias para el manejo de sales, específicamente a mayor TA podría garantizar una distribución más uniforme de las sales, transportándolas así a mayores profundidades. El diseño adecuado del sistema de riego y la correcta gestión del agua de lixiviación son aspectos fundamentales para la sostenibilidad de la producción agrícola en suelos con problemas de salinidad.

EVALUATION OF BEHAVIORS OF RECOMMENDATIONS FOR WASHING SALINE SOILS USING A HYDRUS 2D SOFTWARE

Keywords: Salinity, leaching, drip, microjet, modeling.

ABSTRACT

Leaching of salts is the primary method to address soil salinity, a problem exacerbated by the prolonged megadrought affecting Chile. The objective of this study is to evaluate design and management criteria for micro-irrigation systems to recommend best practices for leaching saline soils. For this purpose, the HYDRUS 2D software was used to simulate the movement of water and solutes in the soil. Several simulations were performed to compare criteria such as irrigation frequency (IF) and application rate (AR), as well as water management strategies during the leaching process. The results showed that irrigation frequency is not a decisive factor. On the other hand, applying an additional water depth during each irrigation event yielded better outcomes for salt leaching. Moreover, the application rate showed differences in salt management: specifically, higher AR values could ensure a more uniform distribution of salts, thus transporting them to greater depths. Proper irrigation system design and effective management of leaching water are essential for the sustainability of agricultural production in saline-affected soils.

1. INTRODUCCIÓN

En el planeta hay aproximadamente 833 millones de hectáreas de suelo afectados por la salinidad, según el mapa mundial de los suelos afectados por la salinidad (FAO, 2021). La mayoría de estos suelos corresponden a entornos áridos o semiáridos, debido a la escasez de lluvias que lixivian las sales presentes en los suelos.

La mega sequía que enfrentó Chile ha permitido la desertificación del territorio nacional y por consecuencia, el aumento de salinidad en nuestros suelos y recursos hídricos. Los datos muestran que las precipitaciones han estado por debajo del promedio histórico durante los últimos catorce años (José Barraza, 2023). La Dirección Meteorológica de Chile, proyecta que entre el 2030 y 2059 las precipitaciones continuarán en disminución (Portal Agro Chile, 2022).

En Chile, la sequía y por consecuencia la salinidad, han sido un desafío importante para la fruticultura, especialmente para la industria de la palta. De tener 36 mil hectáreas aproximadamente de plantación, hoy quedan cerca de 20 mil hectáreas. Entre los años 2005 y 2012, Chile fue el segundo productor mundial de paltas después de México. Y hoy estamos muy por debajo de países como Colombia y Perú (ViLab, 2023).

Una de las maneras más efectivas para remover las sales, es realizando un lavado del suelo con agua de buena calidad. Las sales que afectan a los cultivos pueden ser lixiviadas aplicando más agua de la que el cultivo requiere.

La idea es que el exceso de agua mueva las sales fuera de la zona radicular, reduciendo así las concentraciones de sales (Antunez et al., 2011).

Hoy en día, existen diversos softwares para simular flujo en suelos no saturados, estos permiten simular el movimiento de un fluido en un perfil de suelo. Una de estas herramientas es el software HYDRUS 2D, que permite simular el flujo del agua, calor y diversos solutos en medios porosos variables (Simunek et al., 1999).

El uso del software HYDRUS 2D ofrece una gran ventaja en la simulación precisa del flujo de agua y solutos en el suelo, lo que permite analizar y estudiar el diseño y manejo de sistemas de riego y drenaje. Su capacidad para modelar condiciones reales en dos dimensiones, incluyendo variaciones en textura, pendiente y humedad, ayuda a tomar decisiones fundamentadas sin necesidad de ensayos extensivos en campo.

En este trabajo se llevó a cabo una simulación del proceso de lavado de un suelo salino utilizando el software HYDRUS 2D, con el objetivo de evaluar los efectos de diferentes criterios de diseño y manejo en sistemas de riego por microjet y goteo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar criterios de diseño y manejo en riego por microjet y goteo en el lavado de sales en suelos mediante simulaciones con el software HYDRUS 2D.

2.2. Objetivos específicos

- ~ Analizar el movimiento y distribución de sales en el perfil de suelo bajo riego por microjet y goteo utilizando HYDRUS 2D.
- ~ Comparar la eficiencia del lavado de sales en suelos entre los sistemas de riego por microjet y goteo, evaluando el impacto de la frecuencia de riego y la tasa de aplicación sobre la lixiviación.
- ~ Desarrollar recomendaciones para el diseño y manejo de agua para implementar buenas prácticas para el lavado de sales en el suelo.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Suelos salinos

Cuando se habla de salinidad, se pueden encontrar tres tipos de suelos salinos: suelos salinos, suelos sódicos, y suelos salinos-sódicos.

Los suelos salinos son aquellos que tienen grandes cantidades de sales. Las sales más comunes incluyen sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+} ; también existen otras sales presentes en cantidades menores, como el potasio (K^+), cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}).

Por otro lado, los suelos sódicos son aquellos que contienen altos niveles de sodio (Na^+) que pueden descomponer los agregados del suelo. Estos facilitan el desarrollo de costras superficiales que dificultan la germinación y emergencia de plántulas.

Es muy común encontrar la combinación de los dos tipos de suelos anteriores, donde la salinidad está presente en conjunto con la sodicidad. A este tercer tipo de suelo salino se les denomina suelos salinos-sódicos. A continuación, en la Tabla 1, se muestra la clasificación de suelos salinos según su Conductividad Eléctrica (CE) y su Relación de Adsorción de Sodio (RAS), posteriormente, en la Figura 1 se muestra un diagrama de clasificación de suelos según su salinidad y sodicidad.

Tabla 1. Clasificación de suelos salinos según sus características. CE es la conductividad eléctrica, RAS es relación de absorción de sodio.

Clasificación	CE (dS/m)	RAS (%)	pH
Salino	>4	<13	<8.5
Sódico	<4	>13	>8.5
Salino-Sódico	>4	>13	<8.5

Fuente: Dereke, 2011.

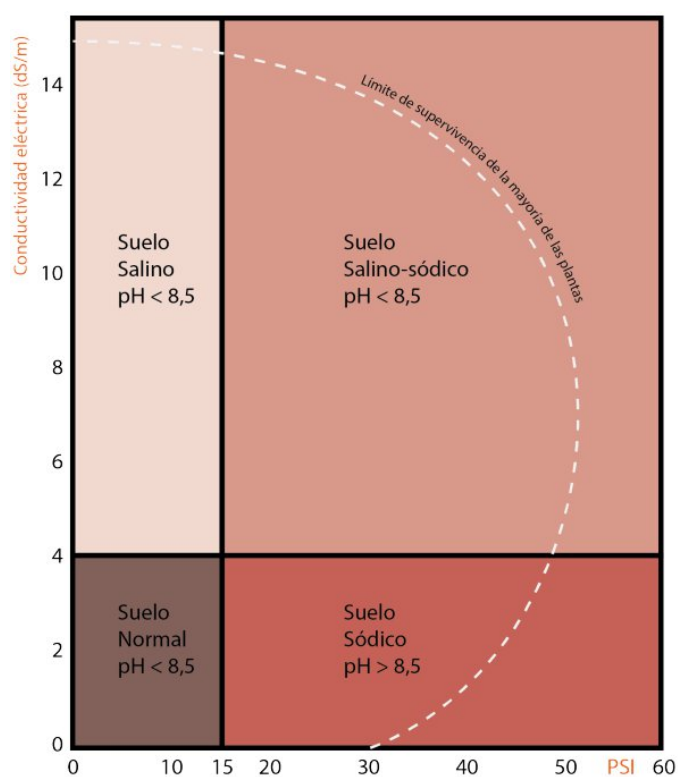


Figura 1. Tipos de suelos según valores de CE y PSI. Fuente: Gerónimo Courel, 2019.

3.2. Lavado de sales

El lavado de sales es un proceso que consiste en añadir un volumen tal que sea mayor a la demanda del cultivo y que permita mover las sales por debajo de la zona de extracción radical.

Para que esto sea efectivo, es fundamental que el suelo tenga un buen drenaje, lo que facilitará la percolación del agua y la lixiviación de las sales.

Para mantener la salinidad del suelo en niveles bajos, se debe aplicar en cada riego, o en algunos de ellos, un volumen de agua mayor al consumido por evapotranspiración. A este procedimiento se le conoce como "fracción de lavado". Esta técnica permite conservar un contenido salino reducido en la zona del bulbo húmedo (Sierra et al., 1999).

3.3. Sistemas de riego

El riego por goteo o microaspersión se puede definir como la aplicación de agua aplicada al suelo en la zona de extracción radical a través de una red de tuberías y dispositivos llamados "emisores", los cuales se distribuyen a lo largo del sistema de riego.

Desde una perspectiva ingenieril, el diseño de estos sistemas tiene como principal objetivo mantener un volumen adecuado de la zona radicular con una humedad cercana a la capacidad de campo. La distribución y nivel de humedad del suelo deben ajustarse de manera que la relación entre agua, suelo y planta optimice el uso del recurso hídrico.

En un sistema bien instalado, las pérdidas por conducción son inexistentes, ya que el agua se transporta mediante tuberías. Además, la evaporación desde el suelo puede variar entre un 10 y 30% dependiendo del manejo del sistema (Souto et al., 2019). Por otro lado, la percolación profunda es reducida, aunque en ciertas condiciones puede ser necesaria para el lavado de sales.

En general, el riego localizado ha demostrado mejorar la producción y la calidad de los cultivos. Esto se debe a que permite suministrar el agua con mayor precisión, ajustando los niveles hídricos en cada etapa de desarrollo del cultivo para alcanzar los objetivos de calidad y rendimiento, algo que resulta más difícil de lograr con otros sistemas de riego (Holzapfel H., 2000).

3.4. Software HYDRUS 2D

HYDRUS 2D es un software que utiliza modelos matemáticos y físicos, que nos permite simular el movimiento de agua, calor, y diversos solutos en medios porosos variables. Este software resuelve con métodos numéricos la ecuación de Richards (Ecuación 1) que describe el flujo de agua en medio no saturado y las ecuaciones de dispersión de advección basadas en Fickian para el transporte de calor y soluto. El software está respaldado por una interfaz gráfica interactiva para el preprocesamiento de datos, la discretización del perfil del suelo y la presentación gráfica de los resultados (Simunek et al., 1999).

La Ecuación 1 se puede resolver numéricamente utilizando el método de elementos finitos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(h) \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Dónde:

θ = Contenido volumétrico de agua (cm^3/cm^3).

h = Potencial mátrico (cm).

$K(h)$ = Conductividad hidráulica insaturada del suelo (cm/día).

x = Coordenada horizontal (cm).

z = Coordenada vertical (cm).

$S(h)$ = es el término de absorción de agua de la raíz ($\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{día}$).

La relación entre θ y h se puede obtener usando la Ecuación 2 (van Genuchten, 1980).

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (-\alpha|h|^n)]^m} + \theta_r \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Dónde:

θ_s = Contenido volumétrico de agua saturada (cm^3/cm^3).

θ_r = Contenido volumétrico de agua residual (cm^3/cm^3).

α = Parámetro α en la función de retención de agua del suelo (L^{-1}).

n = Parámetro n en la función de retención de agua del suelo.

$$m = \left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

La conductividad hidráulica insaturada $k(h)$ se define como una función de h (Ecuación 3) de acuerdo a van Genuchten, (1980).

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Dónde:

K_s = Conductividad hidráulica de saturación (cm/día).

S_e = Saturación efectiva.

El movimiento de solutos es representado en el software por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (q_w C) \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Dónde:

C = Concentración de soluto (g/cm³).

θ = Contenido volumétrico de agua (cm³/cm³).

D = Coeficiente de dispersión (cm²/día).

q_w = Flujo de agua (cm/día).

4. METODOLOGÍA

4.1. Ubicación y características del suelo

En este proyecto se utilizaron datos del trabajo desarrollado por Orrego (2005) en una plantación de paltos ubicadas en el Valle de Peumo, Región de O'Higgins. Por ello, se consideró una plantación de paltos, variedad Hass, que está dispuesta en hileras sobre camellones.

Para la modelación se consideró que la columna representativa del suelo (Tabla 2) corresponde a franco-arenosa y que el nivel freático se encuentra a una profundidad de 3 m. En la Tabla 3, se muestran los parámetros utilizados por el modelo correspondientes a cada estrato.

Tabla 2. Columna representativa de cada estrato de suelo.

Estrato	Profundidad Estrato (cm)	Clasificación de suelo
1	0 - 90	Franco arenoso
2	90 - 300	Arenoso

Nota: Se consideró los primeros 60 cm como parte del camellón.

Tabla 3. Parámetros del suelo para cada estrata, utilizando los modelos de van Genutchten.

Estrato	Qr	Qs	Alpha	n	Ks
1	0,065	0,41	0,08	1,89	106
2	0,045	0,43	0,15	2,68	713

Donde: Q_r : contenido de humedad residual del suelo (L^3/L^3); Q_s : Contenido de humedad del suelo a saturación (L^3/L^3); α : parámetro en la función de retención de agua en el suelo (L^{-1}); n : parámetro en la función de retención de agua en el suelo; K_s : Conductividad hidráulica saturada (L/T).

Nota: Es importante señalar que la condición inicial de humedad en el suelo se estableció a capacidad de campo.

4.2. Descripción de la modelación en HYDRUS 2D

En este proyecto se analizaron y se compararon dos sistemas de riego: goteo y microjet. La modelación abarcó un período de 240 días, correspondiente a la temporada habitual de riego en la zona de Peumo, desde septiembre hasta abril.

Se hicieron cuatro comparaciones para evaluar la eficiencia de distintos criterios de diseño y manejo en riego por microjet y goteo al momento de lavar un suelo salino:

- a) Comparación de frecuencias de riego:
 - Primera simulación (goteo): frecuencia de riego cada 3 días.
 - Segunda simulación (goteo): riego diario.

Estas simulaciones permitieron medir el impacto de la frecuencia de riego en la acumulación de sales en el suelo.

- b) Comparación de métodos de lavado de sales:

- Tercera simulación (goteo): lavado profundo al final de cada mes, aumentando el tiempo de riego para aplicar una mayor lámina de agua.
- Cuarta simulación (goteo): aplicación de un mayor volumen de agua en cada riego, manteniendo la frecuencia de 3 días.

Ambas simulaciones mantuvieron la misma frecuencia de riego (cada 3 días) para evaluar la eficiencia de cada método en la lixiviación de sales.

- c) Comparación de distribución de sales goteo vs. microjet sin lámina de riego extra:
 - Primera simulación (goteo): frecuencia de riego cada 3 días.
 - Quinta simulación (microjet): frecuencia de riego cada 3 días.
- d) Comparación de métodos de distribución de sales goteo vs. microjet con lámina de riego extra.
 - Tercera simulación (goteo): lavado profundo al final de cada mes, aumentando el tiempo de riego para aplicar una mayor lámina de agua.
 - Sexta simulación (microjet): lavado profundo al final de cada mes, aumentando el tiempo de riego para aplicar una mayor lámina de agua.

Para garantizar una comparación equitativa, se utilizó la misma cantidad de agua total en todas las simulaciones:

- Simulaciones sin lavado profundo: aproximadamente 1850 mm (1850 litros por metro cuadrado).
- Simulaciones con lavado: aproximadamente 2238 mm.

Nota: Para estas simulaciones se consideró las precipitaciones igual a 0 mm.

Este enfoque permitió evaluar con precisión el impacto de la frecuencia de riego y los métodos de lavado en la acumulación de sales y la eficiencia del uso del agua en cada sistema.

4.2.1. Geometría

La geometría del modelo generado corresponde a un corte transversal del camellón que contuvo los dos estratos definidos en la Tabla 1. El dominio de la simulación fue dado por la distancia entre hileras, geometría de los camellones y la profundidad del nivel freático (3 m).

El sistema modelado reproduce la geometría de los camellones que corresponden a acumulaciones de suelo extraído desde los caminos que separan las hileras. El uso de camellones es una práctica común en los huertos de paltos y frutales en general, debido a que generan una mejor relación agua-aire en la zona radicular del árbol.

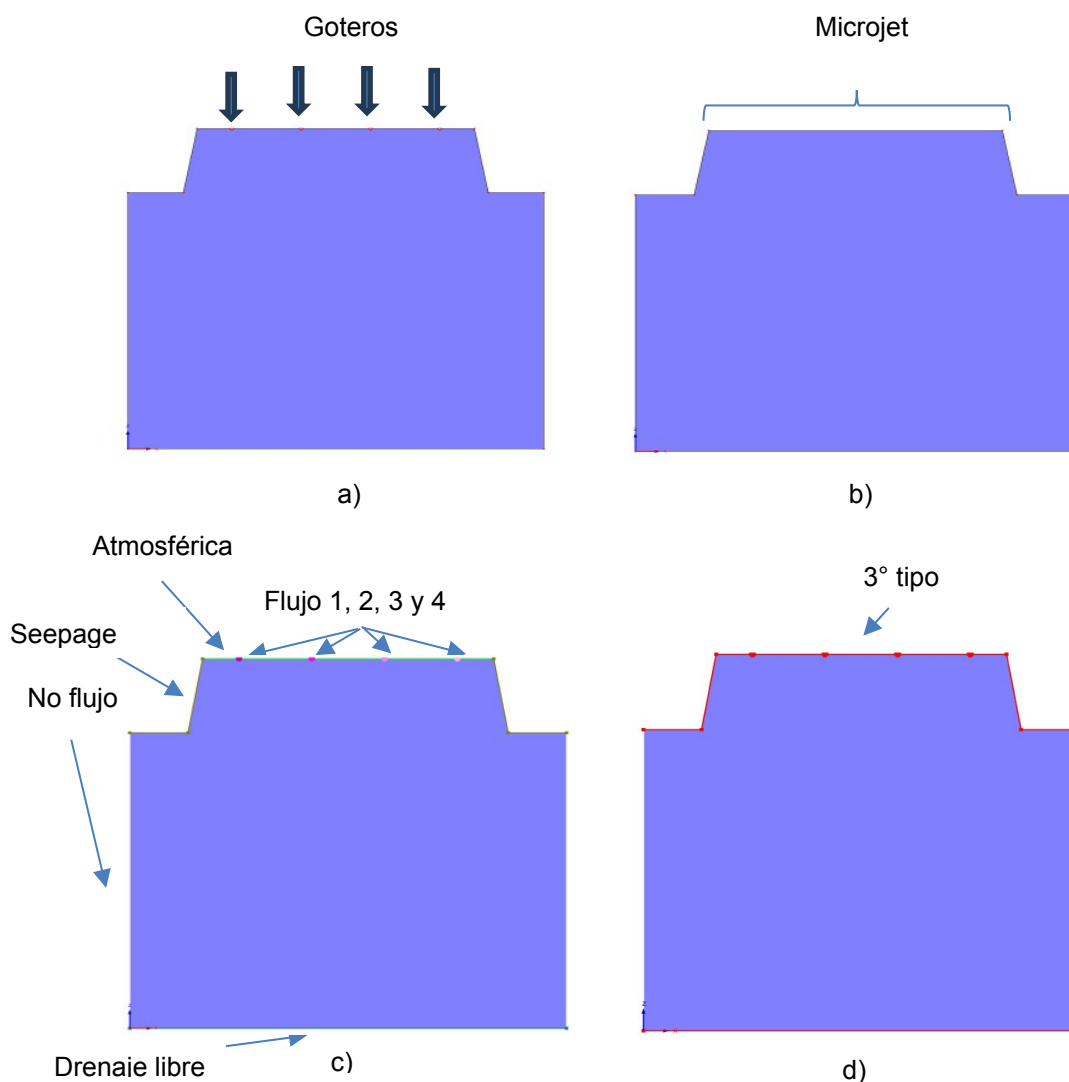


Figura 2. a) Modelo geométrico para goteo, b) Modelo geométrico para microjet, c) Condiciones de borde del flujo de agua, d) Condiciones de borde del transporte de solutos.

4.2.2. Distribución radicular

La distribución radicular de los paltos se definió usando el criterio propuesto por Michelakis et al. (1993) que señalan que en huertos de paltos regados por microaspersión un 72% de las raíces se concentran en los primeros 60 cm de

suelo y dentro de los 2 m en la línea de riego. Por lo tanto, se consideró que la zona radicular corresponde a todo el camellón como se puede apreciar en la Figura 3.

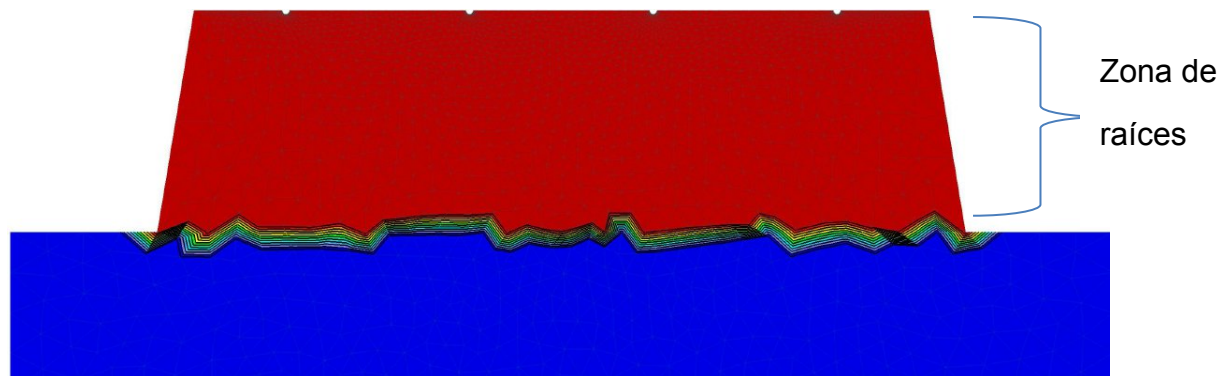


Figura 3. Dominio de extracción radicular en paltos.

4.2.3. Condiciones iniciales

Es fundamental asegurar que las condiciones iniciales se mantengan constantes en cada modelación para garantizar una evaluación precisa.

En cuanto al contenido de humedad en el perfil del suelo, en los primeros 60 cm del suelo (equivalente al camellón) se establecieron en capacidad de campo, lo que corresponde aproximadamente a un 14% de humedad volumétrica. A partir de esta profundidad, la humedad disminuye gradualmente, siguiendo el patrón representado en la Figura 4 y 5.

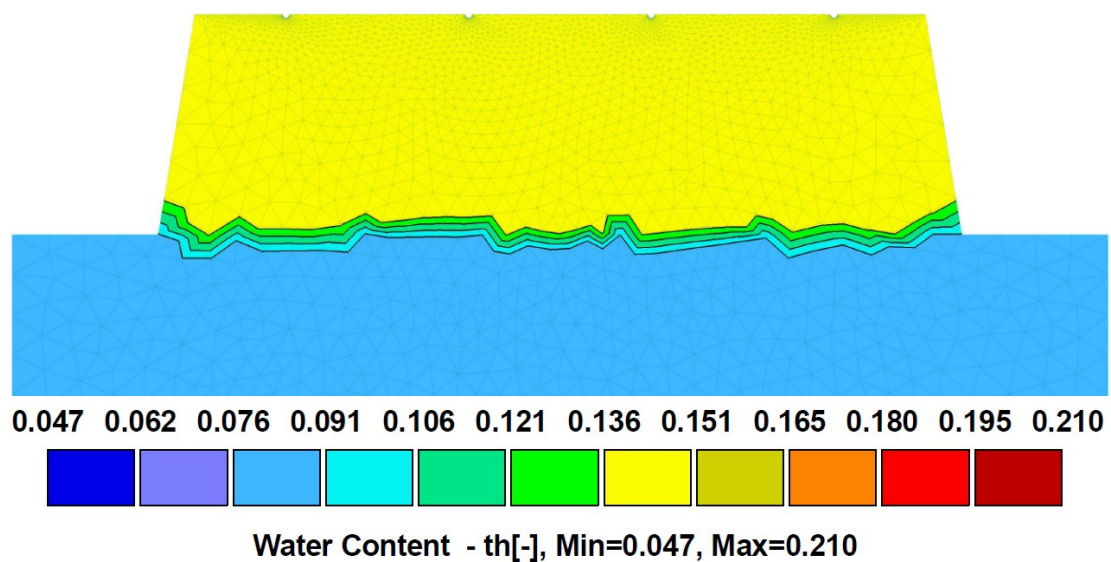


Figura 4. Representación gráfica del contenido de humedad inicial del perfil de suelo.

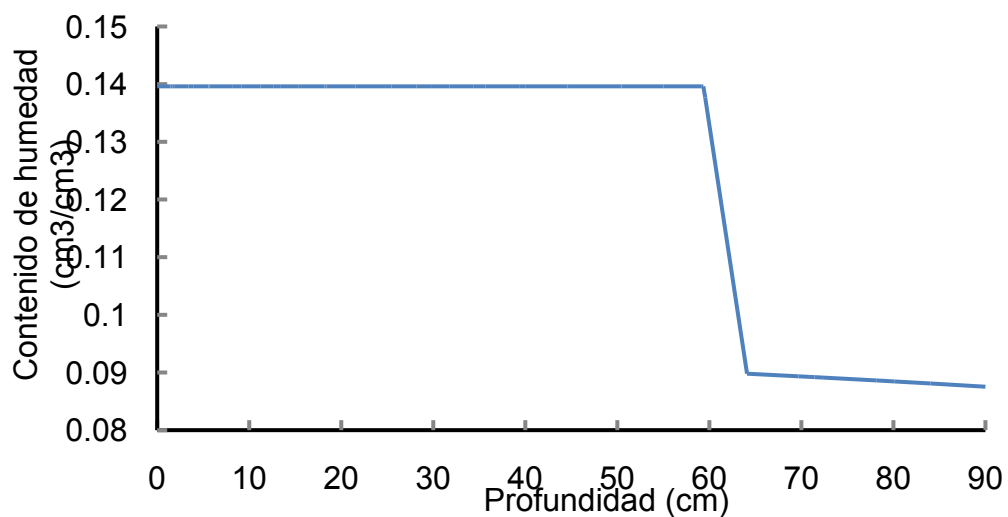


Figura 5. Contenido de humedad inicial en función de la profundidad.

Para la concentración de sales en el perfil de suelo, se estableció una concentración de suma de cationes de 0.022 cmol/cm^3 equivalente a 15

cmol/kg, que va disminuyendo gradualmente en el perfil de suelo, tal y como se muestra en la Figura 6 y 7.

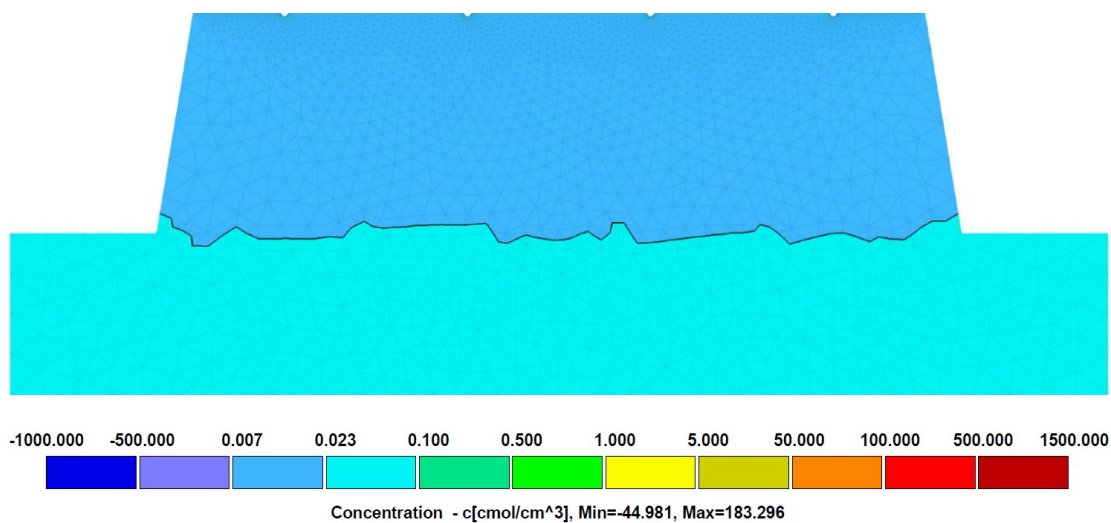


Figura 6. Representación gráfica de la concentración de sales inicial en el perfil de suelo.

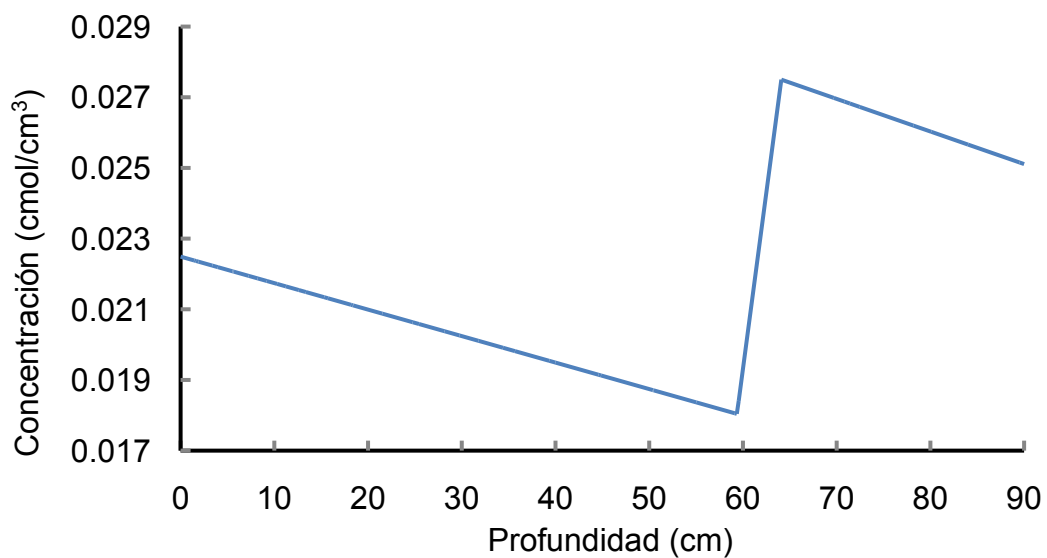


Figura 7. Concentración inicial en función de la profundidad.

4.3. Configuración de los sistemas de riego

Para este proyecto se modelaron dos sistemas de riego para la aplicación de agua. En el sistema de goteo, se simularon cuatro líneas de goteros con emisores de 1 L/h. En el caso del sistema de microjet, se simuló un emisor con un caudal de 60 L/h y un radio de cobertura de 100 cm; como se puede observar en la Figura 2. Para efectos de la modelación, se consideró una tasa de aplicación de 20 mm/h en los 2 m de ancho del camellón en el sistema de riego de microjet.

La frecuencia y duración del riego se determinó según la evapotranspiración del cultivo. Para la evapotranspiración se utilizaron los datos meteorológicos provistos de la estación meteorológica de la Cuenca 6019003 – Rio Cachapoal En Puente Arqueado. En la modelación se utilizó la evapotranspiración promedio diaria de los meses de septiembre hasta abril (Tabla 4).

Tabla 4. Evapotranspiración promedio diaria de los meses utilizados para la modelación.

Mes	ET (mm)
Septiembre	2,4
Octubre	3,2
Noviembre	4,4
Diciembre	5,0
Enero	5,1
Febrero	4,6
Marzo	3,6
Abril	2,4

4.4. Criterios de evaluación

Para la evaluación de la eficiencia de lavado de sales en suelos salinos, se analizaron los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas por el software. Debido a que los datos entregados por el modelo corresponden a gráficos e imágenes del perfil del suelo, se establecieron los siguientes criterios de evaluación:

I. Distribución de sales en el perfil de suelo

Se analizaron los gráficos de concentración de sales antes, durante y después del lavado con el fin determinar la redistribución de sales en el perfil de suelo bajo cada sistema de riego. Para ello se tuvo en cuenta las zonas de acumulación de sales y las diferencias entre microjet y goteo; se comparó la capacidad de cada sistema para remover las sales en la zona radicular.

II. Profundidad de lixiviación de sales

Se observó a través de los gráficos la variación de concentración de sales en función de la profundidad, teniendo en consideración:

- Reducción de sales en la zona radicular
- Diferencias en la eficiencia de lavado entre tratamientos

Estos criterios permitieron comparar los efectos del manejo de dos formas de lavado y la tasa de aplicación, así como el impacto de la frecuencia de riego en la lixiviación de sales en suelos salinos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Comparación frecuencias de riego

En las siguientes figuras (Figura 8 y 9) se muestran los resultados de esta primera comparación de dos frecuencias de riego (cada tres días y diaria) en la redistribución de sales en el perfil de suelo bajo un sistema de riego por goteo, sin la aplicación de láminas adicionales.

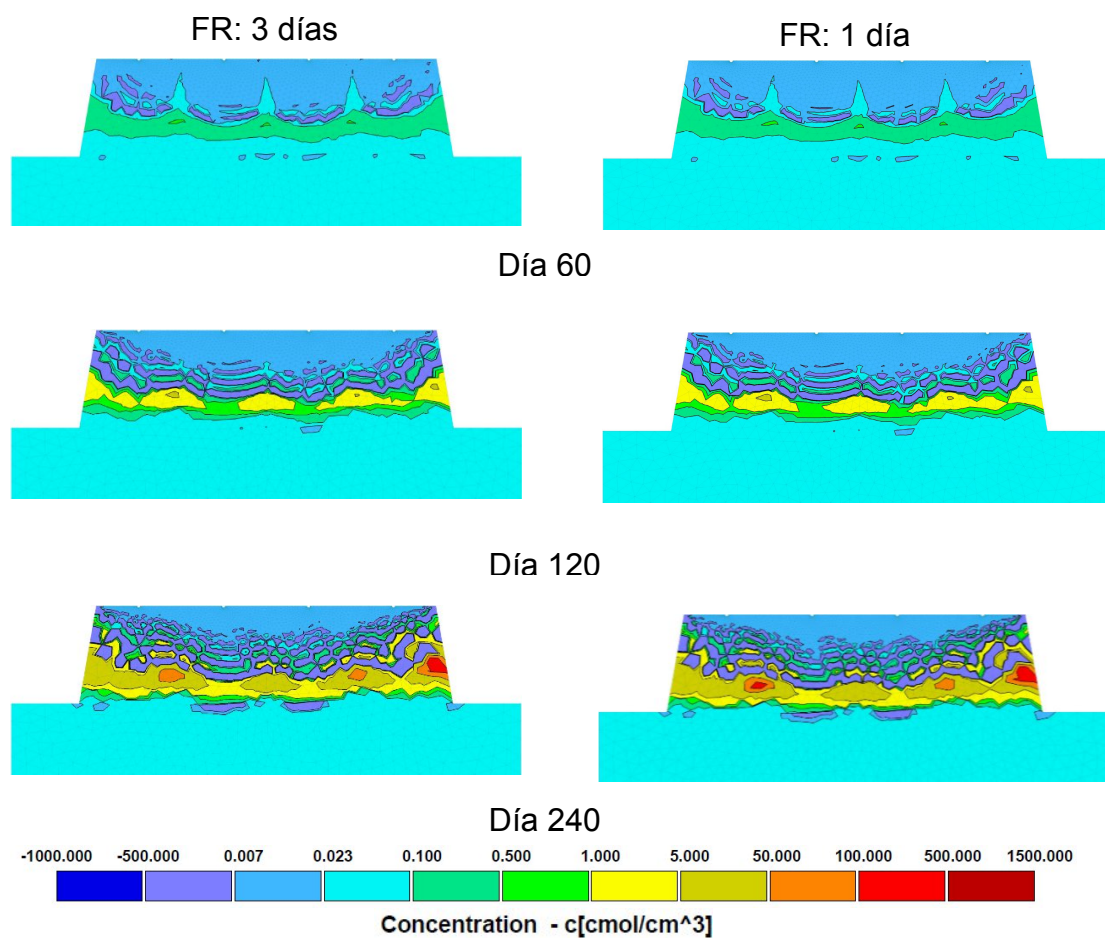


Figura 8. Redistribución de sales en riego por goteo para diferentes frecuencias de riego.

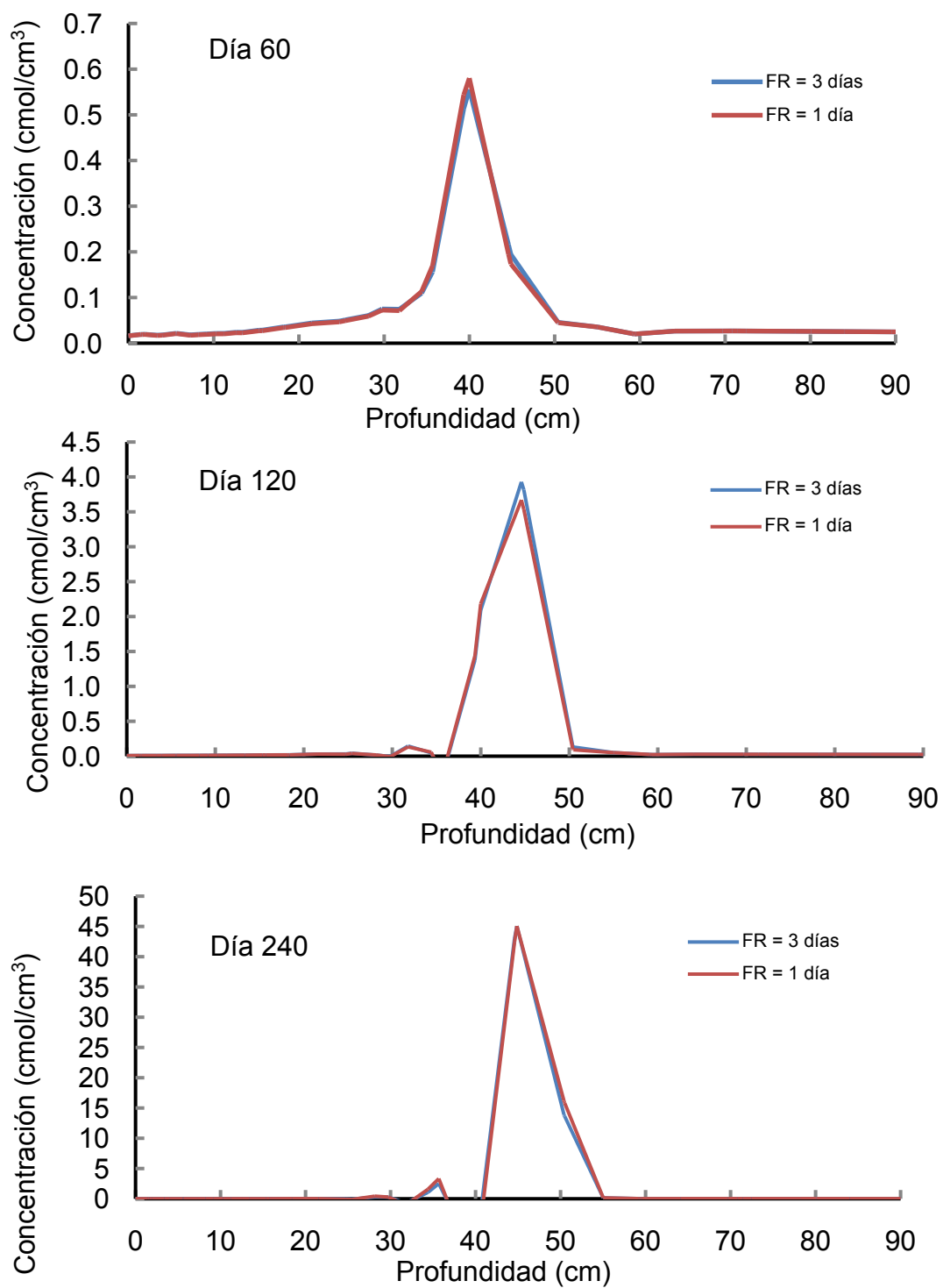


Figura 9. Concentración de sales en función de la profundidad para 2 frecuencias de riego (1 y 3 días).

Los resultados obtenidos indican que la frecuencia de riego no genera diferencias significativas en la lixiviación de sales en el suelo bajo riego por goteo. Tanto en la frecuencia de riego diaria como en la de cada tres días, la evolución de la concentración de sales sigue un patrón similar a lo largo del tiempo, sin cambios sustanciales en la ubicación de la capa de acumulación ni en la magnitud de la concentración máxima de sales.

En ambos tratamientos, al día 60 la acumulación de sales se encuentra en torno a los 40 cm de profundidad, con concentraciones de $0,55 \text{ cmol/cm}^3$ en la frecuencia de riego cada tres días y $0,57 \text{ cmol/cm}^3$ en la frecuencia de riego diaria, mostrando solo una diferencia marginal. Conforme avanza la modelación, la concentración de sales aumenta progresivamente en ambos casos, alcanzando valores de $3,5 \text{ cmol/cm}^3$ y $3,7 \text{ cmol/cm}^3$ al día 120, respectivamente. Al final del período de simulación, la concentración máxima de sales es idéntica en ambos tratamientos (45 cmol/cm^3 al día 240), con una distribución similar de sales entre los 40 y 55 cm de profundidad.

Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas y sin la aplicación de láminas adicionales de agua para lavado, la frecuencia de riego no tiene un impacto significativo en la acumulación o lixiviación de sales cuando se suministra únicamente el volumen de agua requerido por la planta. Esto podría deberse a que, en ambos tratamientos, el balance hídrico del suelo se mantiene relativamente estable, permitiendo que las sales sigan una dinámica de acumulación en profundidades similares a lo largo del tiempo.

Desde una perspectiva práctica, esto implica que ajustar la frecuencia de riego en sistemas de goteo no sería una estrategia efectiva para el manejo de la salinidad en el suelo si no se aplican volúmenes adicionales de agua para lavado. Este hallazgo coincide con estudios previos que indican que la lixiviación efectiva de sales en suelos salinos no depende de la frecuencia del riego (Álvarez et al., 2005).

5.2. Comparación métodos de lavado en goteo

En las siguientes figuras (Figura 10 y 11) se presentan los resultados de dos modelaciones, ambas con una frecuencia de riego de tres días. En la primera modelación se aplicó un lavado profundo una vez al mes, mientras que, en la segunda, se aumentó la duración de cada riego.

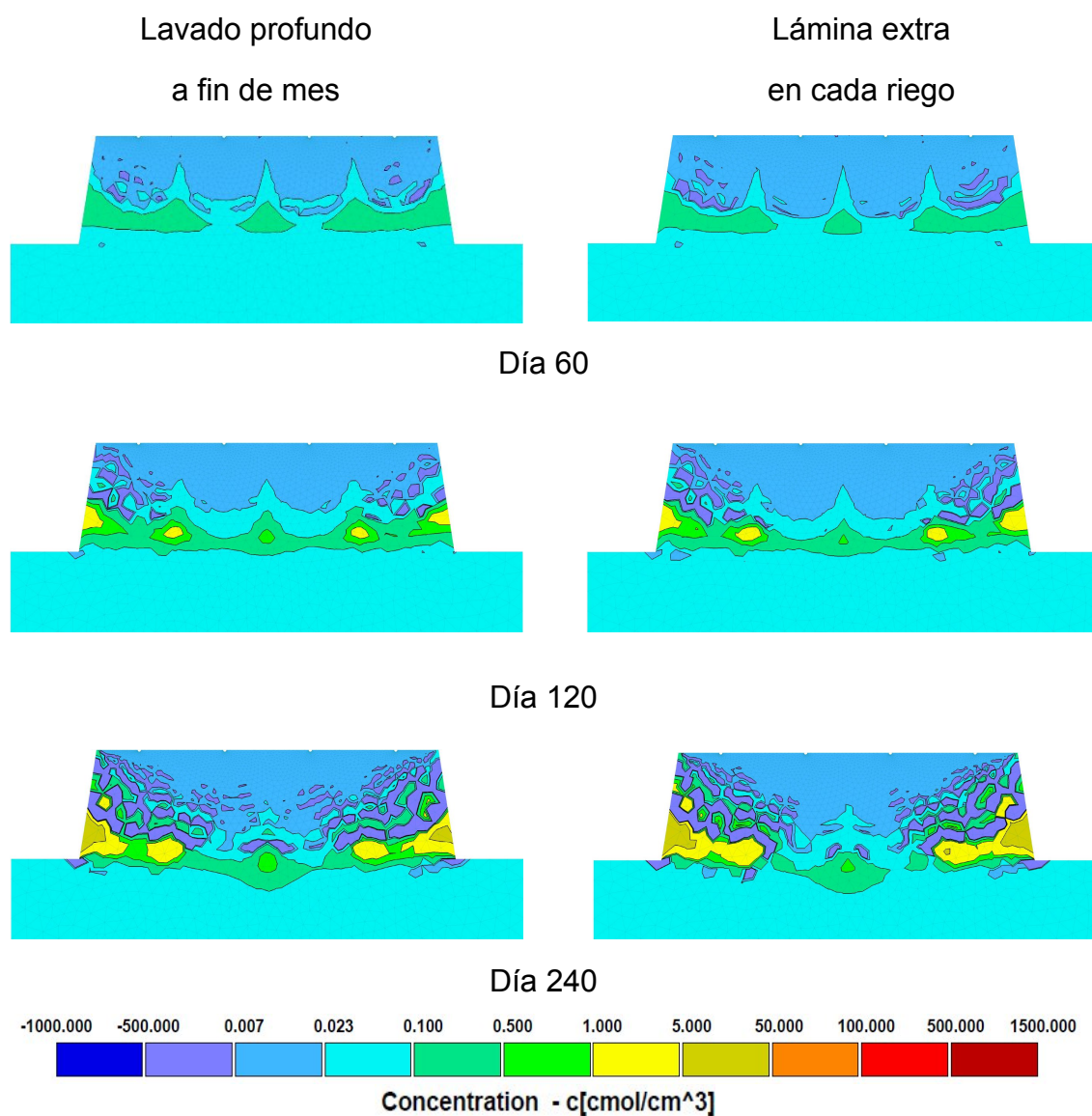


Figura 10. Redistribución de sales en riego por goteo con una frecuencia de riego de 3 días, con diferentes técnicas de lavado.

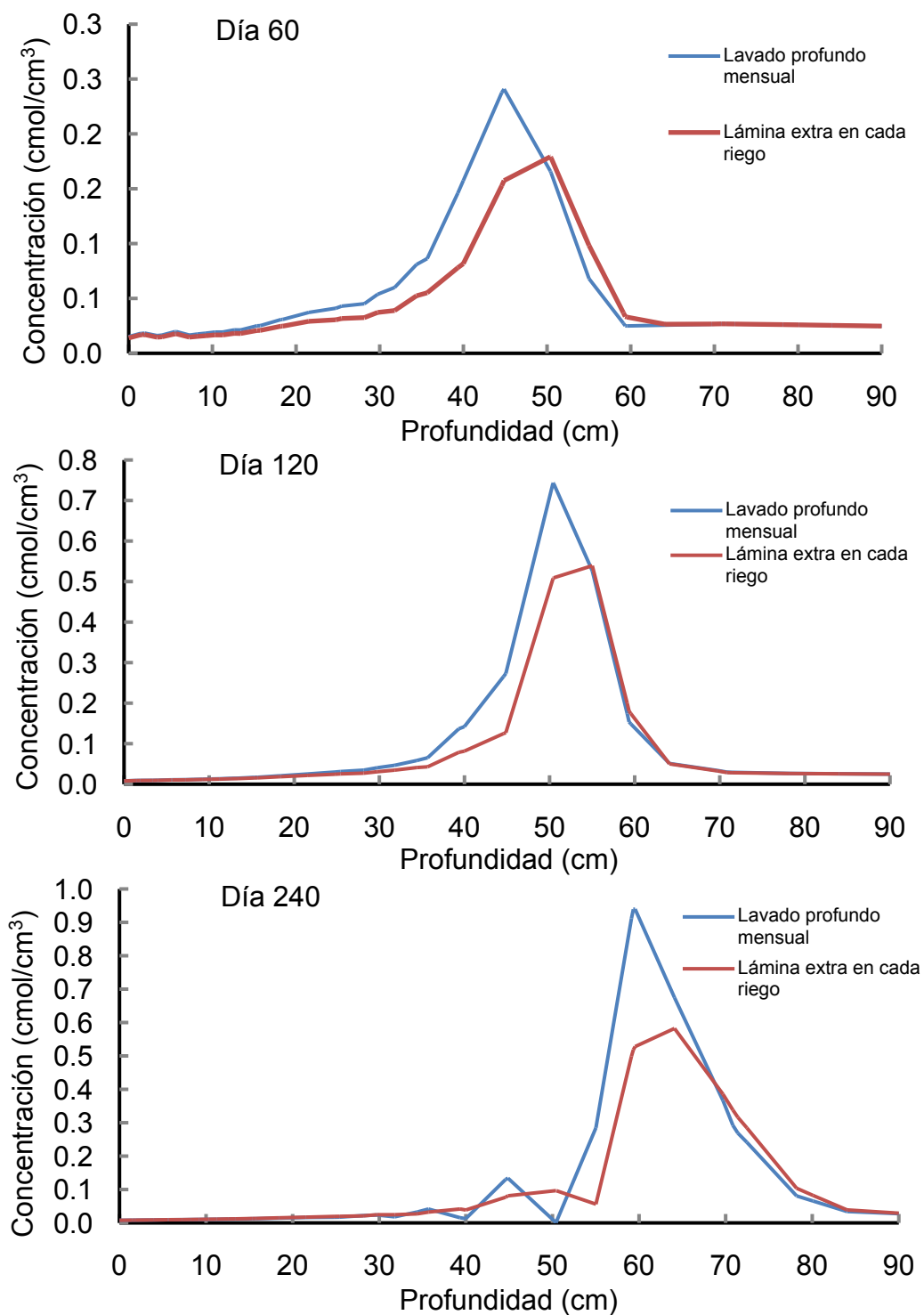


Figura 11. Concentración de sales en función de la profundidad con diferentes técnicas de lavado.

Los resultados obtenidos indican que la estrategia de distribuir una lámina extra de agua para lavado en cada riego genera una mayor eficiencia en la lixiviación de sales en comparación con la aplicación de un lavado profundo mensual. Aunque ambas estrategias utilizan el mismo volumen total de agua, la forma en que se aplica parece influir en la profundidad de desplazamiento de las sales y en su concentración máxima a lo largo del tiempo.

La modelación con lavado profundo mensual muestra picos de concentración de sales más elevados y ubicados a menores profundidades en comparación con la estrategia de aplicar la lámina adicional en cada riego. Por ejemplo, a los 60 días, el pico de concentración en el lavado profundo se encuentra a 45 cm de profundidad con $0,24 \text{ cmol/cm}^3$, mientras que, en la estrategia de distribución en cada riego, el pico está 5 cm más abajo y con una menor concentración. Este patrón se mantiene.

Estos resultados sugieren que la aplicación de la lámina adicional en cada riego favorece una lixiviación más gradual y eficiente, permitiendo un desplazamiento de las sales a mayores profundidades sin generar acumulaciones abruptas en la zona radicular. Por el contrario, la estrategia de aplicar un lavado profundo mensual podría estar promoviendo una lixiviación menos homogénea, lo que resulta en una mayor acumulación temporal de sales en el perfil del suelo antes de ser desplazadas completamente.

5.3. Comparación entre goteo y microjet

Para la tercera comparación, las Figuras 12 y 13 muestran los resultados de la simulación para los sistemas de riego por goteo y microjet, ambos con una frecuencia de riego de tres días y sin la aplicación de láminas adicionales de lavado.

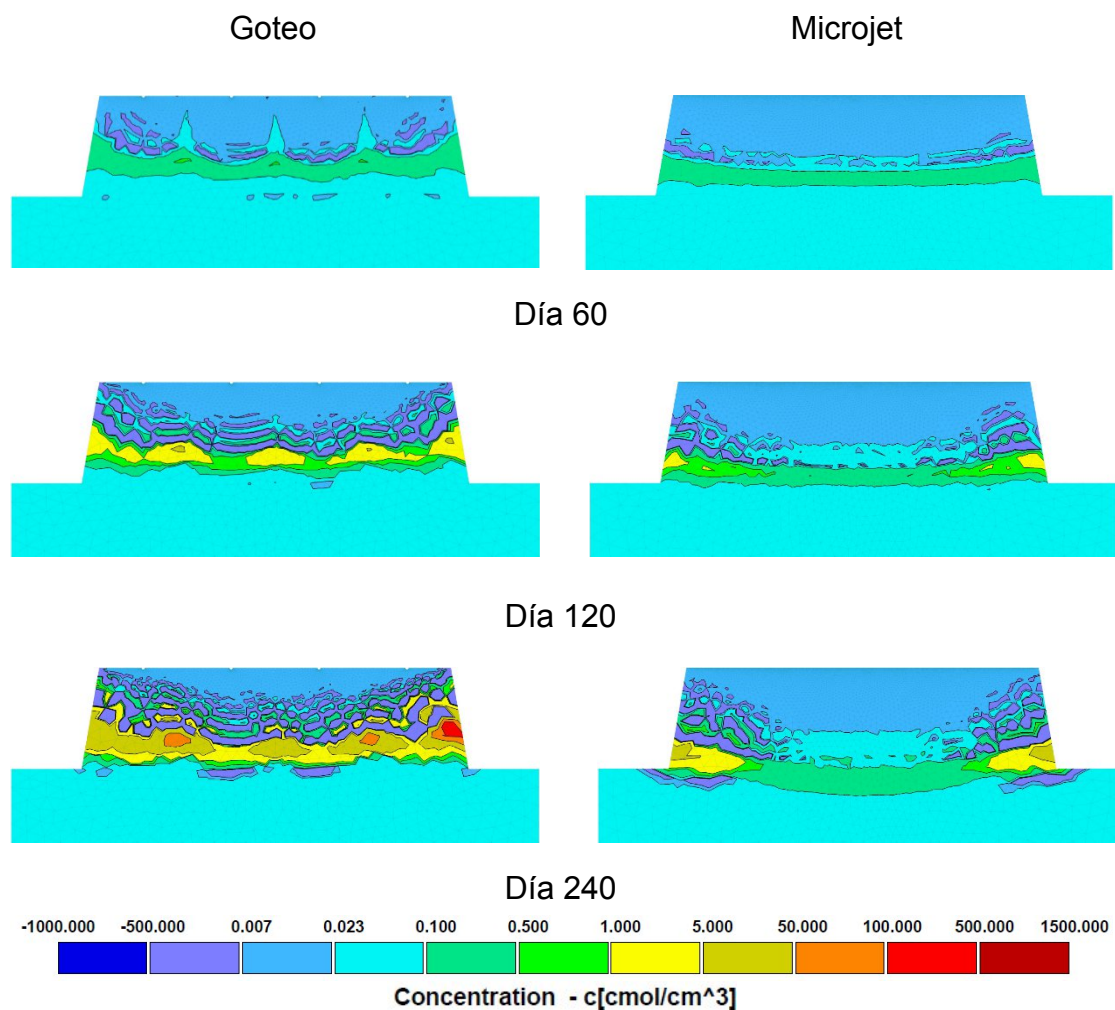


Figura 12. Redistribución de sales en riego por goteo y microjet con una frecuencia de riego de 3 días, sin lámina extra de lavado.

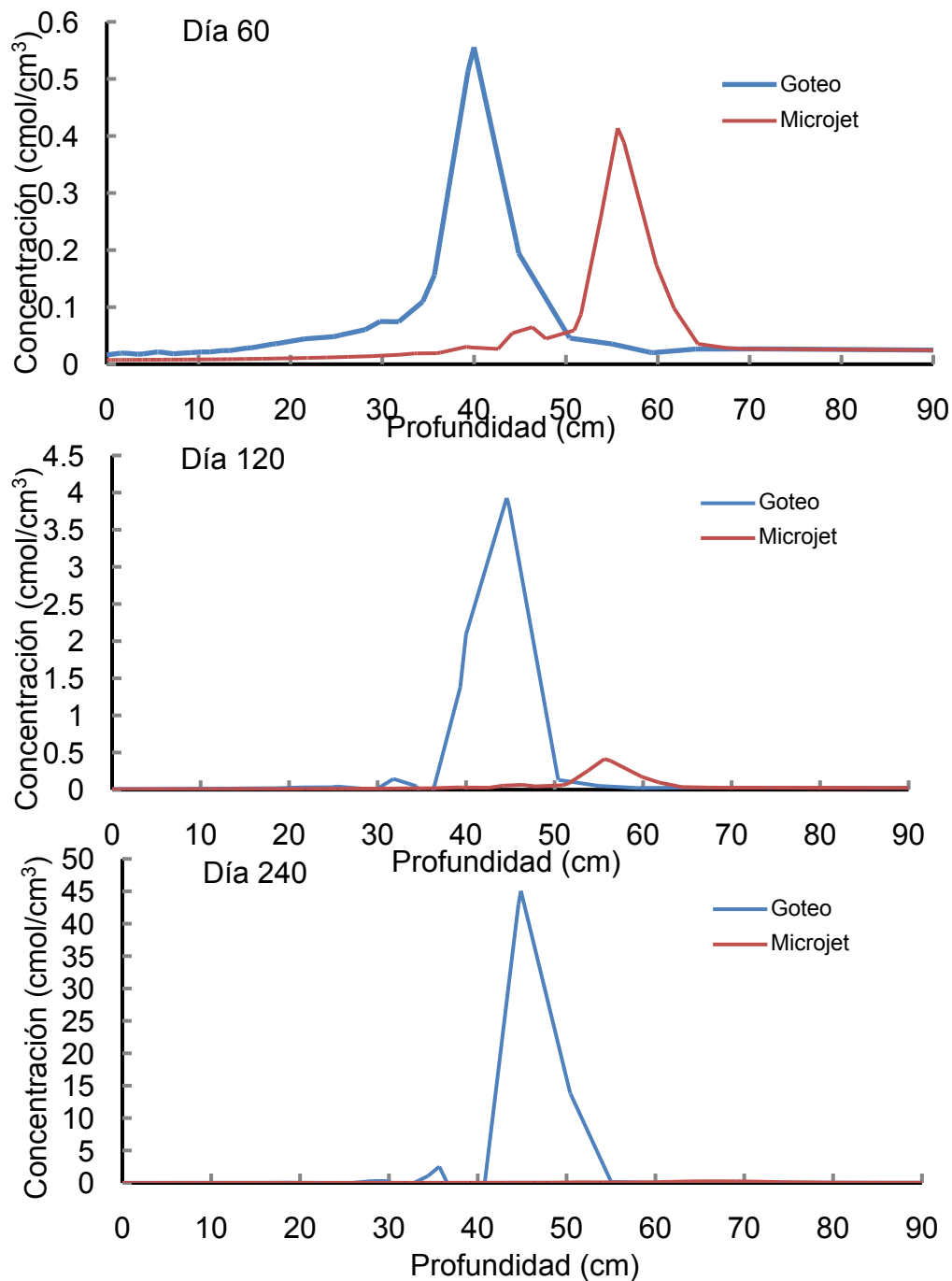


Figura 13. Concentración de sales en función de la profundidad en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días, sin lámina extra de lavado.

Los resultados obtenidos muestran una diferencia significativa entre los dos métodos de riego en cuanto a la lixiviación de sales en el suelo. Se observó que el riego por microjet permite un desplazamiento más profundo de las sales y mantiene concentraciones más bajas en comparación con el riego por goteo, a pesar de que ambos sistemas aplican únicamente el agua requerida por la planta, sin láminas adicionales para el lavado.

- Día 60: En goteo, el pico de concentración de sales se encuentra a 40 cm con $0,55 \text{ cmol/cm}^3$, mientras que en microjet el pico está 10 cm más abajo (50 cm) y con una concentración mucho menor de $0,18 \text{ cmol/cm}^3$.
- Día 120: En goteo, el pico se profundiza ligeramente hasta los 45 cm, pero con una concentración significativamente mayor ($3,9 \text{ cmol/cm}^3$). En microjet, el pico se encuentra a 55 cm, con una concentración mucho más baja de $0,41 \text{ cmol/cm}^3$.
- Día 240: En goteo, el pico de concentración se mantiene en 45 cm, pero la acumulación de sales aumenta drásticamente hasta 43 cmol/cm^3 . En cambio, en microjet, la mayor concentración se ubica a 67 cm, con una concentración mucho menor de $0,24 \text{ cmol/cm}^3$.

Estos datos indican que el riego por microjet es considerablemente más eficiente en la lixiviación de sales en comparación con el riego por goteo. Mientras que el goteo tiende a mantener y aumentar la acumulación de sales en la zona radicular, el microjet logra un desplazamiento más profundo de las

sales, reduciendo así el riesgo de toxicidad por acumulación salina en la zona de absorción de las raíces.

La propia naturaleza del riego por goteo no permite lixiviar las sales de manera efectiva. El riego por goteo aplica el agua de manera localizada, formando un bulbo húmedo alrededor de los emisores —cuya forma dependen de la textura del suelo y la tasa de infiltración. Esto limita la percolación profunda del agua, y por consecuencia, las sales tienen a acumularse en los bordes del bulbo húmedo.

La tasa de aplicación juega un papel clave en la distribución del agua en el suelo y, por lo tanto, en la eficiencia de la lixiviación de sales. En el caso del riego por microjet, la tasa de aplicación suele ser mayor que en el goteo, lo que significa que el agua se distribuye sobre una mayor superficie y se infiltra de manera más homogénea en el perfil del suelo.

En contraste, el goteo aplica agua a una tasa menor y en un área altamente localizada, lo que puede generar zonas de alta concentración de humedad alrededor del emisor y favorecer la acumulación de sales en la periferia de la zona humedecida debido a la evaporación. Con el tiempo, esto podría explicar por qué en la simulación las sales se mantienen y aumentan su concentración en la zona radicular con el riego por goteo, mientras que, con el microjet, el agua logra movilizarlas a mayores profundidades de forma más efectiva.

5.4. Comparación de lavado entre goteo y microjet

Para la cuarta comparación, las figuras 14 y 15 muestran los resultados de la simulación para los sistemas de riego por goteo y microjet, ambos con una frecuencia de riego de tres días y con una lámina extra de lavado en cada fin de mes.

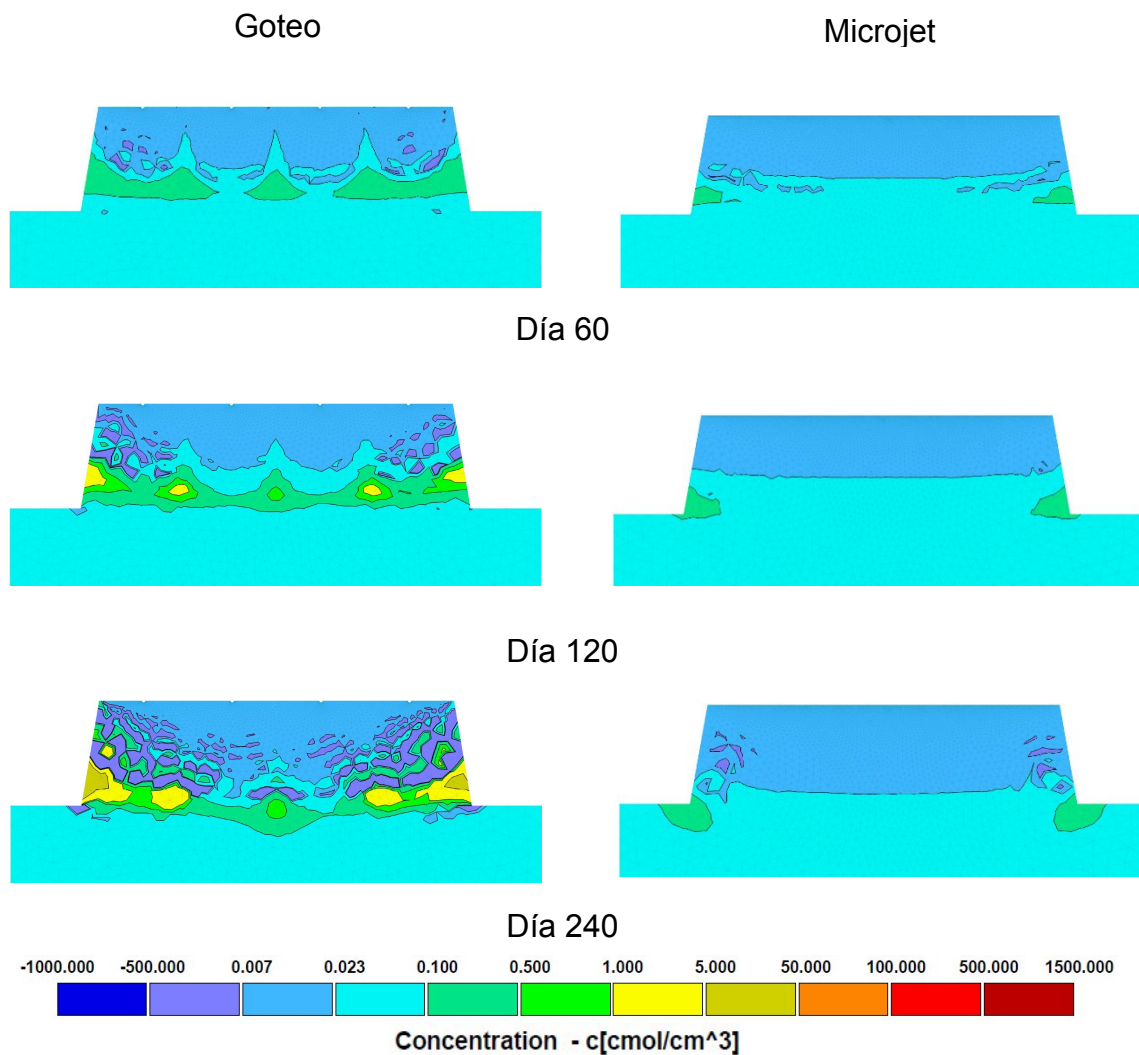


Figura 14. Redistribución de sales en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días y con lavado profundo una vez al mes.

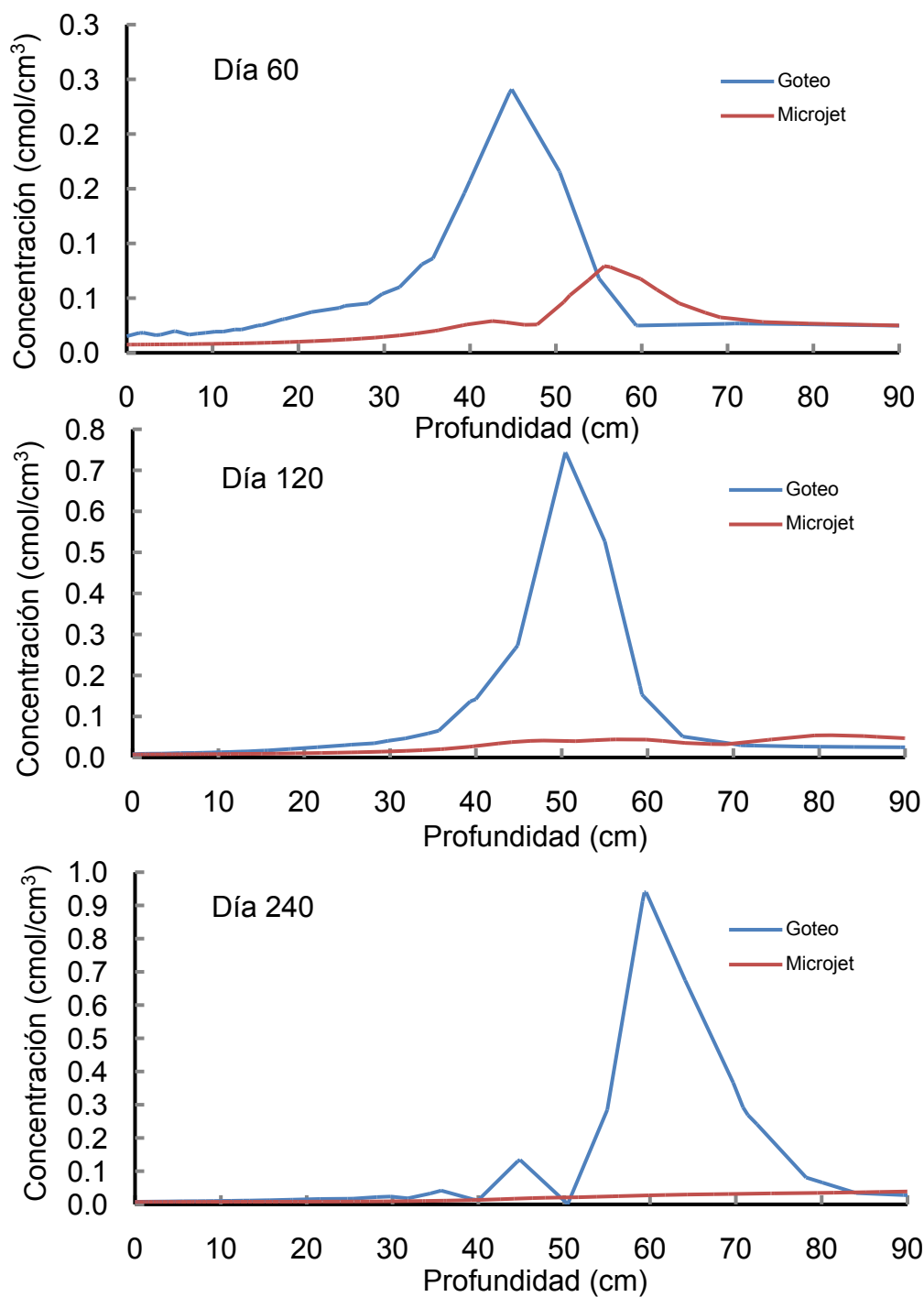


Figura 15. Concentración de en función de la profundidad en riego por goteo y microjet, con una frecuencia de riego de 3 días y con lavado profundo una vez al mes.

Al igual que en la comparación anterior, los datos presentados en las figuras 14 y 15 confirman que el riego por microjet es más eficiente para la lixiviación de sales.

Este sistema no solo permite un desplazamiento más profundo de las sales, sino que también mantiene concentraciones significativamente más bajas en todo el perfil del suelo a lo largo del tiempo.

En contraste, el riego por goteo tiende a favorecer la acumulación de sales en la zona radicular, lo que podría afectar negativamente el desarrollo de los cultivos a largo plazo.

5.5. Recomendaciones de buenas prácticas

Con base en los resultados mostrados anteriormente, y el análisis realizado, se propondrán las siguientes recomendaciones para poder implementar buenas prácticas para realizar un lavado de sales más eficiente.

5.5.1. Frecuencia de riego y su impacto en la lixiviación

En los datos mostrados, se puede observar que no existen diferencias significativas entre frecuencias de riego altas, y bajas en términos de acumulación de sales.

Se recomienda priorizar estrategias de lavado en lugar de ajustar la frecuencia de riego, enfocándose en la aplicación de láminas de agua adicionales para mejorar la lixiviación. Regar más seguido no es efectivo para lixiviar las sales de un suelo.

5.5.2. Métodos de lavado: Lavado profundo vs. Distribuido

La aplicación de una lámina de lavado distribuida en cada riego mostró mayor eficiencia en la lixiviación de las sales del suelo. Se pudo observar que a través de este método se distribuye de mejor manera.

Por lo tanto, se recomienda implementar un lavado paulatino mediante la adición de láminas extras de agua en cada riego, en vez de realizar aplicaciones esporádicas con grandes volúmenes de agua.

5.5.3. Manejo de la tasa de aplicación: Goteo vs. Microjet

Una tasa de aplicación de agua mayor favorece la lixiviación de las sales. El riego por microjet, proporciona una mayor tasa de aplicación que el riego por goteo, esto permitió al riego por microjet movilizar las sales a mayores profundidades y dejar la zona radicular con menos concentraciones de sales.

Para los suelos propensos a acumular sales, se recomienda el uso del sistema de riego por microjet. El riego por goteo es muy efectivo, pero debido a la propia naturaleza de este sistema, no resulta efectivo para lixiviar sales.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que la frecuencia de riego ya sea diaria o cada tres días, no tiene un impacto significativo en la lixiviación de sales en suelos bajo riego por goteo. Esto sugiere que, en lugar de modificar la frecuencia de riego, es más efectivo implementar estrategias alternativas como la aplicación de láminas adicionales de agua o el uso de sistemas de riego con mayor capacidad de movilización de sales para mejorar el control de la salinidad en suelos agrícolas.

Asimismo, se evidencia que distribuir el agua de lavado en cada riego es una estrategia más eficiente que aplicar lavados profundos de manera mensual. Esta práctica permite una lixiviación progresiva, reduce la acumulación de sales en la zona radicular y mejora la estabilidad del perfil del suelo a lo largo del tiempo, haciendo más eficiente el manejo de la salinidad.

Por otro lado, la tasa de aplicación del agua desempeña un papel clave en la movilización de sales. El riego por microjet, al aplicar agua a una mayor tasa y sobre una superficie más amplia, favorece un lavado más eficiente, permitiendo que el agua percole más rápido y transporte las sales a mayores profundidades. En contraste, el principal problema del riego por goteo en la lixiviación de sales es su patrón de distribución localizada —que en algunos casos puede ser más eficiente en el uso del agua—, que debido a que su flujo es tridimensional favorece la acumulación de sales en la periferia del bulbo

húmedo y en la superficie del suelo. Esto hace que el manejo para evitar la acumulación de sales en la zona radicular tenga que ser más cuidadosa, para no comprometer el crecimiento de los cultivos a largo plazo.

En síntesis, el diseño adecuado del sistema de riego y la correcta gestión del agua de lixiviación son aspectos fundamentales para la sostenibilidad de la producción agrícola en suelos con problemas de salinidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

Antúnez, A., Martínez, JP., Carvallo, E. & Otárola, J. (2011). Manejo del riego para mitigar el impacto de la salinidad en cultivos. INIA URURI.

Álvarez, J. G., Luengas, C. A., & Torres, J. (2005). Efecto de la aplicación de una lámina de riego a diferentes temperaturas y frecuencias sobre un andisol salino tratado con corriente eléctrica. *Agronomía Colombiana*, 23(2), 327-333.

El Mercurio de Calama. (2020). Sequía en Chile: Proyectan que precipitaciones seguirán disminuyendo hasta 2059. *Escenarios Hídricos 2030 Chile*.

Equipo Redagrícola. (2022). Cómo enfrentar la creciente salinidad del agua en los huertos de palto de alto rendimiento. Redagrícola.

FAO. (2021). Presentación, en conferencia virtual, del Mapa mundial de los suelos afectados por salinidad. Alianza Mundial por el Suelo.

Gardiazabal, F. (1998). Factores agronómicos a considerar en la implantación de un huerto de paltos. Seminario Internacional de Paltos.

Gardiazabal, F. (2004). Riego y nutrición en paltos. Sociedad Gardiazabal Y Magdahl Ltda. 2º Seminario Internacional De Paltos, Quillota, 1-21.

Gerónimo, C. (2019). Suelos salinos y sódicos. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán.

Holzapfel, E. (2000). Riego por goteo y microjet [en línea]. Chillán: INIA.

José Barraza. (2023). Un breve recuento de las lluvias en la zona central de Chile ante la retirada de La Niña. CR2.

Lamz Piedra, A., & González Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31-42.

Mass, E. V., & Grattan, S. R. (1999). Crop yields as affected by salinity. In R. Skaggs & J. Shilfgaarde (Eds.), *Agricultural Drainage*.

Michelakis, N., Vougioukalou, E., & Clapaki, G. (1993). Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 24, 119-131.

Omar Rodríguez, & Dufour, R. (2021). Suelos salinos y sódicos: Identificación, mitigación y consideraciones de manejo. NCAT.

Orrego, X., Arumí, J. L., & Holzapfel, E. (2005). Evaluación de prácticas de fertirrigación en una plantación de paltos usando el modelo HYDRUS 2-D. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Universidad Técnica Federico Santa María.

Portal Agro Chile. (2022). Cómo adaptarse a la salinidad en una fruticultura sustentable. Portal Agro Chile.

Sierra, C., Carlos, B., & Rojas, S. (1999). Salinidad, origen y sus efectos sobre suelos y plantas. Gobierno Regional de Atacama e Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile), Centro regional de Investigación Intihuasi (La Serena). Serie Intihuasi N° 25.

Simunek, J., Sejna, M., & van Genuchten, M. Th. (1999). The HYDRUS 2D, Software Package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable-saturated media. U.S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Riverside, California.

Souto, C., Lagos, O., Holzapfel, E., Maskey, M. L., Wunderlich, L., Shapiro, K., Marino, G., Snyder, R., & Zaccaria, D. (2019). Balance de energía superficial modificado para estimar la transpiración y la evaporación del suelo en huertos con microriego. *Water*, 11(9), 1747. <https://doi.org/10.3390/w11091747>

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.

ViLab. (2023). Desafíos de la producción de paltos en Chile. ViLab.

8. ANEXO Y APÉNDICES

CONCENTRACIÓN DE SALES EN RIEGO POR GOTEO CON FRECUENCIA DE RIEGO DE 3 DÍAS Y 1 DÍA.

Profundidad (cm)	C (cmol/cm ³)					
	FdeR=3días			FdeR=1día		
	día 60	día 120	día 240	día 60	día 120	día 240
0,000	0,016	0,008	0,008	0,016	0,009	0,008
1,449	0,019	0,010	0,008	0,019	0,010	0,008
1,639	0,019	0,010	0,008	0,019	0,010	0,008
1,913	0,020	0,010	0,009	0,019	0,010	0,008
3,382	0,018	0,010	0,009	0,017	0,010	0,009
3,970	0,018	0,010	0,009	0,017	0,010	0,009
5,529	0,022	0,011	0,010	0,021	0,011	0,010
5,593	0,022	0,011	0,010	0,021	0,011	0,010
5,671	0,022	0,011	0,010	0,021	0,011	0,010
7,257	0,018	0,011	0,011	0,017	0,011	0,010
8,218	0,019	0,012	0,011	0,018	0,012	0,011
9,185	0,020	0,013	0,012	0,019	0,012	0,011
10,298	0,021	0,013	0,012	0,020	0,013	0,012
11,235	0,022	0,014	0,012	0,020	0,013	0,012
12,610	0,024	0,015	0,014	0,023	0,014	0,013
13,362	0,024	0,015	0,014	0,023	0,015	0,014
15,322	0,029	0,018	0,013	0,027	0,017	0,012
15,728	0,029	0,018	0,013	0,027	0,017	0,012
18,180	0,036	0,020	0,031	0,034	0,018	0,028
18,384	0,036	0,020	0,032	0,034	0,018	0,029
18,414	0,036	0,020	0,032	0,034	0,018	0,028
21,524	0,044	0,031	0,006	0,043	0,030	0,020
24,762	0,048	0,032	-0,016	0,047	0,028	-0,075
25,442	0,051	0,042	-0,060	0,049	0,038	-0,111
28,161	0,061	0,015	0,288	0,059	0,018	0,432
29,759	0,075	-0,003	0,272	0,072	-0,007	0,282
31,785	0,074	0,145	-0,696	0,071	0,133	-1,018
34,398	0,109	0,048	1,056	0,113	0,057	1,569
35,676	0,156	-0,285	2,510	0,170	-0,267	3,328
39,335	0,514	1,377	-7,861	0,544	1,436	-9,751
39,990	0,556	2,090	-9,081	0,580	2,183	-11,152

44,586	0,216	3,928	43,017	0,195	3,670	42,449
44,861	0,194	3,816	45,065	0,174	3,535	45,059
50,391	0,046	0,144	13,939	0,045	0,104	16,224
50,425	0,046	0,131	13,786	0,045	0,092	16,005
50,485	0,046	0,130	13,629	0,045	0,092	15,817
55,020	0,036	0,051	0,149	0,035	0,051	0,152
59,124	0,021	0,024	0,030	0,021	0,024	0,031
59,345	0,020	0,023	0,024	0,020	0,023	0,024
59,547	0,020	0,023	0,024	0,020	0,023	0,024
64,095	0,027	0,027	0,028	0,027	0,027	0,028
69,691	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
70,837	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
71,412	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
72,450	0,027	0,027	0,026	0,027	0,027	0,026
78,191	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
80,094	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
84,017	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
89,513	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
90,000	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

CONCENTRACIÓN DE SALES EN RIEGO POR GOTEO CON LAVADO PROFUNDO MENSUAL Y LÁMINA EXTRA EN CADA RIEGO.

Profundidad (cm)	C (cmol/cm ³)					
	Lavado profundo mensual			Lámina extra en cada riego		
	día 60	día 120	día 240	día 60	día 120	día 240
0,000	0,015	0,008	0,008	0,014	0,008	0,008
1,449	0,018	0,009	0,008	0,017	0,009	0,008
1,639	0,018	0,009	0,008	0,017	0,009	0,008
1,913	0,018	0,009	0,008	0,017	0,009	0,008
3,382	0,016	0,010	0,009	0,015	0,009	0,009
3,970	0,017	0,010	0,009	0,015	0,010	0,009
5,529	0,020	0,011	0,009	0,018	0,010	0,010
5,593	0,020	0,011	0,009	0,018	0,010	0,010
5,671	0,020	0,011	0,009	0,018	0,010	0,010
7,257	0,017	0,011	0,010	0,015	0,011	0,010
8,218	0,018	0,012	0,010	0,015	0,011	0,010

9,185	0,018	0,012	0,010	0,016	0,012	0,011
10,298	0,019	0,013	0,011	0,017	0,012	0,011
11,235	0,019	0,013	0,011	0,017	0,013	0,011
12,610	0,021	0,014	0,011	0,018	0,014	0,012
13,362	0,021	0,015	0,011	0,018	0,014	0,012
15,322	0,025	0,017	0,012	0,021	0,015	0,013
15,728	0,025	0,017	0,013	0,021	0,016	0,013
18,180	0,031	0,021	0,014	0,025	0,018	0,015
18,384	0,031	0,021	0,014	0,025	0,018	0,015
18,414	0,031	0,021	0,014	0,025	0,018	0,015
21,524	0,037	0,025	0,016	0,029	0,022	0,017
24,762	0,041	0,030	0,017	0,031	0,025	0,019
25,442	0,043	0,031	0,017	0,032	0,025	0,020
28,161	0,045	0,035	0,022	0,033	0,027	0,021
29,759	0,054	0,041	0,024	0,037	0,031	0,025
31,785	0,060	0,047	0,018	0,039	0,035	0,025
34,398	0,081	0,058	0,033	0,052	0,041	0,027
35,676	0,086	0,065	0,042	0,055	0,043	0,032
39,335	0,146	0,137	0,015	0,078	0,079	0,042
39,990	0,157	0,142	0,013	0,082	0,082	0,039
44,586	0,238	0,266	0,130	0,153	0,125	0,077
44,861	0,241	0,273	0,134	0,157	0,127	0,081
50,391	0,166	0,742	0,001	0,179	0,506	0,097
50,425	0,166	0,744	0,000	0,179	0,508	0,096
50,485	0,164	0,742	0,006	0,178	0,509	0,096
55,020	0,068	0,527	0,285	0,098	0,539	0,056
59,124	0,027	0,174	0,912	0,037	0,200	0,499
59,345	0,025	0,154	0,939	0,034	0,180	0,518
59,547	0,025	0,149	0,940	0,033	0,174	0,528
64,095	0,026	0,051	0,675	0,027	0,050	0,582
69,691	0,026	0,034	0,366	0,027	0,033	0,385
70,837	0,027	0,030	0,292	0,027	0,029	0,338
71,412	0,027	0,029	0,269	0,027	0,028	0,316
72,450	0,027	0,029	0,241	0,027	0,028	0,285
78,191	0,026	0,027	0,081	0,026	0,026	0,104
80,094	0,026	0,026	0,066	0,026	0,026	0,082
84,017	0,025	0,026	0,034	0,025	0,026	0,039
89,513	0,025	0,025	0,028	0,025	0,025	0,030
90,000	0,025	0,025	0,028	0,025	0,025	0,029

**CONCENTRACIÓN DE SALES EN RIEGO POR MICROJET CON
FRECUENCIA DE RIEGO DE 3 DÍAS, SIN LAMINA DE LAVADO.**

Profundidad (cm)	C (cmol/cm ³)		
	día 60	día 120	día 240
0,000	0,008	0,008	0,008
0,209	0,008	0,008	0,008
0,367	0,008	0,008	0,008
0,441	0,008	0,008	0,008
0,513	0,008	0,008	0,008
0,702	0,008	0,008	0,008
0,934	0,008	0,008	0,008
1,208	0,008	0,008	0,008
1,256	0,008	0,008	0,008
1,456	0,008	0,008	0,008
1,609	0,008	0,008	0,008
1,654	0,008	0,008	0,008
1,988	0,008	0,008	0,008
2,143	0,008	0,008	0,008
2,472	0,008	0,008	0,008
2,624	0,008	0,008	0,008
2,791	0,008	0,008	0,008
3,209	0,008	0,008	0,008
3,824	0,008	0,008	0,008
3,850	0,008	0,008	0,008
3,895	0,008	0,008	0,008
4,518	0,008	0,008	0,008
4,693	0,008	0,008	0,008
4,958	0,008	0,008	0,008
5,378	0,008	0,008	0,008
5,945	0,008	0,008	0,008
6,138	0,008	0,008	0,008
6,653	0,008	0,008	0,008
6,958	0,008	0,008	0,008
7,069	0,008	0,008	0,008
7,829	0,008	0,008	0,008
8,359	0,008	0,008	0,008
8,793	0,008	0,008	0,008
9,807	0,008	0,008	0,008

9,874	0,008	0,008	0,008
10,060	0,008	0,008	0,008
11,034	0,009	0,009	0,008
11,393	0,009	0,009	0,008
12,310	0,009	0,009	0,008
13,142	0,009	0,009	0,009
13,682	0,009	0,009	0,009
14,989	0,009	0,009	0,009
15,161	0,009	0,009	0,009
16,025	0,009	0,009	0,009
16,741	0,010	0,010	0,009
16,897	0,010	0,010	0,009
18,369	0,010	0,010	0,010
18,988	0,010	0,010	0,010
20,049	0,010	0,010	0,010
21,804	0,011	0,011	0,011
21,905	0,011	0,011	0,011
22,039	0,011	0,011	0,011
23,906	0,012	0,012	0,011
25,512	0,013	0,013	0,012
26,259	0,013	0,013	0,012
27,335	0,013	0,013	0,013
28,946	0,014	0,014	0,014
29,899	0,015	0,015	0,014
31,827	0,017	0,017	0,016
33,517	0,019	0,019	0,017
33,800	0,019	0,019	0,018
35,924	0,019	0,019	0,020
36,317	0,020	0,020	0,020
39,186	0,031	0,031	0,025
39,644	0,029	0,029	0,025
42,606	0,027	0,027	0,032
44,162	0,054	0,054	0,043
46,333	0,065	0,065	0,043
47,819	0,045	0,045	0,038
50,907	0,059	0,059	0,084
51,633	0,087	0,087	0,096
53,807	0,258	0,258	0,087
55,638	0,414	0,414	0,082
56,321	0,389	0,389	0,082
59,852	0,174	0,174	0,101

61,776	0,098	0,098	0,162
64,362	0,036	0,036	0,239
67,412	0,029	0,029	0,246
69,155	0,027	0,027	0,237
74,051	0,026	0,026	0,130
74,175	0,026	0,026	0,127
74,431	0,026	0,026	0,123
79,488	0,026	0,026	0,054
81,428	0,026	0,026	0,042
85,185	0,025	0,025	0,029
86,738	0,025	0,025	0,028
89,934	0,025	0,025	0,025
90,000	0,025	0,025	0,025

**CONCENTRACIÓN DE SALES EN RIEGO POR MICROJET CON
FRECUENCIA DE RIEGO DE 3 DÍAS, CON LAMINA DE LAVADO.**

Profundidad (cm)	C (cmol/cm ³)		
	día 60	día 120	día 240
0,209	0,008	0,008	0,008
0,367	0,008	0,008	0,008
0,441	0,008	0,008	0,008
0,513	0,008	0,008	0,008
0,702	0,008	0,008	0,008
0,934	0,008	0,008	0,008
1,208	0,008	0,008	0,008
1,256	0,008	0,008	0,008
1,456	0,008	0,008	0,008
1,609	0,008	0,008	0,008
1,654	0,008	0,008	0,008
1,988	0,008	0,008	0,008
2,143	0,008	0,008	0,008
2,472	0,008	0,008	0,008
2,624	0,008	0,008	0,008
2,791	0,008	0,008	0,008
3,209	0,008	0,008	0,008
3,824	0,008	0,008	0,008

3,850	0,008	0,008	0,008
3,895	0,008	0,008	0,008
4,518	0,008	0,008	0,008
4,693	0,008	0,008	0,008
4,958	0,008	0,008	0,008
5,378	0,008	0,008	0,008
5,945	0,008	0,008	0,008
6,138	0,008	0,008	0,008
6,653	0,008	0,008	0,008
6,958	0,008	0,008	0,008
7,069	0,008	0,008	0,008
7,829	0,008	0,008	0,008
8,359	0,008	0,008	0,008
8,793	0,008	0,008	0,008
9,807	0,008	0,008	0,008
9,874	0,008	0,008	0,008
10,060	0,008	0,008	0,008
11,034	0,008	0,008	0,008
11,393	0,008	0,009	0,008
12,310	0,009	0,009	0,008
13,142	0,009	0,009	0,008
13,682	0,009	0,009	0,008
14,989	0,009	0,009	0,008
15,161	0,009	0,009	0,008
16,025	0,009	0,009	0,008
16,741	0,009	0,010	0,008
16,897	0,009	0,010	0,008
18,369	0,010	0,010	0,008
18,988	0,010	0,010	0,008
20,049	0,010	0,010	0,008
21,804	0,011	0,011	0,008
21,905	0,011	0,011	0,008
22,039	0,011	0,011	0,008
23,906	0,011	0,012	0,008
25,512	0,012	0,012	0,009
26,259	0,012	0,013	0,009
27,335	0,013	0,013	0,009
28,946	0,014	0,014	0,009
29,899	0,015	0,015	0,009
31,827	0,016	0,016	0,010
33,517	0,018	0,018	0,010

33,800	0,018	0,018	0,010
35,924	0,020	0,020	0,011
36,317	0,021	0,021	0,011
39,186	0,025	0,026	0,013
39,644	0,026	0,027	0,013
42,606	0,029	0,034	0,016
44,162	0,028	0,037	0,017
46,333	0,026	0,040	0,019
47,819	0,026	0,041	0,020
50,907	0,046	0,040	0,021
51,633	0,053	0,040	0,021
53,807	0,067	0,042	0,023
55,638	0,079	0,044	0,024
56,321	0,078	0,044	0,025
59,852	0,068	0,044	0,027
61,776	0,058	0,040	0,028
64,362	0,045	0,035	0,030
67,412	0,037	0,033	0,031
69,155	0,032	0,032	0,031
74,051	0,028	0,043	0,033
74,175	0,028	0,043	0,033
74,431	0,028	0,044	0,033
79,488	0,027	0,054	0,034
81,428	0,026	0,054	0,035
85,185	0,026	0,052	0,037
86,738	0,026	0,050	0,037
89,934	0,025	0,047	0,039
90,000	0,025	0,047	0,039
