

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO EN TOMATE DE
INVERNADERO EN LA COMUNA DE PICHIDEGUA, REGIÓN DE O'HIGGINS**

EMILIO RENÉ ALEJO RIVAS FAURE

Santiago, Chile

2018

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**DIAGNOSIS OF CROP FERTILIZATION IN TOMATO GREENHOUSE IN THE
COMMUNE OF PICHIDEGUA, O'HIGGINS REGION**

EMILIO RENÉ ALEJO RIVAS FAURE

Santiago, Chile

2018

UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Ciencias Agronómicas

Escuela de Pregrado

**DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIZACIÓN DEL CULTIVO EN TOMATE DE
INVERNADERO EN LA COMUNA DE PICHIDEGUA, REGIÓN DE O'HIGGINS**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo

EMILIO RENÉ ALEJO RIVAS FAURE

PROFESORES GUÍAS

Calificaciones

Sr. Osvaldo Salazar Guerrero
Ingeniero Agrónomo, MS. Ph.D.

6,7

Sr. Ricardo Cabeza Pérez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

7,0

PROFESORES EVALUADORES

Sra. Yasna Tapia Fernández
Ingeniera en Alimentos, Dra.

5,9

Sra. Erika Kania Kuhl
Ingeniera Agrónoma, Ph.D.

6,5

**Santiago - Chile
2018**

AGRADECIMIENTOS

A la educación pública que produce la verdadera riqueza de todo país que se precie de ser soberano y libre: su pueblo.

Agradezco a mis profesores guía por su paciencia, pero sobre todo por su genuino interés en perfeccionarme.

Agradezco a mi hijo, familia y amigos, porque nada tiene sentido sin ustedes.

A mi compañera Marinés, por que en cada paso que doy, se encuentra ella, caminando feliz en el viaje llamado Vida.

ÍNDICE

	Pág.
Resumen	6
Palabras clave	6
Abstract	7
Key words	7
Introducción	8
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
Materiales y métodos	11
Lugar de estudio	11
Materiales	11
Métodos	11
Análisis del suelo	12
Análisis del agua	12
Análisis de la planta	12
Manejos de fertilización	13
Análisis estadístico	14
Resultados y discusión	15
Análisis del suelo	15
Propiedades del suelo	15
Nutrición mineral del suelo	18
Análisis del agua	19
Análisis de la planta	20
Materia seca de las plantas al momento de la cosecha	21
Contenido nutricional de las plantas muestreadas	22
Manejos de la fertilización	22
Demanda y suministro de NPK de los invernaderos	22
Dosis de aplicación según requerimientos internos	23
Dosis de aplicación según niveles críticos	25
Consideraciones Finales	27
Conclusiones	29
Bibliografía	30
Apéndice I	34
Apéndice II	35
Apéndice III	36

RESUMEN

El presente trabajo es un estudio sobre el manejo de fertilización realizada por tres agricultores de tomates (*Solanum lycopersicum*, L.) de invernadero de la Región de O'Higgins. El objetivo del trabajo fue determinar la existencia o no de sobre fertilización del cultivo. Para ello se evaluó la práctica de fertilización habitual de los productores y se contrastó con un manejo racional de la fertilización, el cual considera parámetros del suelo (suministro, eficiencia de aplicación de nutrientes y niveles críticos) y de la planta (rendimientos esperados, demanda y requerimientos internos de nutrientes). Para evaluar el manejo de fertilización realizada por los agricultores, se midió en tres fechas la concentración de nutrientes en el suelo (N, P, K, S, Ca, Mg y Na) y la cantidad de los mismos nutrientes absorbidos por la planta hasta el momento de la cosecha. Se determinó que las dosis usadas por los productores fueron mayores a aquellas recomendadas por el método racional y que existe una sobre fertilización del cultivo; al no relacionar los productores los análisis del suelo con la demanda del cultivo del tomate, lo cual repercute en una pérdida y uso ineficiente de los fertilizantes.

PALABRAS CLAVE

Fertilización racional, sobre fertilización, suministro del suelo, demanda de nutrientes, requerimientos internos, niveles críticos.

ABSTRACT

The present study aimed to diagnose the fertilization management of three producers of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*, L.) from the Region of O'Higgins, Chile. The objective was to establish the occurrence or absence of over fertilization. The prevalent/traditional fertilization management of the producers were compared with a rational model of fertilizing, accounting soil resources (supply, application efficiency of nutrients and critical levels) and plant parameters (expected yields, demand and internal nutrient requirements). Content of soil nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg and Na) were measured at three dates and these same nutrients absorbed into the tissues were measured in roots, stems, leaves and fruit of tomato plants at harvest time. It was concluded that the fertilization program of the producers exceeded the rational amount necessary for the crops and did not incorporate soil analysis or demand of nutrients in order to determine the amount of fertilizers, generating losses and inefficient use of fertilizers.

KEY WORDS

Rational fertilization, over fertilization, soil supply, nutrients demand, internal requirement, critical levels.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*, L.) es la hortaliza más cultivada en el mundo (Escalona *et al.*, 2009), por el sinnúmero de subproductos que se obtienen de esta especie y las divisas que aporta (Santiago *et al.*, 1998). En Chile, el cultivo de tomate para consumo fresco ocupa el tercer lugar en superficie destinada anualmente, sólo detrás del choclo y la lechuga (ODEPA, 2017).

Hace 50 años en Chile un buen rendimiento de tomate por hectárea era de 20 toneladas. Hoy en cambio, los tomates bajo invernadero superan las 100 ton ha⁻¹ (Escalona *et al.*, 2009), mientras que los tomates tempranos superan las 120 a 180 ton ha⁻¹ (Giacconi y Escaff, 2001). Por otra parte, los rendimientos de tomate cultivado al aire libre son significativamente menores con producciones promedio de 40 ton ha⁻¹ (FIA, 2009).

El rendimiento de frutos de tomate con calidad comercial está limitado, entre otros factores, por la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Por lo tanto, el uso de una metodología que permita calcular la dosis correcta de fertilizantes a ser aplicados a un cultivo, puede tener repercusiones sobre la calidad del producto cosechado y disminuir el impacto ambiental asociado al uso excesivo de fertilizantes. En general, la fertilización de un cultivo se basa en la respuesta del rendimiento a la aplicación de un determinado nutriente. Sin embargo, esta aproximación es costosa y requiere de ensayos representativos para las condiciones edafoclimáticas de un área determinada (Bouzo *et al.*, 2003). Por otra parte, la fertilización de un cultivo, se puede racionalizar conociendo un conjunto de elementos que afectan la absorción de un nutriente por un cultivo. En este aspecto, el método racional de fertilización de cultivos ha mostrado resultados satisfactorios para las condiciones edafo-climáticas de Chile. El manejo racional de la fertilización de un cultivo contrasta la demanda de la planta respecto a la disponibilidad de los nutrientes específicos en el suelo, con el objetivo de cuantificar el déficit o exceso de nutriente, y enmendarlo mediante la aplicación de fertilizantes (Rodríguez, 1993). Para la aplicación del método racional, se debe considerar la demanda de nutrientes realizada por el cultivo, la cantidad de nutrientes potencialmente disponibles para la planta que aporta el suelo (suministro) y la eficiencia de la aplicación de fertilizantes. La demanda de un nutriente realizado por un cultivo se puede obtener conociendo el potencial de rendimiento del agrosistema (Rendimiento Esperado [RE]), la concentración del nutriente en la Materia Seca (MS) producida por el cultivo, conocido también como Requerimiento Interno del cultivo (RI) y el Índice de Cosecha (IC) (Rodríguez, 1993). Según Bouzo *et al.* (2003), el RI de N, P y K para tomate es de: 2,2; 0,3; y 4,5 g 100 g⁻¹ de materia seca producida. En relación al IC, la planta de tomate presenta una proporción de producto cosechado de un 0,64.

Dentro de los macroelementos más importantes para la nutrición del tomate, se encuentra el N, cuya deficiencia en cultivos se manifiesta en hojas cloróticas, plantas delgadas y frutos pequeños (Taiz y Zeiger, 2003). Varios autores señalan que para el tomate, existe un efecto positivo entre el N aplicado y el calibre del fruto (Ruiz, 1985; Rojas, 2003; Holwerda, 2006). También el N aumenta el peso de las plantas, el tamaño de las hojas, el número de frutos por

planta y el rendimiento (Echeverría, 1986), aunque el crecimiento vegetativo puede ser excesivo. En este sentido, Kirimi (2011) señala que fertilizaciones altas de N disminuyen el número total y comercial de frutos, además de afectar su firmeza.

El Potasio (K) intensifica el transporte y almacenamiento de fotosintatos desde la hoja a la fruta, en el proceso conocido como carga y descarga de asimilados al floema (Marschner, 2012) favoreciendo un mayor tamaño del fruto, mayor acumulación de sólidos solubles (más azúcares), piel más gruesa y frutos más firmes (Meléndez y Molina, 2002; Holwerda, 2006). Este elemento también evita el “tejido blanco”, es decir fibras blancas que son organolépticamente indeseables (Zambrano, 2009). El déficit de K, en cambio, produce maduración desigual y flacidez en el interior del fruto (Stoner, 1971). Por otra parte, excesos de N y deficiencias de K causan un bufado en el fruto (“puffiness”), es decir, menor gelatina que rodea las semillas, generando espacio vacío entre la pared exterior y los lóculos (Holwerda, 2006). Además, las deficiencias de K y Calcio (Ca) causan partiduras o “cracking” y favorecen las condiciones para que los frutos sean dañados por el sol (Holwerda, 2006).

Respecto al Ca, este elemento es esencial para la estructura de la pared celular y la elongación de las células, aportando estructura y firmeza a los frutos (Holwerda, 2006). Una deficiencia de Ca genera un desorden fisiológico conocido como podredumbre apical en el fruto o “Blossom end rot”, que se manifiesta además con márgenes cloróticas en hojas jóvenes, arrugamiento de hojas y muerte apical de tallo y raíces (CEAC, 2000). Debido a su falta de movilidad en la planta, pudiera generarse Blossom end rot aun estando disponible en el suelo (Sainju *et al.*, 2003). También hay que tener presente que existe un antagonismo entre el N amoniacal y el Ca, el cual afecta la absorción radicular de ambos cationes (Meléndez y Molina, 2002).

El Magnesio (Mg) es muy importante en el cultivo del tomate debido a que su deficiencia genera susceptibilidad a enfermedades, como por ejemplo, el “Tizón temprano” (*Alternaria solani*), el cual en condiciones adecuadas, rara vez mancha el tomate (Giaconi y Escaff, 2001).

El Azufre (S), si bien es un macro elemento, no acostumbra a presentar deficiencias en los suelos en general (Brady, 1990). Fisiológicamente, presenta características similares al N por ser ambos componentes principales de las proteínas. La diferencia en ambos radica en la menor movilidad del S, por lo cual su deficiencia se manifiesta tanto en hojas jóvenes como viejas, mientras que el N lo hace en hojas viejas (Taiz y Zeiger, 2003).

El Sodio (Na), si bien no es un elemento esencial, tampoco acostumbra a presentar déficits en los suelos, pudiendo más bien, presentar una concentración que puede llegar a limitar severamente los usos de suelos (Brady, 1990). Los efectos adversos del Na son moderados por la presencia de iones de Ca y Mg (Brady, 1990; Goykovic y Saavedra, 2007).

También afectan directamente el rendimiento del tomate las propiedades del suelo, como por ejemplo el pH del suelo. Distintos autores sitúan el pH óptimo del suelo para el cultivo del

tomate dentro del rango de 6,0 a 6,5 (Stoner, 1971; Sainju *et al.*, 2003; Escaff *et al.*, 2005 y Escalona *et al.*, 2009a) pero tolera de 6,0 a 8,0 (Giacconi y Escaff, 2001). El pH del suelo se relaciona con la disponibilidad de microelementos. También la salinidad es un factor que puede perjudicar el correcto desarrollo del tomate. El umbral de salinidad tolerado por esta especie, antes de sufrir una reducción en el rendimiento, es de 2,5 dS m⁻¹ (Havlin *et al.*, 2013; Escaff *et al.*, 2005). Lo anterior tiene relación directa con el tipo y dosis de fertilizantes a utilizar en el cultivo del tomate. Para ello es necesario tener presente el índice de basicidad y salinidad de los fertilizantes de manera de no alterar el pH ni tampoco aumentar la salinidad del suelo.

Debido a que la fertilización del cultivo del tomate tiene un efecto sobre la calidad de los frutos producidos, es necesario realizar acorde a su demanda. Sin embargo, la fertilización del tomate de invernadero en la región de O'Higgins se ha hecho basada en recomendaciones genéricas y en muchos casos, parece plausible que los productores sobre fertilizan el cultivo, sin hacer interpretación de análisis del suelo ni tampoco considerando la demanda de nutrientes del cultivo.

Objetivo general

Diagnosticar el manejo de la nutrición mineral y fertilización en tomates de invernadero en la comuna de Pichidegua, Región de O'Higgins, el cual servirá de base para proponer un programa de fertilización racional para este cultivo.

Objetivos específicos

- i. Establecer un balance de nutrientes en el cultivo de tomate bajo invernadero para realizar comparaciones con el programa de fertilización usado por los tres agricultores. El balance considera el contenido de nutrientes en el suelo, la cantidad de nutrientes extraído por el cultivo de tomate en su estado de madurez y las entradas de nutrientes realizados por los productores mediante la práctica de fertilización.
- ii. Proponer un programa de fertilización racional del tomate en invernadero para la zona de estudio basado en ecuaciones que permitan determinar las dosis de nutrientes a aplicar; considerando variables como el RI del nutriente en la planta, el RE, MS e IC, además de Niveles Críticos (NC) de nutrientes en el suelo, acorde a bibliografía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El estudio se realizó en tres invernaderos (1, 2 y 3) de productores asociados a la Cooperativa Campesina Intercomunal Peumo (COOPEUMO), Región de O'Higgins, mientras que las muestras recolectadas fueron analizadas en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas y de Física de Suelos, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. El estudio considera el periodo desde el trasplante del tomate (Julio 2014) hasta la última cosecha (Diciembre 2014).

El clima de la provincia de Pichidegua (que abarca la comuna de Peumo) es de tipo Mediterráneo semiárido con veranos cálidos e inviernos fríos, con una temperatura media anual del aire de 14,6°C, máxima mensual de 26,3°C en el mes de enero y mínima mensual de 6,1°C en agosto. Las precipitaciones se concentran en los meses de mayo a octubre y bordean una media anual de 550 mm, con una evapotranspiración potencial de 940 mm año⁻¹ (Uribe *et al.*, 2012).

Los invernaderos se ubican en terrazas aluviales antiguas del río Cachapoal, y corresponden a la Serie de Suelos Peumo, que pertenece al Orden de Suelos Molisol (CIREN, 2002). La profundidad efectiva del suelo varía entre 60 – 120 cm y más, con drenaje bueno a moderado. Es un suelo plano con pendientes de 0 a 1%. Sus distintas fases varían entre Capacidad de Uso I y III, y Categoría de Riego 1 y 3.

Materiales

En los tres invernaderos se establecieron plantines de tomates de la variedad 7742 de SEMINIS. En cada invernadero el agricultor realizó sus prácticas de manejo habituales (fertilización, riego, aplicación de agroquímicos, etc.), acorde a los instructivos de la cooperativa y que fueron compartidos para el estudio. En el Cuadro 1 se detallan las características de los invernaderos utilizados por los agricultores, y en particular el diseño del sistema de riego.

Cuadro 1. Tamaño de las naves de los invernaderos y datos de riego.

Ítem	Valor
Largo nave	40 m
Ancho nave	5 m
Entre hilera	1,33 m
Tipo de riego	Cinta, doble hilera
Distancia emisores	0,2 m
Caudal emisor	0,8 L h ⁻¹
Frecuencia de riego	48 h
Duración del riego	3 h

Métodos

Análisis del suelo

En cada invernadero se realizó un muestreo de suelo a profundidad de 0-20 cm con un barreno holandés, obteniendo una muestra compuesta de 15 sub-muestras en cada sala de invernadero, en tres fechas distintas: el 26 de junio del 2014, antes del trasplante; el 11 de diciembre del 2014, a finales del ciclo productivo; y el 7 de enero del 2015, al estado de madurez de la planta, posterior a la cosecha de los productores.

Las muestras de suelo se tomaron sobre las hileras de plantación, dentro del bulbo de mojamiento, y fueron trasladadas en bolsas plásticas para su análisis físico y químico, con tres repeticiones por fecha, para cada invernadero.

Los análisis físicos correspondieron a textura, determinada por el método del hidrómetro de Bouyoucos y el triángulo textural USDA; densidad aparente (Db) por el método del cilindro; y retención de agua a 33 y 1500 kPa (CDC y PMP) de los suelos; según las metodologías señaladas por Sandoval *et al.* (2012).

Los análisis químicos correspondieron a: reacción del suelo pH en agua en relación 1:2,5 p/v; conductividad eléctrica mediante pasta saturada; materia orgánica estimada de la pérdida por calcinación a 360 °C y multiplicado por 0,8; N disponible mediante digestión ácida, destilación de NH₃ y determinación por titulación ácida con H₂SO₄; P por el método Olsen; cationes solubles (Ca, Mg, K y Na) y de intercambio mediante extracción con solución de acetato de amonio 1 M; S disponible extraído mediante dihidrógeno fosfato de calcio 0,01 M; según Sadzawka *et al.* (2006) y Capacidad de Intercambio de Cationes (CIC) mediante acetato de sodio y amonio, según Sadzawka (1990).

Análisis del agua

También se tomaron dos muestras de agua de riego de cada invernadero en fecha 11 de diciembre del 2014 para determinar la concentración de N inorgánico, utilizando un set de reactivos de la empresa Hach mediante métodos colorimétricos, donde el N-nitrato (N-NO₃) fue determinado por el método del ácido cromotrópico y el N-amonio (N-NH₄) mediante el método del salicilato (Hach, 2005) utilizando un espectrofotómetro marca Hach modelo DR-5000.

Análisis de la planta

En cada invernadero se marcaron ocho plantas distribuidas en tres hileras. Estas plantas fueron usadas para el seguimiento de los parámetros relacionados con la nutrición de la planta durante la ontogenia. Al final del estudio, transcurridos casi seis meses, se cosecharon las plantas seleccionadas separando los órganos (raíz, tallo, hoja y frutos) para determinación de MS mediante secado a 60°C según los procedimientos propuestos por Sadzawka *et al.* (2007). Se determinaron los contenidos totales de N, P, K, Ca, Mg, Na y S en cada órgano.

Por cada planta en estado de madurez, se seleccionaron dos frutos representativos para los análisis.

Manejos de fertilización

Los análisis se complementaron con una encuesta a los tres agricultores de tomate en invernadero de la zona de estudio para diagnosticar el manejo de la fertilización y nutrición del cultivo de tomate. La encuesta recopila información productiva obtenida con igual variedad de tomate, el 7742 SEMINIS, en cuanto a: rendimientos (kg tomate ha⁻¹), superficie de los invernaderos (m²), dosis de fertilizantes aplicados (kg ha⁻¹) y el riego aplicado (m³ ha⁻¹).

Con los resultados obtenidos de los análisis químicos y la información de las encuestas, se pudo calcular la demanda de nutrientes de parte del cultivo, el suministro de nutrientes disponibles en el suelo y la dosis de aplicación racional del fertilizante, según las ecuaciones propuestas por Rodríguez (1993):

$$Demanda (kg ha^{-1}) = \frac{RE \times MS \times RI}{IC} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

RE = rendimiento esperado (kg ha⁻¹)^a

MS = materia seca (kg kg⁻¹)^b

RI = requerimiento interno del nutriente (kg nutriente kg MS total⁻¹)^b

IC = índice de cosecha (kg kg⁻¹)^c

^a Parámetro reportado por el agricultor

^b Parámetro determinado en laboratorio a partir de las muestras

^c Según Bouzo *et al.* (2003)

El suministro se calculó, según el contenido de nutrientes en el suelo, la profundidad a la cual se estime la zona radical y considerando la densidad aparente del suelo (Db).

$$Suministro (kg ha^{-1}) = [x] \times Db \times z \times s \times 10^{-3} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

x = contenido de nutriente en el suelo (mg kg⁻¹)

Db = densidad aparente (Mg m³)

z = profundidad del suelo (m)

s = superficie (ha)

Para la determinación de la dosis de nutriente a aplicar en un programa de fertilización racional se utilizó la Ecuación 3:

$$Dosis de nutriente (kg ha^{-1}) = \frac{Demanda - Suministro}{Ef de Aplicación} \quad (\text{Ec. 3})$$

Al conocer la demanda de nutriente por parte del cultivo se pudo determinar la necesidad o no de fertilización, mediante la diferencia entre la *demanda* y el *suministro* del nutriente del suelo, resultando una dosis positiva o negativa.

También se utilizó una segunda ecuación, la cual considera un NC de contenido de nutriente en el suelo. El criterio consiste en fertilizar si el valor de nutriente en el suelo se encuentra bajo el NC.

$$Dosis\ de\ nutriente\ (kg\ ha^{-1}) = \frac{(NC - AS) \times Db \times z \times s}{Ef} \quad (Ec. 4)$$

donde:

NC-AS = Nivel Crítico – Análisis del Suelo ($mg\ kg^{-1}$)

Db = densidad aparente ($Mg\ m^3$)

z = profundidad del suelo (m)

s = superficie (ha)

De considerar los factores nombrados, los agricultores realizarán Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), definidas por la Comisión Nacional de BPA como la aplicación “acorde con un programa de fertilización que permita suplir, exclusivamente las deficiencias de nutrientes según los análisis desarrollados” (CNBPA, 2003).

Análisis estadístico

Los datos fueron caracterizados con estadística descriptiva, con el cálculo de media, rangos, valores, mínimos y máximos y desviaciones de la media.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del suelo

Propiedades del suelo

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de los análisis físicos de los suelos del estudio, donde se encontraron clases texturales de media a fina.

Cuadro 2. Propiedades físicas de los suelos en los sitios de estudio. Los valores indican el valor medio \pm desviación estándar de las tres fechas de muestreo.

Propiedad	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3
Clase textural	F	AL	A
Db (Mg m^{-3})	$1,6 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$

F = Franca; AL = Arcillo limosa; A = Arcillosa; Db = densidad aparente.

Según CIREN (1995), el tomate se desarrolla sin ninguna limitante en texturas francas, aumentando las limitaciones hacia clases texturales extremas (finas o gruesas), debido a la susceptibilidad del tomate al exceso del agua (Giaconi y Escaff, 2001). En ese sentido, el suelo del Invernadero 1 tiene textura óptima, aumentando las limitaciones texturales en los suelos de los invernaderos 2 y 3.

En cuanto a la Db, esta comienza a ser un factor limitante desde valores mayores a los $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, siendo suelos muy compactados los que presentan valores de 2 Mg m^{-3} (Brady, 1990). Usualmente, la Db para clases texturales limosas y arcillosas son de $1,47$ y $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ respectivamente (Dexter, 2003), ubicándose clases texturales francas en valores mayores. Considerando estos rangos, existe una mayor compactación en suelos del Invernadero 1 y una leve compactación en los suelos de los invernaderos 2 y 3.

En el Cuadro 3 se muestran las medias de los análisis químicos de las tres fechas medidas, donde se encontró que el pH del suelo tenía una media cercana al neutro, una salinidad por sobre el tolerado para la especie, bajo contenido de materia orgánica del suelo (MOS) y una CIC dentro de un rango normal.

Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos en los sitios de estudio. Los valores indican el valor medio \pm desviación estándar de las tres fechas de muestreo.

Propiedad	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3
pH	$6,9 \pm 0,8$	$7,1 \pm 0,4$	$7,3 \pm 0,4$
CE (dS m^{-1})	$2,6 \pm 1,3$	$2,9 \pm 1,0$	$2,9 \pm 1,6$
MOS (%)	$2,0 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,1$
CIC (cmol kg^{-1})	$11,1 \pm 4,1$	$13,7 \pm 1,3$	$14,1 \pm 1,7$

Durante el desarrollo del estudio, el suelo del Invernadero 1 varió desde un pH “moderadamente alcalino” a “débilmente ácido”, mientras que los invernaderos 2 y 3 se

mantuvieron en pH “neutro”, con ligeras variaciones, según la clasificación de Navarro y Navarro (2003) para suelos agrícolas (figura 1).

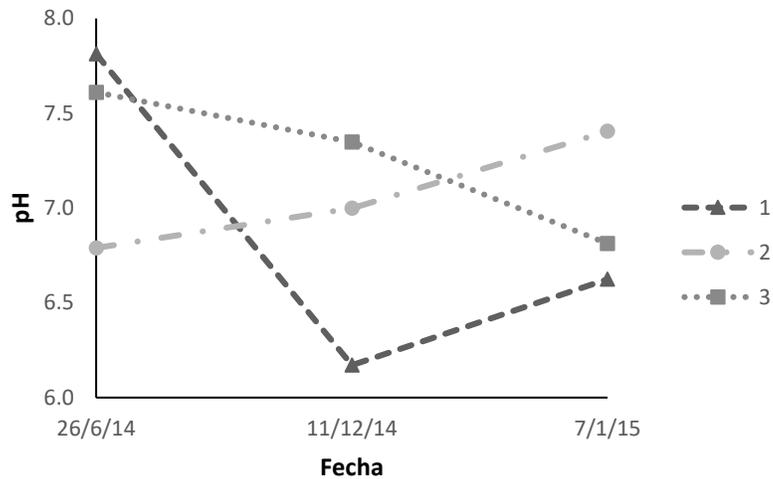


Figura 1. Variación del valor de pH en el suelo de los invernaderos (1, 2 y 3) durante el estudio.

Los valores de pH de los suelos, a excepción de las dos últimas mediciones en el Invernadero 1, se ubicaron por sobre el umbral óptimo del tomate de pH 6,5 (Stoner, 1971; Escaff *et. al.*, 2005 y Escalona *et. al.*, 2009a), lo cual podría disminuir el rendimiento potencial, aunque el tomate tolera hasta un valor de 8,0 (Giaconi y Escaff, 2001). Los suelos de los invernaderos 1 y 2 presentan una tendencia a la alcalinización, mientras que el suelo del Invernadero 3 muestra una tendencia a la acidificación. El principal factor agronómico que produce una variación del pH del suelo es la reacción de los fertilizantes, junto con otros factores, como reacción de la MOS y laboreo intensivo (Campillo y Sadzawka, 2006). Los fertilizantes utilizados en los tres invernaderos (cuadros 16 y 17, Anexo I); como nitrato de potasio (KNO_3) y nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) tienen efectos alcalinizantes (Brady, 1990), por lo cual podrían ser causantes del aumento del pH del suelo, aunque combinados a otros manejos agrícolas, debido a que en los invernaderos 2 y 3 se utilizó un mismo programa de fertilización y sin embargo las tendencias fueron opuestas.

Según las clasificaciones de Fassbender y Bornemisza (1987), la salinidad del suelo en el Invernadero 1 varió durante el periodo de estudio de “no salino” ($\text{CE} < 2 \text{ dS m}^{-1}$) a “ligeramente salino” ($\text{CE} = 2-4 \text{ dS m}^{-1}$) en las últimas fechas de muestreo de suelo; en el Invernadero 2 se mantiene una CE “ligeramente salina” en las tres fechas de muestreo; mientras que el Invernadero 3 presentó una condición de “ligeramente salino”, *no salino* y *salino* ($\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$), en las distintas fechas de muestreo (Figura 2).

La salinidad del suelo del Invernadero 1, en estado de madurez, se ubica por sobre el valor tolerado de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ (Havlin *et al.*, 2013), valor desde el cual disminuye el rendimiento, presentando hacia el final una tendencia a la baja; mientras que en los invernaderos 2 y 3 la

CE está por bajo el umbral en las dos primeras fechas de muestreo, pero con tendencia a la salinización, sobrepasando el umbral en la tercera fecha (Figura 2).

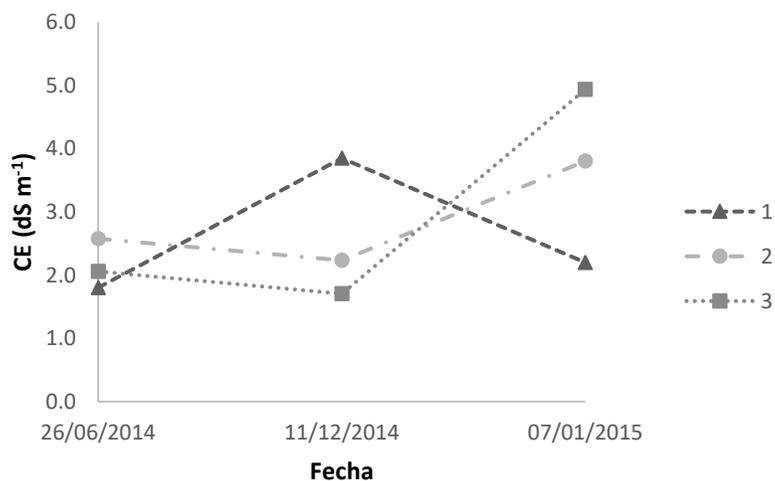


Figura 2. Evolución de la conductividad eléctrica (CE) del suelo en tres diferentes fechas de muestreo para cultivo de tomates en invernadero.

La MOS permaneció constante en los suelos de los tres invernaderos, pero en el suelo del Invernadero 1 el contenido de MOS es muy baja (<2%) y en los suelos de los invernaderos 2 y 3, el contenido de MOS es bajo (2-5%) (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Los suelos que pertenecen al orden Molisol, como los suelos de la Comuna de Peumo (CIREN, 2002), tienen un rango de CIC de 5-64 cmol kg⁻¹ y en promedio 22 cmol kg⁻¹ (Brady, 1999), situándose los invernaderos dentro del rango, pero por debajo del promedio.

El Cuadro 4 presenta la proporción de contenido de agua del volumen del suelo a Capacidad de Campo (CDC) y a Punto de Marchitez Permanente (PMP) de los suelos de los invernaderos.

Cuadro 4. Contenidos de humedad a Capacidad de Campo (CDC), Punto de Marchitez Permanente (PMP) y Humedad Aprovechable (HA) de las muestras del 26 de junio del 2014.

Sitios	CDC (%)	PMP (%)	HA (%)
Invernadero 1	16	8	8
Invernadero 2	30	21	9
Invernadero 3	24	16	8

Suelos de clases texturales más finas generalmente tienen un mayor volumen a CDC y PMP, sin embargo, el Invernadero 2 tiene mayor capacidad de almacenamiento de agua a CDC que el Invernadero 3, siendo el último de textura más fina. Esta diferencia probablemente se deba al mayor contenido de MOS en el suelo del Invernadero 2, ya que la MOS puede retener hasta 20 veces su masa en agua (Stevenson, 1994).

Nutrición mineral del suelo

Los rangos de disponibilidad de nutrientes del Cuadro 5 fueron elaborados según Nájera *et al.* (2015), Marschner (2012) e INIA (2000):

Cuadro 5. Rangos químicos relacionados a la disponibilidad de nutrientes del suelo.

Análisis del suelo	Clase			
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
N mineral (mg kg ⁻¹)	≤ 10	11 – 20	21 – 40	41 ≤
P – Olsen (mg kg ⁻¹)	≤ 3	4 – 7	8 – 18	19 ≤
K disponible (mg kg ⁻¹)	≤ 50	51 – 80	81 – 120	121 ≤
S disponible (mg kg ⁻¹)	≤ 3	4 – 7	8 – 18	19 ≤
Ca intercambiable (cmol kg ⁻¹)	≤ 2	3 – 4	4,1 – 8,0	8,1 ≤
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	≤ 0,2	0,3 – 0,4	0,5 – 0,8	0,9 ≤
Na intercambiable (cmol kg ⁻¹)	≤ 0,15	0,16 – 0,20	0,21 – 0,30	0,31 ≤
K intercambiable (cmol kg ⁻¹)	≤ 0,12	0,13 – 0,25	0,26 – 0,51	0,52 ≤
MOS (%)	≤ 1	1,1 – 2,5	2,6 – 5,0	5,1 ≤

Basado en el Cuadro 5, en el Cuadro 6 se presentan las concentraciones de los principales nutrientes en los tres invernaderos, previo al trasplante, con sus respectivos rangos.

Cuadro 6. Contenido de nutrientes en los suelos de los invernaderos y sus rangos de disponibilidad, el 26 de Junio del 2014 (antes del trasplante). Los valores indican el valor medio ± desviación estándar.

Elemento	Invernadero 1	Invernadero 2		Invernadero 3		
		Disponibilidad (mg kg ⁻¹)				
N	11,3 ± 2,5	Bajo	14,7 ± 3,2	Bajo	10,3 ± 5,9	Bajo
P	40,3 ± 10,1	Alto	84,0 ± 6,2	Alto	39,0 ± 3,0	Alto
K	155,0 ± 33,0	Alto	151,7 ± 17,6	Alto	185,7 ± 27,5	Alto
S	38,0 ± 15,9	Alto	33,2 ± 6,9	Alto	41,1 ± 5,7	Alto
		Disponibilidad (cmol kg ⁻¹)				
Bases						
Ca	10,3 ± 1,5	Alto	10,7 ± 0,4	Alto	10,9 ± 0,7	Alto
Mg	2,1 ± 0,1	Alto	5,1 ± 0,3	Alto	4,8 ± 0,5	Alto
Na	3,4 ± 0,2	Alto	3,7 ± 0,3	Alto	4,5 ± 0,7	Alto
K	0,5 ± 0,1	Medio	1,7 ± 0,1	Alto	0,7 ± 0,1	Alto

En los tres invernaderos los niveles de N en el suelo están en rango bajo previo al trasplante. En el caso del P, los tres suelos de invernaderos poseen niveles que pueden ser considerados, extremadamente altos, especialmente el suelo del Invernadero 2. La alta concentración de P en los primeros 20 cm de suelo, se debe a la fertilización continua y en exceso de este elemento, por sobre las necesidades del cultivo. Niveles óptimos de P en el suelo para mantener una producción comercial se encuentran entre los 20 y 25 mg kg⁻¹ (Hartz, 2005).

De una forma similar al P, los niveles de K en el suelo son altos. Sin embargo, el cultivo de tomate posee una alta demanda para este elemento, siendo 600 y 700 mg kg⁻¹ un rango deseable (Sainju *et al.*, 2003), estando los niveles de K iniciales, por debajo de estos valores. Debido a que la absorción de S por los cultivos es similar a la cantidad demandada de P (Marschner, 2012), se puede inferir que los niveles de S disponible en el suelo, están en un rango alto. La disponibilidad de los elementos bases se sitúan todas en categoría alta, a excepción del K del suelo del Invernadero 1 el cual está cercano al rango máximo. Sainju *et al.* (2003), señalan contenidos óptimos de Ca de 5 cmol kg⁻¹; y de Mg de 2,9 a 5,8 cmol kg⁻¹. El Ca se ubica por encima del necesario en los tres suelos de invernaderos mientras que el Mg se ubica por debajo del rango en el Invernadero 1, y dentro del rango en los invernaderos 2 y 3. En relación al porcentaje de Na intercambiable en el suelo (Exchangeable Sodium Percentage), los valores en los invernaderos variaron entre 27 y 32% en la primera fecha; siendo en el caso del tomate valores tolerables entre 40 a 60% (Pearson, 1960). En fechas posteriores sin embargo los rangos subieron, pero por debajo al 60%. En cuanto al Sodium Adsorption Ratio (SAR), los suelos de los invernaderos indicaron valores muy bajos, menores al 2%, subiendo luego hasta 2,5 – 3,0% en la última fecha (Anexo I).

Análisis del agua

Utilizando los datos del Cuadro 1 sobre el diseño y riego de los invernaderos, se estimó que el riego fue de 1.203 L h⁻¹ en cada nave. Dado que las Jornadas de Riego (JR) eran de 3 horas, cada dos días, entre Julio y Diciembre (92 Jornadas de Riego) se regaron 332.030 L nave⁻¹, equivalente a 16.601.504 l ha⁻¹ de agua. Considerando las concentraciones de NO₃ y NH₄ (Cuadro 7) en el agua de riego se obtuvo la cantidad de N aplicado por este concepto en cada invernadero durante la temporada de cultivo (Cuadro 8). Lo anterior es una aproximación simple, ya que se asumió que la concentración de N en las aguas de riego fue constante durante la temporada de cultivo.

Cuadro 7. Contenido de nitrógeno-nitrato (N-NO₃), nitrógeno-amonio (N-NH₄) y N total en el agua de riego.

Sitios	NO ₃ (mg L ⁻¹)	NH ₄ (mg L ⁻¹)	N Total (mg L ⁻¹)
Invernadero 1	3,0 ± 1,0	0,0 ± 0,8	0,7 ± 0,2
Invernadero 2	12,9 ± 0,1	0,1 ± 0,1	3,0 ± 0,1
Invernadero 3	82,0 ± 4,2	1,8 ± 0,5	19,9 ± 1,3

Respecto a las diferentes concentraciones, se asume como causante los diferentes puntos de extracción del río Cachapoal, por las cuales reciben mayores lixiviaciones los invernaderos ubicados al final de la cuenca de parte de los productores anteriores, y por ende, aumentando las concentraciones río abajo. La concentración de N total en el agua de riego de los tres invernaderos es menor al máximo permitido por el Decreto 90 (2000) para descargas en aguas continentales superficiales y el Decreto 46 (2002) para residuos líquidos a aguas subterráneas, donde ambos decretos fijan un máximo de 50 mg N total L⁻¹, pero mayor en el Invernadero 3 al máximo establecido para el agua potable que establece un máximo de 50

mg NO₃ L⁻¹, según la NCh 409/1 (2005).

Como señala el Cuadro 8, la carga de N en el agua de riego es una cantidad considerable de fertilizante, existiendo diferencias significativas según el punto de extracción del cauce del mismo río, para cada invernadero.

Cuadro 8. Cantidad de nitrógeno aplicado en el agua de riego por temporada en los tres invernaderos del estudio.

Sitios	kg N ha ⁻¹
Invernadero 1	11
Invernadero 2	50
Invernadero 3	331

El Cuadro 9 fue construido en base a los datos de la estación meteorológica “La Rosa Sofruco” (CIREN, 1997) ubicada en las coordenadas 34°19’ S, 71°15’ W, a una distancia de 11,5 km de Peumo aproximadamente, y los datos fenológicos fueron obtenidos de Quezada (2012).

Cuadro 9. Evapotranspiración del tomate

	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ET _o (mm mes ⁻¹)	22,2	27,1	37,4	71,3	119,9	146,6
Estado	Inicio	Inicio	Desarrollo	Desarrollo	Media	Madurez
K _c	0,3	0,4	0,6	0,8	1,18	1,0
ET _c (mm mes ⁻¹)	6,66	10,84	22,4	57,0	141,5	146,6

La ET_c del ciclo de desarrollo del tomate es de 3.850 m³ ha⁻¹, lo cual contrasta fuertemente con los 16.602 m³ ha⁻¹ aplicados por los agricultores. Hay que considerar sin embargo que la ET_o utilizada, corresponde a un cultivo al aire libre y no en invernadero, ambiente controlado que en promedio alcanza entre un 8,5 y 17% más de temperatura que la del exterior en los meses más calurosos (Andrade *et. al.* 2011 ; Boueri y Lunardi, 2006), alcanzando diferencias de 2,3 a 3,3 °C respectivamente. Debido a la gran diferencia entre el ET_c y el volumen de riego aplicado, podría existir un sobre riego.

Análisis de la planta

Materia Seca de las plantas muestreadas al momento de cosecha

En el Cuadro 10 se muestran las medias de MS total de los órganos de las plantas muestreadas en cada invernadero, a excepción de la MS de los frutos, en donde se muestrearon solo dos frutos por cada planta muestra y no la MS del total de frutos por planta.

Todos los sitios presentaron mayor MS, en orden de mayor a menor, en Tallo>Hoja>Raíz; no considerándose Fruta al no haberse medido está en su totalidad. Los tallos presentaban

una longitud entre 1,5 y 2 m, mientras que las raíces presentaban poca profundidad y pocas ramificaciones, concentrándose la zona explorada por las raíces en la parte superficial del suelo en el bulbo de mojamiento, dado que el sistema radicular del tomate es superficial, concentrándose el 80% de las raíces en los primeros 40 cm de suelo (Escaff *et. al.*, 2005).

Cuadro 10. Media de materia seca (MS) por órgano de las plantas muestreadas en los invernaderos al momento de cosecha.

Sitios	Fruto ¹	Hoja ²	Tallo ²	Raíz ²
----- g MS -----				
Invernadero 1	117,6 ± 40,7	76,5 ± 28,5	128,1 ± 35,9	12,5 ± 4,2
Invernadero 2	108,5 ± 38,4	91,5 ± 12,9	163,1 ± 35,8	16,8 ± 6,1
Invernadero 3	88,7 ± 9,8	111,3 ± 16,9	176,6 ± 34,2	19,9 ± 7,7

¹ Media de MS para cada fruto.

² Media de MS para el total del órgano.

Contenido nutricional de las plantas muestreadas

Mediante los análisis químicos se pudo determinar el contenido de cada nutriente dentro de las plantas muestreadas, para así determinar el grado de absorción de fertilizantes que existió en el manejo nutricional (Apéndice II).

Se complementaron los datos propios de MS de los órganos muestreados totalmente (raíz, tallos y hojas) con la MS de fruta total supuesta por planta para un rendimiento de 130 ton ha⁻¹, con un porcentaje de desecho de 7% (basado en Rojas y Alfaro, 1995) y un 6% de MS de los frutos según Bouzo *et al.* (2003); obteniéndose así la concentración de nutriente por frutos, y por MS total planta (Cuadro 11).

Cuadro 11. Contenido de cada nutriente (g) en frutos y planta de tomate en los invernaderos.

Nutriente	Invernadero 1		Invernadero 2		Invernadero 3	
	Frutos	Planta	Frutos	Planta	Frutos	Planta
----- g 100 g ⁻¹ MS -----						
N	1,05	1,43	1,28	1,44	1,70	1,57
P	0,21	0,17	0,23	0,22	0,18	0,14
K	3,40	1,37	3,39	1,47	2,84	1,17
S	0,06	0,23	0,09	0,34	0,02	0,36
Ca	0,02	2,86	0,03	2,97	0,03	3,18
Mg	0,01	0,48	0,03	0,60	0,03	0,66
Na	0,01	0,53	0,01	0,49	0,01	0,65

Los RI de N-P-K de los invernaderos variaron de los presentados por Bouzo *et al.* (2003) de 0,022; 0,003 y 0,045 kg kg⁻¹, respectivamente. Esto se puede deber a que los datos de Bouzo *et al.* abarcan una mayor amplitud de datos y en diferentes condiciones. En el caso del K, en donde existe una mayor diferencia, se puede deber a su condición de catión en la planta, con funciones de transporte y acumulación de fotoasimilados (Marschner, 2012), por lo cual su concentración es más volátil, a diferencia de N y P con funciones más estructurales.

Manejos de fertilización

Demanda y suministro de N-P-K de los invernaderos

Según la encuesta realizada a los agricultores, los rendimientos generales de los tomate de invernadero variaron en el rango de 100 a 140 ton ha⁻¹, con 1 kg racimo⁻¹ y racimos de 4-5 frutos. Según Bouzo *et al.* (2003), el cultivo del tomate tiene un IC de 0,64 y un contenido de humedad de 94% (MS = 6%). Los RI utilizados, fueron determinados en laboratorio (Cuadro 11).

Para la simplificación de los cálculos, el estudio utilizó como RE 130 ton ha⁻¹, para los tres invernaderos. Mediante la Ecuación 1 se obtuvieron las demandas y con la Ecuación 2, los suministros; considerando como suministro al contenido de nutrientes del suelo al momento de la primera fecha (26 de junio del 2014):

Cuadro 13. Demanda y suministro de nutrientes de los suelos de los invernaderos 1, 2 y 3, para rendimientos de tomate de 130 ton ha⁻¹, más la diferencia entre ambos.

Sitios	Demanda	Suministro	Diferencia
	----- kg N ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	171	36	-134
Invernadero 2	171	44	-127
Invernadero 3	195	29	-166
	----- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	24	129	+105
Invernadero 2	24	252	+228
Invernadero 3	12	109	+97
	----- kg K ₂ O ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	171	496	+325
Invernadero 2	183	455	+272
Invernadero 3	146	520	+374
	----- kg S ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	24	121	+97
Invernadero 2	37	100	+63
Invernadero 3	49	115	+66
	----- kg CaO ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	353	6.575	+6.222
Invernadero 2	366	6.451	+6.085
Invernadero 3	390	6.138	+5.748
	----- kg MgO ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	61	800	+739
Invernadero 2	73	1.866	+1.793
Invernadero 3	85	1.645	+1.560

- : Diferencias negativas indican un suministro del elemento menor a la demanda

+: Diferencias positivas indican un suministro del elemento mayor a la demanda

En el caso del N (diferencias positivas) efectivamente correspondió aplicar fertilizantes, mientras que en los casos de P, K, S, Ca y Mg (diferencias negativas) resultó innecesario, sobrepasando el suministro varias veces a la demanda en algunos casos. Sin embargo, si se agregara al suministro de N la cantidad de N aplicada en el agua de riego, las diferencias disminuirían; llegando a ser innecesaria la fertilización en el suelo del Invernadero 3.

Dosis de aplicación según Requerimientos Internos

La dosis de aplicación racional de fertilizante se obtuvo mediante la Ecuación 3, la cual considera la diferencia entre demanda y suministro, además de ponderar ambas por la eficiencia del método de aplicación, que fue de riego tecnificado por cinta. Rodríguez (1993) señala una eficiencia de fertilización de 65% para N en situaciones de bajo riesgo. Para las eficiencias de absorción de fertilizantes de P y K, Rodríguez (1993) se basa en diferentes factores, tales como: fracciones disponibles de nutrientes; la eficiencia de absorción de los cultivos según su sistema radical (asemejándose en este caso el tomate a la papa, de raíz

similar y también Solanácea); tipos de suelos y Db. Considerando estos factores, para P se estimaron eficiencias de 19-21%, y para K 20-23%. En el resto de nutrientes se asumió un 65% de eficiencia al igual que el N.

Comparando las dosis de aplicación racional de fertilizante obtenidas con la Ecuación 3 y las fertilizaciones por temporada aplicadas por los agricultores, dosis agricultor (Apéndice III), en el Cuadro 14 se presentan las diferencias entre ambas.

Como señalaba el Cuadro 13, en los tres invernaderos, únicamente en el caso del N existió déficit entre demanda y suministro, por lo cual correspondía fertilizar. Sin embargo, la aplicación de N de parte de los agricultores excedió al racional, como indica el Cuadro 14. En el resto de los nutrientes no correspondía aplicar fertilizantes, siendo las dosis racionales de valor 0 en los tres invernaderos, y lo aplicado por los agricultores, innecesario.

Cuadro 14. Diferencias entre dosis racional de fertilizantes según la Ecuación 3 y dosis de fertilización de los agricultores para cada nutriente para rendimientos de 130 ton ha⁻¹.

Sitios	Dosis racional	Dosis agricultor	Diferencia
	----- kg N ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	207	269	+62
Invernadero 2	195	345	+150
Invernadero 3	255	345	+90
	----- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	0	424	+424
Invernadero 2	0	48	+48
Invernadero 3	0	48	+48
	----- kg K ₂ O ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	0	580	+580
Invernadero 2	0	536	+536
Invernadero 3	0	536	+536
	----- kg S ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	0	0	0
Invernadero 2	0	60	+60
Invernadero 3	0	60	+60
	----- kg CaO ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	0	65	+65
Invernadero 2	0	156	+156
Invernadero 3	0	156	+156
	----- kg MgO ha ⁻¹ -----		
Invernadero 1	0	30	+30
Invernadero 2	0	93	+93
Invernadero 3	0	93	+93

+: Diferencias positivas indican una dosis agricultor del nutriente mayor a la racional

Dosis de aplicación según Niveles Críticos

Existen otras formas de calcular una fertilización racional, en caso de desconocer el RI del nutriente, como es la Ecuación 4, la cual utiliza los NC de nutrientes necesarios en el suelo para obtener un buen rendimiento y el Análisis del Suelo (AS) que es la cantidad de nutrientes que efectivamente existen en el suelo. El Cuadro 15 fue elaborado con los datos de NC de Alvarado (2009), homologándose el NC del S al P.

Los casos de diferencias negativas son nuevamente aquellos que requieren de aplicación de fertilizantes, mientras que las diferencias positivas no requieren. La Ecuación 4 indica nuevamente la necesidad de fertilizar N, sumado a la necesidad de S en el Invernadero 2.

Cuadro 15. Nivel Crítico (NC) de los nutrientes y Análisis de Suelo (AS) de la primera fecha (26 de junio del 2014) y las diferencias entre ambas.

Sitios	NC	AS	Diferencia
		----- mg N kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	35	11	-24
Invernadero 2	35	15	-20
Invernadero 3	35	10	-25
		----- mg P kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	12	40	+28
Invernadero 2	12	84	+72
Invernadero 3	12	39	+27
		----- mg K kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	78	155	+77
Invernadero 2	78	152	+74
Invernadero 3	78	186	+108
		----- mg S kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	35	38	+3
Invernadero 2	35	33	-2
Invernadero 3	35	41	+6
		----- mg Ca kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	441	2.055	+1.614
Invernadero 2	441	2.150	+1.709
Invernadero 3	441	2.192	+1.751
		----- mg Mg kg ⁻¹ -----	
Invernadero 1	97	250	+153
Invernadero 2	97	622	+525
Invernadero 3	97	588	+491

+: Diferencias positivas indican un suministro del elemento mayor al nivel crítico

- : Diferencias negativas indican un suministro del elemento menor al nivel crítico

Al ser en función de RE mínimos, las dosis de aplicación racional de fertilizantes de la Ecuación 4 son menores a los de la Ecuación 3 (con RE mayores), por lo cual aumentan las diferencias positivas con las dosis de aplicación de los agricultores (Cuadro 16).

Cuadro 16. Diferencias entre dosis racional de fertilizantes según la Ecuación 4 con NC y dosis de los agricultores en N y S para rendimientos de 130 ton ha⁻¹.

Sitios	Dosis racional	Dosis agricultor	Diferencia
		----- kg N ha ⁻¹ -----	
Invernadero 1	12	269	+257
Invernadero 2	9	345	+336
Invernadero 3	11	345	+334
		----- kg S ha ⁻¹ -----	
Invernadero 2	1	60	+59

+: Diferencias positivas indican una dosis agricultor del elemento mayor al racional

Resulta ser una diferencia sensible el no considerar los RI de nutrientes en el cultivo, como en el caso de la Ecuación 4, dado que los NC son rangos que permiten obtener un mínimo de rendimientos, pero no establecen una función de dosis a aplicar si un productor desea obtener mayores rendimientos, o si tiene suelos de diferentes propiedades los cuales afectan a la eficiencia de aplicación de los fertilizantes.

Consideraciones finales

Rodríguez (1993) señala que la obtención de métodos racionales de fertilización requiere de grandes volúmenes de información de experimentos de campo para cuantificar o predecir, la nutrición mineral de los cultivos. Se han presentado simplificaciones, como las del mismo Rodríguez que permiten su aplicación práctica en las condiciones chilenas, pero en el presente estudio se hace notar el cómo pueden variar unas de otras (ecuaciones 3 y 4).

El factor principal a analizar entre las dos ecuaciones y el método de fertilización de los agricultores (quienes se basaban en recomendaciones genéricas) es la cuantificación de las entradas y salidas del sistema. La ecuación más integral es la Ecuación 3, la que en su componente “Demanda” considera factores que determinarán la cantidad de extracción de nutrientes que habrá al momento de la cosecha; extracción la cual será necesario de enmendar.

La Ecuación 4 sólo hace un estimado con sus NC de cuanto se extrae para un rendimiento mínimo en un cultivo de tomate y la recomendación genérica realiza una estimación según agricultores conocidos en el rubro. El Cuadro 17 realiza una comparación entre los diferentes métodos.

Cuadro 17. Comparación de métodos de fertilización y sus componentes

Componentes	Ecuación 3	Ecuación 4	Recomendación Genérica
Suministro	Si	Si	No
Rendimientos Esperados	Si	No	No
Requerimiento Interno	Si	No	No
Índice de Cosecha	Si	No	No
Eficiencia de Fertilización	Si	Si	No

Es evidente que la Ecuación 3, con mayor número de componentes, realiza un balance más completo referente a las demandas y salidas del sistema, mientras que la Ecuación 4 al dar por supuesto un determinado RE solo alcanza un balance parcial al extraído. La Recomendación Genérica funciona solo bajo supuestos.

En lo que respecta a las dosis de aplicación recomendadas; se proponen el siguiente cuadro guía simplificado para los productores (Cuadro 18), las cuales suponen una Db de 1,5 Mg m⁻³ para los suelos y utiliza los RI promedio de los tres invernaderos en el Cuadro 11. Los contenidos de los nutrientes en el suelo corresponden a tres rangos (bajo, medio y alto) junto a tres RE distintos.

Cuadro 18. Dosis de fertilizantes para distintos rendimientos de tomate y contenidos de nutrientes en el suelo determinados según el método racional de aplicación de fertilizantes.

Nivel de suficiencia	Concentración del nutriente en el suelo	Rendimiento Esperado		
		100 ton ha ⁻¹	130 ton ha ⁻¹	150 ton ha ⁻¹
	N (mg kg⁻¹)	----- kg N ha ⁻¹ -----		
Bajo	10	111	153	181
Medio	20	81	123	151
Alto	40	21	63	91
	P (mg kg⁻¹)	----- kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----		
Bajo	3	34	47	55
Medio	8	19	32	40
Alto	>20	0	0	4
	K (mg kg⁻¹)	----- kg K ₂ O ha ⁻¹ -----		
Bajo	50	0	40	69
Medio	80	0	0	0
Alto	120	0	0	0
	S (mg kg⁻¹)	----- kg S ha ⁻¹ -----		
Bajo	3	19	28	33
Medio	8	4	13	18
Alto	>20	0	0	0
	Ca (cmol_c kg⁻¹)	----- kg CaO ha ⁻¹ -----		
Bajo	2	0	0	0
Medio	4	0	0	0
Alto	8	0	0	0
	Mg (cmol_c kg⁻¹)	----- kg MgO ha ⁻¹ -----		
Bajo	0,2	0	2	21
Medio	0,5	0	0	0
Alto	0,9	0	0	0

En el caso de N, siempre es necesario aplicar una dosis de fertilizante para compensar la demanda creciente del cultivo. En el caso del P, solo cuando el elemento en el suelo presenta concentraciones que se encuentran en niveles considerados de bajo a muy bajo o cuando la demanda es muy alta. En el S solo es necesario suplirlo cuando los niveles son bajos a muy bajos y exista mayor demanda. El K del suelo es casi siempre suficiente para suministrar el K necesario para el crecimiento del cultivo. En todos los casos, el objetivo es siempre realizar una reposición de los nutrientes, es decir, aplicar una dosis de mantención la cual es equivalente a la cantidad de nutrientes que efectivamente son extraídos fuera del sistema.

CONCLUSIONES

El presente estudio evidenció una “huella” considerable de fertilizantes presentes en el suelo, producto del programa de fertilización usado por los tres agricultores de la comuna de Pichidegua, Región de O’Higgins, debido a la acumulación consecutiva de excedentes de cada temporada, cuyos nutrientes no fueron extraídos por los cultivos.

Analizando el contenido nutricional del suelo, para la fecha previa al trasplante de plantines de tomates, prácticamente todos los nutrientes en el suelo, a excepción del N, se ubicaron en un rango alto.

Además, la mayor parte de los rangos de absorción de nutrientes se ubicaron entre un 30 y 45% frente a lo aplicado, producto de una dosis agricultor innecesaria, según el parámetro de suministro o análisis de suelos de los métodos racionales, a excepción del N que sí requería, pero en dosis menores a las de los agricultores.

Para evitar las pérdidas que impactan al medioambiente como a la rentabilidad de los agricultores, es necesario que los agricultores adopten un programa de fertilización racional que fertilice considerando los análisis de suelo y la cantidad de nutrientes necesarios para un determinado Rendimiento Esperado.

Se propone como programa de fertilización racional del tomate en invernadero para la zona de estudio el uso de ecuaciones que consideren variables tales como, demanda, suministro, eficiencia de absorción o Niveles Críticos de nutrientes en el suelo. Las dosis racionales, obtenidas mediante las ecuaciones para la temporada en estudio, se incluyeron a lo largo de la discusión junto a las dosis agricultor, indicando la no aplicación de fertilizantes o aplicaciones menores a la de los agricultores, en el caso del N.

De incorporar los agricultores esta metodología, el presente estudio ha determinado la media de Requerimiento Interno de nutrientes de los cultivos de tomate en invernadero para cada agricultor, así como la Materia Seca, para utilizarlos como parámetros en futuras fertilizaciones. También revisión bibliográfica sobre Niveles Críticos, para Rendimientos Esperados de 70 ton ha⁻¹ aproximado.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, P.; Escalona, V.; Monardes, H.; Urbina, C. y A. Martin. 2009. Nutrición y fertilización del tomate. (Cap. 7, pp. 30-35). *En su*: Manual del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Nudo hortícola. Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas. 60p.
- Andrade, A.; L. Damasceno, N. Dias, H. Gheyi and C. Guiselini. 2011, sep-oct. Climate variations in greenhouse cultivated with gerbera and relationship with external conditions. *Engenharia agrícola*, 31(5): 857-867.
- Boueri, M. e D. Lunardi. 2006. Avaliação de elementos agrometeorológicos no cultivo do cravo-de-defunto (*Tagetes sp.*) em ambiente protegido e a campo. *Energia na agricultura*, 21(3): 45-54.
- Bouzo, C.A., E.D. Astegiano y J.C. Favaro. 2003, abril. Procedimiento para predecir la necesidad de abonos en cultivos hortícolas. *FAVE*, 2(1-2):7-19.
- Brady, N. 1990. The nature and properties of soils. 10th ed. USA: Macmillan Publishing Company. 621p.
- Brady, N and R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 12th ed. USA: Prentice Hall. 881p.
- Campillo, R. y A. Sadzawka. 2006. La acidificación de los suelos: origen y mecanismos involucrados. Temuco, Chile: INIA. 17p.
- CEAC (Controlled Environment Agriculture Center). Growing Hydroponic Tomatoes. [En línea]. Arizona, EE.UU: University of Arizona. Recuperado en: <<http://ag.arizona.edu/hydroponictomatoes>>. Consultado el: 13 de abril de 2014.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1995. Requerimientos de clima y suelo para chacras y hortalizas. Santiago: Ministerio de Agricultura. 189p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1997. Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile: informe final. Chile: CIREN. 58p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2002. Estudio agrologico VI región. Chile: CIREN. 595p.
- CNBPA (Comisión Nacional de Buenas Prácticas Agrícolas) y Ministerio de Agricultura, Chile. 2003. Especificaciones técnicas de Buenas Prácticas Agrícolas: Hortalizas de fruto al aire libre. Chile: Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura. 48p.

Dexter, A. R. 2003. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 1(1): 201-214.

Echeverría, J. 1986. Fertilización del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en condiciones de invernadero. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Agronomía, Universidad Católica. 62p.

Escaff, M.; P. Estay; A. Bruna; P. Gil; R. Ferreyra; P. Maldonado. *et. al.* 2005. El cultivo del tomate bajo invernadero. (Bol. N° 128), INIA. La Cruz, Chile: INIA. 79p.

Escalona, V.; P. Alvarado; H. Monardes; C. Urbina y A. Martin. 2009. El cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). (Bol. N°1). Nudo hortícola. Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas. 12p.

Fassbender, H. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América latina. 2ª ed. San José, Costa Rica: IICA. 418p.

FIA (Fundación para la Innovación Agraria), Chile. 2009. Técnicas de producción hortícola en el sur de Chile. Santiago: Universidad Católica de Temuco, Escuela de Agronomía y Fundación para la Innovación Agraria (FIA). 130p.

Giaconi, V. y M. Escaff. 2001. Cultivo de Hortalizas. 15ª ed. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 337p.

Goykovic, V. y G. Saavedra. 2007, Septiembre – Diciembre. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA*, 25(3): 47-58.

Hach. 2005. Manual de procedimientos espectrofotómetro DR500. 2th ed. Germany: Hach Company. 846p.

Hartz, T. 2005. Manejo de fertilizantes para producción de tomates de alto rendimientos. (pp. 37 - 44) En: Seminario internacional en producción de tomates para procesamiento (13-14 de octubre de 2005, Santiago, Chile. Producción de tomate para procesamiento. Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 108p.

Havlin, J.L.; S.L.Tisdale; W.L. Nelson and J.D.; Beaton. 2013. Soil fertility and fertilizers: An Introduction to nutrient management. 8th ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall. 516p.

Holwerda, H. 2006. Guía de manejo nutrición vegetal especialidad tomate. Santiago, Chile: SQM S.A. 84p.

- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias), Chile. 2000. Seminario taller para productores: Técnicas de diagnóstico de fertilidad del suelo, fertilización de praderas, cultivos y mejoramiento de praderas. Santiago, Chile: INIA. 84p.
- Kirimi, JK., F.M. Itulya, and V.N. Mwaja. 2011, June. Effects of nitrogen and spacing on fruit yield of tomato. *African Journal of Agriculture Science*, 11(5): 50-60.
- Marschner, P. 2012. Mineral nutrition of higher plants. 3th ed. San Diego, USA: Elsevier. 651p.
- Meléndez, G. y E. Molina. 2002. Fertilización foliar: principios y aplicaciones. Costa Rica: Universidad de Costa Rica. 145p.
- Nájera, F., Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza and O. Salazar. 2015, November. Evaluation of soil fertility and fertilization practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(1): 84-97.
- Navarro, S. y G. Navarro. 2003. Química Agrícola. 2ª ed. Madrid: Mundi-Prensa. 487p.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2014. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://www.odepa.cl/superficie-cultivada-con-hortalizas-3/>>. Consultado el: 04 de Abril de 2017.
- Pearson, G. 1960, March. Tolerance of crops to exchangeable sodium. (Bull. N° 216), United States Department of Agriculture (USDA). Washington, U.S.A.: Agricultural Research Service. 6p.
- Quezada, C. 2012. Fundamentos de riego. Chillán: Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, departamento de Suelos y Recursos Naturales. 204p.
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección en Agricultura. 291p.
- Rojas, L. 2003, Enero-Febrero. Manejo básico del cultivo de tomate en invernadero. *Tierra Adentro*, 9(48): 18-21.
- Rojas, L. y V. Alfaro. 1995. Densidad de plantación en tomate y pepino ensalada. *Tierra adentro*, (3): 47-49.
- Ruiz, R. 1985. Respuesta del tomate para consumo fresco a la fertilización NKP y a la parcialización de la dosis de nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 46(4): 415-422.
- Sadzawka, A. 1990. Métodos de análisis de suelos. Estación Experimental La Platina. INIA. Serie La Platina. 130p.

- Sadzawka, A.; M. Carrasco; R. Grez; M. Mora; H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 164 p. (Serie actas INIA N° 34).
- Sadzawka, A.; M. Carrasco; R. Demanet; H. Flores; R. Grez; M. Mora. y A. Neaman. 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. 2ª Ed. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 139 p. (Serie Actas INIA N° 40).
- Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chillán. Chile: Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. 80p.
- Sainju, U., R. Dris and B. Singh. 2003, April. Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment*, 1(2): 176-184.
- Santiago, J., M. Mendoza, F. Borrego. 1998. Evaluación de tomate (*Lycopersicon esculentum*, MILL) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. *AGRONOMÍA MESOAMERICANA* 9(1) 59-65.
- Stevenson, F. J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2th ed. USA: John Wiley & Sons, INC. 497p.
- Stoner, A. 1971. Commercial production of greenhouse tomatoes, Agriculture Handbook n° 382. Washington D.C., USA: Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture. 35p.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2003. Plant physiology. 3 ed. UK, Sunderland: Sinauer Associates. 690p.
- Uribe, J.M.; R. Cabrera; A. de la Fuente y M. Peneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental. Santiago. Chile. 229p.
- Zambrano, A. 2009. Cultivo del tomate en invernadero. Colombia: Produmedios, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). 56p.

APENDICE I

Cuadro 16. Exchangeable Sodium Percentage (ESP) y Sodium Adsorption Ratio (SAR) de los invernaderos 1, 2 y 3.

Invernaderos	Fechas de muestreo		
	26 – 06 – 2014	11 – 12 – 2014	07 – 01 – 2015
	----- ESP (%) -----		
Invernadero 1	31	31	33
Invernadero 2	27	54	47
Invernadero 3	32	39	50
	----- SAR (%) -----		
Invernadero 1	1,4	2,0	1,7
Invernadero 2	1,3	2,8	2,5
Invernadero 3	1,6	2,3	3,1

APENDICE II

Cuadro 17. Concentración media de los nutrientes totales, por órgano de las plantas muestreadas.

Sitios	Fruto	Hoja	Tallo	Raíz
----- % N -----				
Invernadero 1	1,05 ± 0,64	1,98 ± 0,24	1,16 ± 0,40	2,42 ± 0,46
Invernadero 2	1,28 ± 0,43	1,46 ± 0,30	1,42 ± 0,35	2,01 ± 0,30
Invernadero 3	1,70 ± 0,97	1,88 ± 0,57	1,32 ± 0,17	1,71 ± 0,78
----- % P -----				
Invernadero 1	0,21 ± 0,05	0,25 ± 0,04	0,11 ± 0,04	0,22 ± 0,03
Invernadero 2	0,23 ± 0,03	0,35 ± 0,08	0,15 ± 0,03	0,19 ± 0,01
Invernadero 3	0,18 ± 0,04	0,21 ± 0,05	0,09 ± 0,03	0,10 ± 0,06
----- % K -----				
Invernadero 1	3,40 ± 0,52	0,55 ± 0,08	1,05 ± 0,29	0,73 ± 0,10
Invernadero 2	3,39 ± 0,41	0,80 ± 0,14	1,29 ± 0,32	0,53 ± 0,12
Invernadero 3	2,84 ± 0,55	0,63 ± 0,16	1,08 ± 0,26	0,42 ± 0,10
----- % S -----				
Invernadero 1	0,06 ± 0,04	0,75 ± 0,42	0,02 ± 0,01	0,03 ± 0,01
Invernadero 2	0,09 ± 0,04	1,09 ± 0,22	0,04 ± 0,02	0,02 ± 0,01
Invernadero 3	0,02 ± 0,02	1,14 ± 0,13	0,02 ± 0,01	0,04 ± 0,01
----- % Ca -----				
Invernadero 1	0,02 ± 0,03	4,40 ± 1,49	2,90 ± 2,04	5,60 ± 2,71
Invernadero 2	0,03 ± 0,03	5,24 ± 1,60	2,60 ± 1,03	3,89 ± 2,81
Invernadero 3	0,03 ± 0,04	5,61 ± 2,07	2,61 ± 1,51	3,41 ± 2,24
----- % Mg -----				
Invernadero 1	0,01 ± 0,05	0,60 ± 0,22	0,43 ± 0,42	2,45 ± 0,66
Invernadero 2	0,03 ± 0,04	0,66 ± 0,27	0,56 ± 0,48	2,62 ± 0,32
Invernadero 3	0,03 ± 0,05	0,67 ± 0,25	0,59 ± 0,14	3,05 ± 0,89
----- % Na -----				
Invernadero 1	0,01 ± 0,01	0,12 ± 0,21	0,33 ± 0,34	7,36 ± 0,21
Invernadero 2	0,01 ± 0,02	0,04 ± 0,08	0,19 ± 0,21	7,48 ± 0,28
Invernadero 3	0,00 ± 0,01	0,09 ± 0,20	0,44 ± 0,29	7,54 ± 0,13

APENDICE III

Cuadro 18. Fertilizantes por temporada del Invernadero 1

Fertilizantes	kg ha ⁻¹	Nutriente	%	kg ha ⁻¹
Mezcla 8-21-14	1.000	N	8	80 N
		P ₂ O ₅	21	210 P ₂ O ₅
		K ₂ O	14	140 K ₂ O
Nitrato de potasio	1.000	N	13	130 N
		K ₂ O	44	440 K ₂ O
Nitrato de calcio	250	N	15	37,5 N
		CaO	26	65 CaO
Nitrato de magnesio	200	N	10,5	21 N
		MgO	15	30 MgO
Ácido fosfórico	350	P ₂ O ₅	61	213,5 P ₂ O ₅

Cuadro 19. Fertilizantes por temporada de invernaderos 2 y 3

Fertilizantes	kg ha ⁻¹	Nutriente	%	kg ha ⁻¹
Nitrato de potasio	1.000	N	13	130 N
		K ₂ O	44	440 K ₂ O
Nitrato de calcio	600	N	15	90 N
		CaO	26	156 CaO
Nitrato de magnesio	500	N	10,5	52,5 N
		MgO	15	75 MgO
NovaTec Classic	6.00	N	12	72 N
		P ₂ O ₅	8	48 P ₂ O ₅
		K ₂ O	16	96 K ₂ O
		MgO	3	18 MgO
		S	10	60 S

Cuadro 20. Resumen fertilización por temporada total de los invernaderos 1, 2 y 3

Nutriente	Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 3
	----- kg ha ⁻¹ -----		
N	269	345	345
P ₂ O ₅	424	48	48
K ₂ O	580	536	536
S	0	60	60
CaO	65	156	156
MgO	30	93	93