



MANUAL DE MANEJO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN EN VIVEROS DE PLANTAS A RAÍZ CUBIERTA

MANUAL DE MANEJO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN EN VIVEROS DE PLANTAS A RAÍZ CUBIERTA¹

Eduardo Cartes Rodríguez, Manuel Acevedo Tapia, Marta González Ortega,
Carolina Álvarez Maldini, Pilar Mena Marín, Edison García Rivas²

**INSTITUTO FORESTAL
2019**

¹ Trabajo financiado por el Gobierno Regional del Maule. Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC). Proyecto: Uso y gestión eficiente del agua y nutrientes para la producción de plantas nativas y exóticas en viveros forestales de la Región del Maule.

² Instituto Forestal, Sede Biobío, Concepción. Centro Tecnológico de la Planta Forestal. <https://ctpf.infor.cl/> ecartes@infor.cl



INFOR

**Instituto Forestal
Sucre 2397 Ñuñoa
Santiago, Chile
F. 56 2 23667115
www.infor.cl**

**ISBN N° 978-956-318-148-7
Reg. Propiedad Intelectual N° A-300199**

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando se efectúe la cita correspondiente:

Cartes, Eduardo; Acevedo, Manuel; González, Marta; Álvarez, Carolina; Mena, Pilar y García, Edison, 2019. Manual de Manejo de Riego y Fertilización en Viveros de Plantas a Raíz Cubierta. Instituto Forestal Chile, Manual N° 51. P. 110

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
I. MANEJO DE RIEGO EN VIVEROS FORESTALES.....	9
1. IMPORTANCIA DEL AGUA	11
2. CALIDAD DEL AGUA.....	13
2.1. Medición de la calidad del agua	14
2.2. Toma de muestras para análisis químico de aguas.....	15
3. SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.....	17
3.1. Sistema de riego por aspersión superior	17
3.2. Caracterización de los sistemas de riego	23
4. CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR.....	35
4.1. Agua en el medio de crecimiento	35
4.2. Definición de criterios de riego y monitoreo de la humedad del sustrato	41
II. MANEJO DE FERTILIZACIÓN EN VIVEROS FORESTALES	49
1. IMPORTANCIA DE LA FERTILIZACIÓN.....	51
2. EFECTO DE LOS NUTRIENTES MINERALES EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	52
2.1. Absorción y utilización de nutrientes	52
3. MÉTODOS DE FERTILIZACIÓN PARA PLANTAS EN CONTENEDOR	57
3.1. Fertilizantes sólidos en el medio de crecimiento.....	57
3.2. Fertilizantes de lenta entrega y entrega controlada	58

3.3.	Inyección de solución de fertilizante en el agua de riego o fertirriego	59
4.	BALANCE DE SOLUCIONES NUTRITIVAS	61
4.1.	Balance nutricional para soluciones nutritivas personalizadas	62
4.2.	Balance nutricional con fertilizantes comerciales.....	81
III.	RECOMENDACIONES DE RIEGO Y FERTILIZACION DURANTE LAS FASES DE CRECIMIENTO DE PLANTAS EN VIVEROS FORESTALES.....	91
1.	FASE DE ESTABLECIMIENTO.....	93
2.	FASE DE PLENO CRECIMIENTO	96
3.	FASE DE ENDURECIMIENTO.....	98
4.	CONSOLIDANDO EL MANEJO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN PARA UN VIVERO	100
IV.	REFERENCIAS.....	107

INTRODUCCIÓN

En el país se producen en viveros forestales cerca de 192 millones de plantas anualmente, de las cuales cerca del 77% son viverizadas a raíz cubierta, en contenedores. Alrededor de 76 millones de plantas provienen de pequeños y medianos viveros, que son los principales proveedores de plantas para los pequeños y medianos propietarios forestales.

Tanto para especies nativas como exóticas, muchos de los sitios de reforestación se caracterizan por diversas limitaciones bióticas y abióticas que comprometen el éxito del establecimiento de plantaciones, razón por la que, desde el vivero y mediante el adecuado manejo de riego y fertilización, es posible mejorar los atributos morfo-fisiológicos de las plantas con el fin de aumentar la calidad de estas y asegurar una alta supervivencia en las condiciones de campo. Se ha observado, que el solo hecho de manejar riego y fertilización en base a criterios de demanda hídrica y de nutrientes, facilita viverizar plantas reduciendo el gasto de agua en un tercio de lo tradicionalmente utilizado en los viveros, manteniendo adecuados atributos de calidad de planta.

A pesar de los beneficios del manejo eficiente de agua y nutrientes, se ha comprobado que no todos los viveros manejan las labores de riego y fertilización en base a criterios de demanda hídrica y nutricional de las plantas, lo que implica una menor eficiencia en uso de agua y nutrientes, un aumento en los costos de producción y una mayor incidencia de musgos y enfermedades. Con el objeto de afrontar este problema se planteó el proyecto “Uso y gestión eficiente del agua y nutrientes para la producción de especies nativas y exóticas en viveros forestales de la Región del Maule”, para el Fondo de Innovación para la Competitividad del Gobierno Regional del Maule, financiado por este y ejecutado por profesionales del Centro Tecnológico de la Planta Forestal del Instituto Forestal (INFOR), desde junio de 2017 y por dos años.

En el desarrollo del proyecto se consideraron diversas actividades que beneficiaron a pequeños y medianos viveristas de la Región del Maule, mediante visitas de acompañamiento técnico, seminarios, instalación de unidades demostrativas en viveros asociados y cursos teóricos y prácticos, entre otros, cuyo fin era capacitar al viverista en el mejoramiento de las prácticas asociadas a las labores de riego y fertilización, para aumentar así la eficiencia en el uso de los recursos agua y nutrientes.

Igualmente se contempló la elaboración del presente manual que recopila la información técnica entregada durante las capacitaciones realizadas a los viveristas beneficiarios del proyecto, cuyo contenido le permitirá al lector conocer y aplicar las metodologías para monitorear,



gestionar y manejar, de manera práctica, económica y sencilla, el agua y nutrientes en su producción de plantas forestales.

Mediante el desarrollo de ejercicios prácticos incluidos en este manual, el viverista podrá llegar a hacer un uso eficiente de los recursos agua y nutrientes durante el proceso de viverización de plantas nativas y exóticas.

INFOR y los autores, agradecen al Gobierno Regional del Maule el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto y para la elaboración del presente manual, que se espera constituya una herramienta de gran utilidad para los viveristas para una exitosa producción de plantas.





I. MANEJO DE RIEGO EN VIVEROS FORESTALES

1. IMPORTANCIA DEL AGUA

El agua es el principal factor limitante del crecimiento en ecosistemas naturales y es el factor promotor del crecimiento en ecosistemas artificiales, como viveros e invernaderos. Su importancia ecológica refleja su importancia fisiológica, ya que casi todos los procesos de las plantas están directa o indirectamente afectados por el agua.

El agua influencia el crecimiento de las plantas de acuerdo a cuatro factores principales (Kramer, 1983):

- ❖ Es el mayor constituyente de las plantas, conformando entre el 80 y el 90% de su peso fresco.
- ❖ Es el “solvente universal” por lo que provee el transporte de nutrientes dentro de las plantas.
- ❖ Es un reactivo bioquímico en muchos procesos de las plantas, incluyendo la fotosíntesis.
- ❖ Es esencial para mantener la turgencia en las células de las plantas, promoviendo la expansión celular y su crecimiento.

Dentro de los sistemas de viverización de especies forestales, el contenido de agua en la planta es fundamental para asegurar su crecimiento y calidad final. El contenido de agua de las plantas se encuentra en constante cambio durante el día y el periodo de crecimiento. Así, cuando las pérdidas de este elemento por transpiración a través del follaje exceden la tasa de absorción de agua a través de las raíces, se crea una condición de tensión hídrica dentro de las plantas, lo que afecta negativamente su crecimiento.

La tensión hídrica es una condición fisiológica normal durante las horas del día, sin embargo, si esta tensión alcanza valores críticos por prolongados periodos de tiempo el crecimiento de las plantas disminuye, y eventualmente las puede llevar a la muerte. Durante la viverización de plantas, el estrés hídrico se mantiene en bajos niveles durante el periodo de crecimiento a través del manejo del riego para estimular el crecimiento.

En viveros forestales, determinar cómo, cuándo y cuánto regar es crucial para la organización de estos y para la planificación diaria. La falta de riego puede causar daño e incluso la muerte de las plantas en cualquier fase de su desarrollo. Por el contrario, el exceso de agua puede causar un aumento en la presencia de enfermedades (Mc Donald, 1984).

El riego adecuado es particularmente importante para plantas en contenedor, cuyas raíces no pueden acceder a agua más allá de las paredes de los contenedores, y por lo tanto son completamente dependientes del agua que reciben mediante el riego.

Un buen diseño y operación del sistema de riego es esencial para manejar un vivero exitosamente. Así, un buen diseño del sistema de riego será dependiente del entendimiento de las necesidades hídricas de las plantas y de los factores que afectan la disponibilidad de agua. Dentro de las principales consideraciones para un sistema de riego adecuado está asegurar una fuente de agua confiable y de buena calidad.



2. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua importante para el manejo de viveros y debe ser considerada prioritariamente en la evaluación del sitio para la instalación de nuevos viveros, ya que no existe una vía económica para mejorar la calidad del agua de riego.

El término “calidad de agua” puede tener diferentes significados, ya que es dependiente del uso que se le quiera dar. Así, para propósitos domésticos, factores como el color, sabor, turbidez, olor y concentración de elementos tóxicos determinan la calidad del agua, mientras que, para propósitos de riego, la calidad del agua está determinada por dos factores principales:

- ❖ Concentración y composición de sales disueltas (iones tóxicos y salinidad total).
- ❖ Presencia de hongos patógenos, semillas de malezas, algas y posible contaminación por pesticidas.

De acuerdo a lo anterior, la salinidad es considerada uno de los factores principales en la determinación de la calidad del agua para la producción de plantas. La presencia de sales puede ser beneficiosa o perjudicial, dependiendo de las características de los iones específicos involucrados, así como su concentración.

Por ejemplo, el nitrato de potasio (KNO_3) es un fertilizante y el K^+ y NO_3^- son considerados nutrientes, mientras que el cloruro de sodio (NaCl) representa iones perjudiciales (Na^+ y Cl^-) que pueden dañar e incluso matar el tejido de las plantas.

El conocimiento sobre los iones presentes y sus concentraciones es necesario para determinar la calidad del agua y a su vez la concentración de fertilizantes a utilizar.

Las sales presentes en el agua de riego pueden además afectar el crecimiento de las plantas de diferentes maneras. De acuerdo a Fuller y Halderman (1975) la salinidad tiene cuatro efectos principales:

- Altos niveles de salinidad en el agua disminuyen la disponibilidad de agua para el cultivo.
- Los iones de sodio disminuyen la permeabilidad del sustrato, que indica la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua.

- Algunos iones específicos pueden ser tóxicos para las plantas, tales como el sodio (Na), cloro (Cl) y boro (B).
- La disponibilidad de otros nutrientes puede ser alterada.

En relación al último punto, las altas tasas de fertilizantes utilizadas en viveros forestales en contenedor pueden empeorar los problemas de salinidad. Específicamente, coníferas como *Pinus radiata*, son extremadamente sensibles a daño por salinidad (Pezeshki ,1992; Ganatsas y Tsakalimi, 2007), siendo la disminución del crecimiento uno de los principales daños causados, problema que se desarrolla de manera inicial antes de que otros problemas foliares sean visibles.

Si bien no existen formas económicas para remover sales del agua de riego, prácticas culturales como el aumento en la porosidad del medio de crecimiento o un lavado del sustrato más frecuente puede ayudar a aliviar los daños causados por altos niveles de salinidad en el agua.

Ajustes en los niveles de fertilizantes de acuerdo a las sales presentes en el agua de riego son otra forma de evitar daños por salinidad en el cultivo.

2.1. Medición de la calidad del agua

Idealmente, la medición de la calidad de agua se debería realizar antes de la instalación del vivero y luego periódicamente (antes del inicio de las fertilizaciones de cada temporada), esto debido a que la adición de fertilizantes podría aumentar la salinidad a niveles inaceptables.

Sin embargo, si dichos análisis no se realizaron previamente a la instalación del vivero, el conocimiento de los niveles de salinidad es de utilidad para definir los esquemas de fertilización del vivero.

Los niveles de salinidad son evaluados usualmente y de manera sencilla mediante la utilización de un conductímetro (Figura 1), instrumento que entrega valores expresados como conductividad electrolítica (CE). A mayores niveles de salinidad, mayores serán los valores de CE (Cuadro 1).

La unidad de CE de acuerdo al Sistema Internacional de Unidades corresponde a microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$). El conductímetro solamente indica niveles de salinidad y no la presencia ni concentración de sales específicas.

Los niveles de salinidad y calidad de agua pueden también ser evaluados en laboratorios especializados, lo que incluye el análisis de la presencia y concentración de elementos como el sodio, cloro o boro, lo cual es expresado en partes por millón (*ppm*) (Cuadro 1).



Figura 1
CONDUCTIVÍMETRO EQUIPO UTILIZADO PARA EL MONITOREO DE LA
SALINIDAD DEL AGUA

Cuadro 1
ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA DE RIEGO EN VIVEROS FORESTALES

Propiedad	Óptimo	Aceptable	Inaceptable
pH	5,5 a 6,5		
Salinidad ($\mu S/cm$)	0 a 500	500 a 1500	>1500
Sodio (<i>ppm</i>)			>50
Cloro (<i>ppm</i>)			>70
Boro (<i>ppm</i>)			>0,75

(Fuente: Landis, 1989).

Se debe considerar que para el caso de fuentes de agua superficiales (esteros, canales, tranques), la calidad del agua de riego puede ser muy variable en el tiempo, dado que dependerá de la adición de posibles agentes contaminantes aguas arriba, tales como fertilizantes, pesticidas y residuos orgánicos, entre otros.

2.2. Toma de muestras para análisis químico de aguas

Es muy importante cuidar que la muestra obtenida para el análisis de calidad de agua sea representativa del agua utilizada para el riego, y mantener en todo momento la integridad de la muestra hasta su entrega en laboratorio. Esto asegurará la calidad de los resultados.

Un análisis químico de agua de riego deberá considerar al menos los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, macronutrientes (nitratos, amonios, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sulfatos), micronutrientes (hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobre, boro), aluminio, cloruros, carbonatos, bicarbonatos y la relación de absorción de sodio (RAS).

A continuación, se describe paso a paso la obtención de muestras de agua para análisis químico:

- **Paso 1:** Disponer de recipientes plásticos limpios y en buen estado (ejemplo: botellas de agua mineral). El lavado de estos recipientes se debe realizar utilizando la misma agua de riego que será muestreada, evitando el uso de detergentes y desechando el agua utilizada para este proceso. Importante: No utilizar envases de bebidas azucaradas.
- **Paso 2:** Se debe poner a funcionar el sistema de riego por un tiempo que al menos asegure que la obtención de la muestra será representativa del agua utilizada para riego. Se debe evitar la toma de muestras de aguas estancadas y/o retenidas en las tuberías del sistema de riego.
- **Paso 3:** Realizar la colecta de agua desde la salida de aspersores o punto de riego, en al menos 3 puntos diferentes dentro del sistema, obteniendo una muestra total de 2.000 ml (2L).
- **Paso 4:** Obtenida la muestra, esta debe ser enviada a análisis dentro de las siguientes 24 horas desde su colecta. La muestra debe ser almacenada en frío y oscuridad, hasta su entrega en laboratorio. Es posible refrigerar a 6°C, y utilizar hielo y/o gel de refrigeración y una heladera durante el traslado.
- **Paso 5:** Asegurar un correcto etiquetado de la muestra, indicando: lugar y fecha de colecta, fuente agua (puntera, pozo, tranque, canal) y el tipo de análisis a realizar (Ejemplo: análisis químico de aguas).

Es importante contactar previamente al laboratorio en donde se realizarán los análisis químicos de agua, solicitando el protocolo de toma de muestras y almacenamiento que indica el laboratorio, complementando las recomendaciones antes mencionadas.

3. SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

Los métodos para aplicar riego en viveros de plantas en contenedor dependen del tamaño del vivero y las características de las especies que se viverizan. Existen tres grandes tipos de sistemas de riego utilizados en viveros a raíz cubierta: aspersión superior, directa al contenedor de forma individual (incluyendo riego por goteo) y subirrigación.

El método de aspersión superior es el más utilizado en viveros a raíz cubierta, ya que los contenedores utilizados son muy pequeños para riego por goteo de contenedores individuales, mientras que la subirrigación inhibiría la poda radicular.

Por las razones indicadas, este punto estará enfocado exclusivamente en el sistema de riego por aspersión superior. Otros sistemas de riego pueden ser revisados en Landis (1989), Mathers *et al.* (2005) y Schmal *et al.* (2011).

3.1. Sistema de riego por aspersión superior

Una de las consideraciones básicas al utilizar este tipo de sistema de riego es que el agua debe ser aplicada de manera uniforme a todos los contenedores y/o cavidades. Además, cada cavidad contiene una planta en crecimiento que eventualmente producirá suficiente follaje para interceptar una fracción importante del agua de riego, evitando que este alcance el medio de crecimiento o sustrato.

Dentro de los sistemas de riego existen los sistemas fijos y móviles. Los sistemas móviles consisten en un sistema de riego corredizo, mientras que los sistemas fijos consisten en boquillas de riego instaladas a intervalos de distancia regulares. Al ser los sistemas fijos los más comunes en la producción de plantas forestales, en este punto se detallará solamente dicho sistema.

- Sistema de riego fijo aéreo

Los sistemas de riego por aspersión fijos consisten en una serie de líneas de riego instaladas de forma paralela, usualmente construidas de PVC u otro material de similares características, con aspersores dispuestos a intervalos de distancia regulares para formar una grilla de riego (Figura 2).

El correcto diseño, instalación y mantención de este sistema de riego es crucial para lograr un riego homogéneo dentro del vivero y para minimizar las pérdidas de agua.

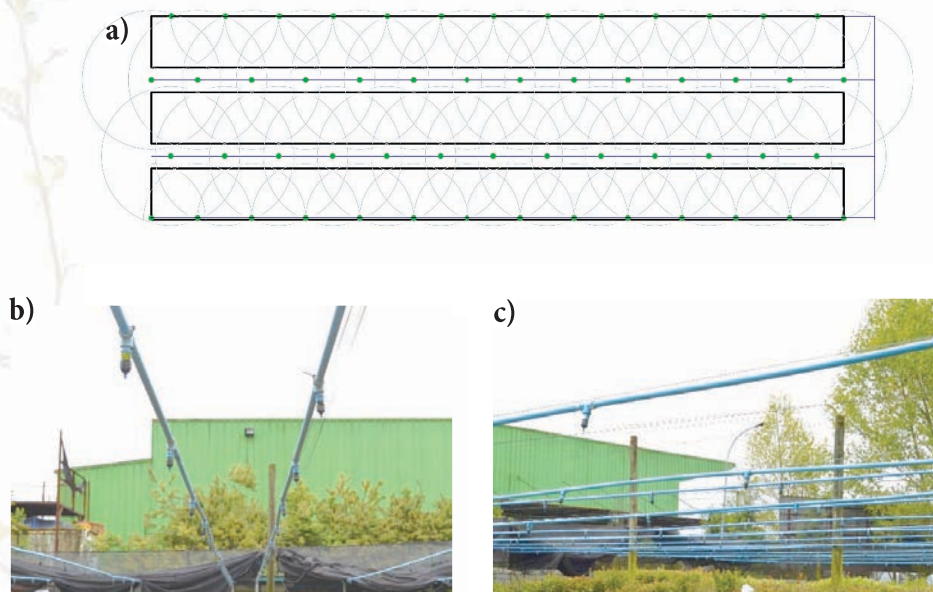


Figura 2
VISUALIZACIÓN DE COBERTURA TOTAL DE RIEGO CON ASPERSORES
A INTERVALOS REGULARES (a) Y SISTEMA DE RIEGO FIJO AÉREO (b
y c)

Generalmente la estructura de riego está dividida en “sectores de riego”, los cuales son diseñados dependiendo del número de aspersores que la bomba de riego pueda operar al mismo tiempo, y a la presión de riego recomendada para la correcta operación de los aspersores.

Los aspersores pueden tener distinto tipo de cobertura, tales como: círculo completo, medio círculo y un cuarto de círculo, además de diferentes caudales de aspersión, de esta manera se puede obtener una cobertura y traslape total del riego para cada sector que sea diseñado. Por ejemplo, un aspersor de medio círculo puede ser instalado en el borde del sector de riego para evitar pérdida de agua.

El tamaño de cada sector de riego puede ser diseñado de manera que las especies con diferentes crecimientos y, por tanto, diferentes requerimientos de riego, puedan distribuirse en distintos sectores de riego.

Algunas de las posibles desventajas de este sistema de riego se encuentran en:

- ❖ Falta de cobertura de riego uniforme, lo que puede ser evitado con un correcto diseño que asegure un adecuado traslape de riego entre los distintos aspersores.
- ❖ Desperdicio de agua por pérdidas entre pasillos de cada sector de riego.
- ❖ Pérdidas de agua por deriva. El sistema puede ser negativamente afectado por la deriva de agua causada por el viento. Sin embargo, un adecuado diseño del sistema de riego

debe considerar también un tamaño de gota acorde a las condiciones en las que se deberá operar el riego.

- ❖ Goteo de los aspersores por agua residual que permanece en las líneas de riego una vez finalizado este, lo que causa un goteo hacia las bandejas de producción que puede ser especialmente dañino durante la etapa de germinación, ya que semillas de pequeño tamaño pueden ser removidas desde los contenedores, y/o afectar a plántulas en germinación.

- Sistema de riego fijo basal

Los sistemas de irrigación basales son similares a los sistemas aéreos en términos de diseño y operación. De la misma manera que en el sistema aéreo, una grilla de riego construida con tubos PVC y aspersores son distribuidos de forma homogénea. Sin embargo, la principal diferencia es que dicha grilla está instalada en la base de las bandejas de cultivo y no sobre ellas (Figura 3).

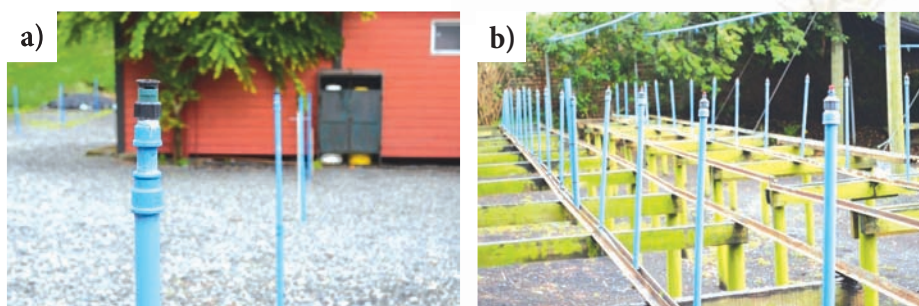


Figura 3
SISTEMA DE RIEGO FIJO BASAL, POSICIONADO DESDE EL SUELO (a)
Y SOBRE MESONES (b)

En este sistema de riego es posible utilizar aspersores que rotan por impacto (Figura 4). Estos aspersores rotan lentamente y pueden ser encontrados en gran variedad de tamaños y rangos de cobertura.

Sin embargo, debido a que el movimiento de estos aspersores es mediante el impacto causado por la presión del agua, el patrón de distribución de agua es particularmente dependiente de una presión apropiada.

Además, aspersores fijos como los utilizados en los sistemas de riego aéreo también son usados en los sistemas de riego basal.

Al igual que en los sistemas aéreos, un apropiado diseño, en relación a la instalación de los sectores de riego, distribución y tipo de aspersores es esencial para asegurar una buena distribución y traslape del riego y para minimizar las pérdidas excesivas de agua.



Figura 4
TIPOS DE ASPERSORES, ASPERSOR FIJO (a y b), MICRO ASPERSOR
(c y d), ASPERSOR POR IMPACTO (e y f)

- Consideraciones básicas para el diseño de sistemas de riego fijos

Uno de los principales objetivos al momento de diseñar el sistema de riego es lograr la mayor uniformidad en el riego y la disminución en las pérdidas de agua. Considerando los siguientes aspectos:

- ❖ Tipo de aspersor.

- ❖ Tamaño del orificio del aspersor, caudal del aspersor.
- ❖ Presión del agua a nivel del aspersor para un adecuado funcionamiento.
- ❖ Espaciamiento y patrón de irrigación de los aspersores.
- ❖ Incidencia del viento.

En viveros a raíz cubierta se deben seleccionar aspersores cuyo tamaño de gota sea lo suficientemente grande para penetrar el follaje de las plantas y minimizar la deriva a causa del viento, pero no tan grande como para causar daño debido a salpicaduras excesivas de las gotas de agua.

La presión del agua a nivel del aspersor tiene un efecto sobre el funcionamiento y eficiencia del mismo. Las especificaciones para un correcto funcionamiento dependen del tipo de aspersor, las cuales pueden ser obtenidas del fabricante. La presión del agua debe ser monitoreada regularmente con un manómetro montado permanentemente cerca de los aspersores (Figura 5). La importancia de la presión regular del agua no debe ser subestimada, ya que presiones muy altas o muy bajas pueden causar una distribución errática en los patrones de riego, generando diferencias en el crecimiento de las plantas.



Figura 5
MANÓMETRO INSTALADO EN LÍNEA DE RIEGO PARA EL MONITOREO
DE LA PRESIÓN DE LOS ASPERSORES

Una medida para asegurar una presión constante tanto en las matrices de distribución de riego como en los aspersores, es mediante la instalación de reguladores de presión (Figura 6). Estos reguladores permiten mantener la presión de salida constante, aunque existan variaciones en la presión de entrada.



Figura 6
REGULADOR DE PRESIÓN INSTALADO EN SECTOR DE RIEGO PARA
MANTENER CONSTANTE LA PRESIÓN EN LAS LÍNEAS DE RIEGO Y
ASPERSORES

Así, tanto el tipo de aspersión como la presión de agua afectan el tamaño de la gota. El tamaño de la gota disminuye a medida que disminuye el tamaño del aspersor y aumenta la presión del agua. Gotas que son muy grandes pueden causar daño físico mediante salpicadura durante la germinación, mientras que gotas demasiado pequeñas están sujetas a deriva por el viento y evaporación, sobre todo en climas cálidos y con alta presencia de vientos.

De acuerdo a Handreck y Black (1984) una gota con un diámetro entre 1 – 1,5 mm es recomendada para la mayoría de los viveros forestales.

Respecto del espaciamiento de los aspersores en sistemas de riego fijos, el tipo de aspersor y el efecto del viento deben ser considerados. Con el objetivo de obtener un riego lo más uniforme posible y con cobertura total del cultivo, los sistemas de riego deben ser diseñados de manera que se aseguren un traslape del riego entre los aspersores (Figura 2a). Los aspersores fijos no deben estar ubicados a una distancia mayor que el 50 o 65% del diámetro de cobertura de cada aspersor.

Muy a menudo, ubicar aspersores con mayor espaciamiento con el objetivo de reducir los costos de instalación del sistema de riego, puede tener efectos negativos en relación a la distribución de riego y aplicación de nutrientes, causando una disminución en las tasas de crecimiento e incluso mortalidad de plantas (Figura 7).



Figura 7
EFFECTOS DE UNA BAJA UNIFORMIDAD DE RIEGO SOBRE EL
DESARROLLO DE LAS PLANTAS

3.2. Caracterización de los sistemas de riego

Tanto sistemas de riego nuevos como los existentes deben ser evaluados constantemente para asegurar su correcto funcionamiento.

Entre las causas que provocan disminuciones en la eficiencia de distribución y uniformidad de riego son los aspersores tapados y/o desgastados que no funcionan apropiadamente (Figura 8).

Es recomendable realizar inspecciones visuales al sistema de riego durante su funcionamiento al aplicar cada riego y/o fertirriego, de esa forma es posible detectar de forma oportuna aquellos aspersores en los que resulta evidente un mal funcionamiento antes de generar daños irreversibles a las plantas.



Figura 8
ASPERSOR TAPADO

Es aconsejable además realizar de forma periódica pruebas de uniformidad de riego, en especial al inicio del manejo de riego y fertilización, y posterior a las labores de mantenimiento del sistema de riego. Esto con el objeto de identificar posibles necesidades de reparación e incluso modificación de los sistemas de riego existentes.

Además, determinar el gasto del sistema de riego permitirá, junto a la definición de un criterio de riego (cuándo regar), estimar los tiempos de riego necesarios (cuánto regar).

- Coeficiente de uniformidad de riego

Una forma útil para evaluar la variabilidad con la que un sistema de riego distribuye el agua sobre una superficie, es mediante la obtención del coeficiente de uniformidad de riego (Christensen 1942).

El coeficiente de uniformidad de riego se expresa en porcentaje, donde valores cercanos al 100% corresponden a sistemas de riego de alta uniformidad.

Por el contrario, valores menores al 100%, representan sistemas de riego menos uniformes y de mayor variabilidad en la dispersión del agua. Un resultado aceptable para la evaluación del coeficiente de uniformidad en un sistema de riego, es sobre el 80%.

Para la estimación del coeficiente de uniformidad de riego, se requiere de los siguientes materiales:

- ❖ Balanza, con precisión de 0,1 g.

- ❖ Recipientes plásticos de tamaño y peso regulares. Una buena alternativa es el uso de vasos de 100 ml utilizados usualmente para la toma de muestras médicas (para este fin no se requieren las tapas).
- ❖ Cronómetro.
- ❖ Marcador permanente.
- ❖ Toalla de papel.
- ❖ Papel y lápiz para tomar nota.

A continuación, se explica paso a paso el proceso para la obtención del coeficiente de uniformidad de riego.

- **Paso 1:** Asegurar que todos los recipientes se encuentren limpios y secos previamente a realizar la evaluación. Luego, con la ayuda de un marcador permanente rotular cada uno de los recipientes plásticos utilizando números correlativos (1, 2, 3, 4, 5, etc.). Posteriormente, pesar cada uno de los recipientes registrando su peso con la identificación de cada rótulo (Figura 9).

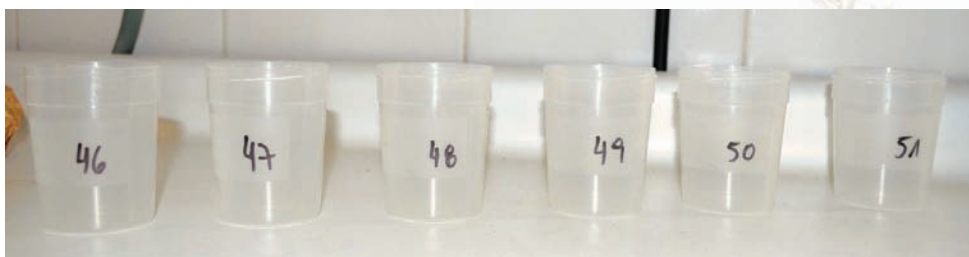


Figura 9
PREPARACIÓN DE RECIPIENTES PLÁSTICOS NUMERADOS

- **Paso 2:** Para el sector de riego que se desee evaluar, disponer de forma sistemática los recipientes a una altura equivalente a la ubicación de almacigueras y contenedores. Realizar un croquis de la ubicación de cada uno de los recipientes, identificado con su respectivo rótulo (Figura 10).



Figura 10
DISTRIBUCIÓN DE LOS RECIPIENTES PLÁSTICOS

- **Paso 3:** Regar el sector a evaluar y cronometrar el tiempo de riego. El tiempo de riego a considerar debiera permitir captar entre 10 y 20 *ml* de agua en cada uno de los recipientes.
- **Paso 4:** Recolectar los vasos desde el sector de riego, secar su exterior con papel evitando la pérdida de agua desde el interior, pesar cada recipiente y registrar su peso y su número. Utilizar balanza precisión de 0,1 g (Figura 11 y Cuadro 2).



Figura 11
SECADO (a) Y PESAJE (b) DE RECIPIENTES

Cuadro 2
PLANILLA DE CÁLCULO Y REGISTRO DE INFORMACIÓN PARA LA
OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD DE RIEGO

Sector de riego: _____ Tiempo de riego: _____ (min) Cantidad de recipientes (n): _____

Recipiente (N°)	Peso del recipiente (g)	Peso recipiente con agua (g)	Peso de agua X_i (g) *	Diferencia absoluta $ X_i - \bar{X} $ **
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
Promedio ($\bar{X}$)				
			Suma ($\sum X_i - \bar{X} $)	

*: El peso de agua = Peso del recipiente con agua – Peso del recipiente.

**: Diferencia absoluta (siempre un valor positivo) entre el valor observado X_i y el promedio ($\bar{X}$) del peso de agua.

- **Paso 5:** Obtener el peso de agua recolectado en cada uno de los vasos, para ello se debe descontar el peso del recipiente vacío (registrado en el paso 1) del peso del recipiente con agua acumulada durante el riego. Luego aplicar la siguiente ecuación para la obtención del coeficiente de uniformidad de riego (Ecuación 1):

Ecuación 1

$$CUR = \left[1 - \left(\frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}} \right) \right] \times 100$$

Donde:

CUR : Coeficiente de uniformidad de riego, en porcentaje (%).

X_i : Peso del agua del recipiente número “i”, en gramos (g).

$\bar{X}$: Promedio del peso del agua de los “n” recipientes, en gramos (g).

n: Número de recipientes utilizados para la prueba.

- Estimación del gasto del sistema de riego

Una de las formas más sencillas para la estimación de cuánta agua llega a los contenedores como aporte del sistema de riego, es realizar las estimaciones de volumen en razón de superficie regada y tiempo de funcionamiento del sistema de riego. Ejemplo de ello es estimar la cantidad de litros por metro cuadrado por cada hora de riego ($L/m^2/h$) o los milímetros de precipitación que son aplicados a los contenedores por cada hora de riego (mm/h). A partir de la información obtenida para el cálculo del coeficiente de uniformidad de riego (Ecuación 1) es posible realizar el cálculo del gasto de agua del sistema de riego. Para ello se utilizará el siguiente procedimiento:

- **Paso 1:** Utilizando un pie de metro, realizar la medición del diámetro interno superior de los recipientes utilizados para la determinación del coeficiente de Uniformidad de Riego (Figura 12). Es importante que todos los recipientes utilizados en la determinación del coeficiente de uniformidad de riego sean iguales.



Figura 12
MEDICIÓN DEL DIÁMETRO INTERNO DE RECIPIENTES

- **Paso 2:** Luego obtener el diámetro promedio de todos los recipientes. Se debe estimar el área de la sección superior promedio de los recipientes, utilizando la Ecuación 2:

Ecuación 2

$$A_{recipiente} = \frac{\pi}{4.000.000} \times d_{\bar{x}}^2$$

Donde:

$A_{recipiente}$: Área promedio sección superior del recipiente, metros cuadrados (m^2).

$d_{\bar{x}}$: Diámetro interno superior promedio de los recipientes, en milímetros (mm).

π : Constante numérica de valor 3,14159.

- **Paso 3:** Considerando la estimación del peso de agua promedio que es captado por los recipientes durante la evaluación del coeficiente de uniformidad ($\bar{X}$; obtenido desde el Cuadro 2), el área promedio de los recipientes ($A_{recipiente}$), y el tiempo por el cual se activó el sistema de riego durante la evaluación del coeficiente de uniformidad, se procede a obtener el gasto del sistema de riego (GSR) expresado en milímetros de precipitación por cada hora de riego (mm/h) utilizando la Ecuación 3:

Ecuación 3

$$GSR = \frac{0,06 \times \bar{X}}{A_{recipiente} \times T_{riego}}$$

Donde:

GSR : Gasto del sistema de riego, en milímetros de precipitación por cada hora de riego (mm/h).

$\bar{X}$: Promedio del peso del agua de los n recipientes, en gramos (g).

$A_{recipiente}$: Área promedio sección superior del recipiente, en metros cuadrados (m^2).

T_{riego} : Tiempo de riego durante la evaluación del coeficiente de uniformidad, en minutos (min).

Realizar las estimaciones del gasto de un sistema de riego, y expresarlo en milímetros de precipitación por cada hora de riego (mm/h) o la cantidad de litros por metro cuadrado por cada hora de riego ($L/m^2/h$), permitirá posteriormente determinar los tiempos de riego que serán necesarios para un determinado cultivo.

A continuación, se demuestra con un ejemplo real el cálculo del coeficiente de uniformidad y el gasto del sistema de riego.

- Caso práctico N°1: Caracterización de un sistema de riego

En un vivero se realizaron las pruebas para la caracterización del sistema de riego. Para ello se utilizaron 15 recipientes plásticos de 100 *ml*, los cuales se pesaron (utilizando balanza con precisión de 0,1 *g*) y se les midió el diámetro interno de la sección superior (utilizando pie de metro). Los datos recopilados de las mediciones se observan en el Cuadro 3 que registra un peso seco promedio de los recipientes de 9,94 *g* y un diámetro promedio interno de la sección superior ($d_{\bar{x}}$) de 55,36 *mm*.

Los sectores de riego dentro del vivero empleado para este ejemplo son de iguales características (superficie de riego y aspersores en cantidad, tipo, espaciamiento y distribución), por lo que se realizaron las pruebas en un sector de riego al que se denominó A.

Los recipientes plásticos fueron distribuidos a lo largo del sector de riego (Figura 13). Durante las pruebas se consideró un tiempo de riego de 15 *min*.

Cuadro 3
PESO SECO Y DIÁMETRO INTERNO DE LA SECCIÓN SUPERIOR DE
LOS RECIPIENTES CASO PRÁCTICO N° 1

Recipiente (N°)	Peso recipiente (<i>g</i>)	Diámetro interno superior (<i>mm</i>)
1	9,8	55,36
2	10,1	55,38
3	10,1	55,36
4	9,8	55,30
5	10,1	55,43
6	9,8	55,36
7	9,8	55,37
8	9,7	55,40
9	10,3	55,33
10	9,7	55,35
11	10,0	55,40
12	9,8	55,37
13	9,8	55,36
14	9,8	55,31
15	10,5	55,32
Promedio	9,94	55,36

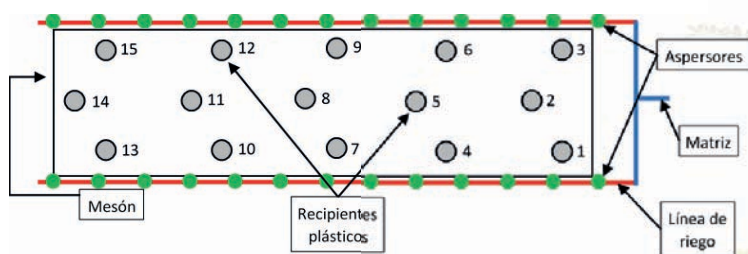


Figura 13
DISTRIBUCIÓN DE RECIPIENTES EN CASO PRÁCTICO N° 1

Tras los 15 minutos de riego se procedió al secado del exterior de los recipientes y posteriormente se registró su peso (con agua al interior), con precisión de 0,1 g, utilizando el formulario indicado en el Cuadro 2, y se realizó el registro de la información obtenida, de forma de proceder con los cálculos para la caracterización del sector de riego. En el Cuadro 4 se realizó el cálculo del peso del agua captada por cada uno de los recipientes, para ello al peso registrado correspondiente al recipiente con agua en su interior se le restó el peso del recipiente seco obtenido previamente. Luego, se obtuvo el promedio del agua contenida en los vasos.

Cuadro 4
PESO DE AGUA CAPTADO EN LOS RECIPIENTES. CASO PRÁCTICO N°1

Sector de riego: A Tiempo de riego: 15 (min) Cantidad de recipientes (n): 15

Recipiente (N°)	Peso recipiente (g)	Peso recipiente con agua (g)	Peso de agua X_i (g)	Diferencia absoluta $ X_i - \bar{X} $
1	9,8	18,9	$(18,9 - 9,8) = 9,1$	
2	10,1	19,0	$(19,0 - 10,1) = 8,9$	
3	10,1	18,9	$(18,9 - 10,1) = 8,8$	
4	9,8	17,1	$(17,1 - 9,8) = 7,3$	
5	10,1	19,0	$(19,0 - 10,1) = 8,9$	
6	9,8	18,1	$(18,1 - 9,8) = 8,3$	
7	9,8	20,0	$(20,0 - 9,8) = 10,2$	
8	9,7	20,3	$(20,3 - 9,7) = 10,6$	
9	10,3	18,8	$(18,8 - 10,3) = 8,5$	
10	9,7	19,5	$(19,5 - 9,7) = 9,8$	
11	10,0	22,0	$(22,0 - 10,0) = 12,0$	
12	9,8	18,7	$(18,7 - 9,8) = 8,9$	
13	9,8	21,3	$(21,3 - 9,8) = 11,5$	
14	9,8	21,4	$(21,4 - 9,8) = 11,6$	
15	10,5	22,3	$(10,5 - 22,3) = 11,8$	
Promedio ($\bar{X}$)			9,747 $\approx$ 9,75	
			Suma ($\sum X_i - \bar{X} $)	

Continuando con los cálculos para la obtención del coeficiente de uniformidad de riego, se obtendrá la suma de la diferencia absoluta del agua captada de cada recipiente y el promedio de agua captada entre todos los recipientes ($\sum |X_i - \bar{X}|$) (Cuadro 5). Al peso del agua de cada recipiente se le resta el valor promedio del peso del agua ($\bar{X}$), al ser este un valor absoluto, si la resta tiene como resultado un valor negativo, se considera como un valor positivo. Finalmente, se calcula la suma de todos los valores de la última columna.

Cuadro 5
DIFERENCIA ABSOLUTA DEL AGUA CAPTADA DE CADA RECIPIENTE
Y EL PROMEDIO DE AGUACAPTADA EN TODOS LOS RECIPIENTES.
CASO PRÁCTICO N° 1

Sector de riego: A Tiempo de riego: 15 (min) Cantidad de recipientes (n): 15

Recipiente (N°)	Peso recipiente (g)	Peso recipiente con agua (g)	Peso de agua X_i (g)	Diferencia absoluta $ X_i - \bar{X} $
1	9,8	18,9	9,1	$ 9,1 - 9,75 = 0,65$
2	10,1	19,0	8,9	$ 8,9 - 9,75 = 0,85$
3	10,1	18,9	8,8	$ 8,8 - 9,75 = 0,95$
4	9,8	17,1	7,3	$ 7,3 - 9,75 = 2,45$
5	10,1	19,0	8,9	$ 8,9 - 9,75 = 0,85$
6	9,8	18,1	8,3	$ 8,3 - 9,75 = 1,45$
7	9,8	20,0	10,2	$ 10,2 - 9,75 = 0,45$
8	9,7	20,3	10,6	$ 10,6 - 9,75 = 0,85$
9	10,3	18,8	8,5	$ 8,5 - 9,75 = 1,25$
10	9,7	19,5	9,8	$ 9,8 - 9,75 = 0,05$
11	10,0	22,0	12,0	$ 12,0 - 9,75 = 2,25$
12	9,8	18,7	8,9	$ 8,9 - 9,75 = 0,85$
13	9,8	21,3	11,5	$ 11,5 - 9,75 = 1,75$
14	9,8	21,4	11,6	$ 11,6 - 9,75 = 1,85$
15	10,5	22,3	11,8	$ 11,8 - 9,75 = 2,05$
Promedio ($\bar{X}$)			9,747 $\approx$ 9,75	
Suma ($\sum X_i - \bar{X} $)				18,55

Utilizando la Ecuación 1 y los cálculos realizados en los Cuadros 4 y 5 se obtiene el coeficiente de uniformidad de riego (CUR):

$$CUR = \left[1 - \left(\frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n \times \bar{X}} \right) \right] \times 100$$

$$CUR = \left[1 - \frac{18,55}{15 \times 9,75} \right] \times 100$$

$$CUR = \left[1 - \frac{18,55}{146,25} \right] \times 100$$

$$CUR = [1 - 0,127] \times 100$$

$$CUR = 0,873 \times 100$$

$$CUR = 87,3\%$$

El coeficiente uniformidad de riego estimado para el sector A del vivero es de un 87,3%, situándose dentro de un rango deseable de uniformidad. Sin embargo, es recomendable la revisión de los aspersores cercanos a los recipientes 4, 11 y 15, en los cuales la cantidad de agua recibida se aleja de la media estimada de 9,75 g de agua (Figura 13).

A continuación, muestra el cálculo del gasto del sistema de riego, para lo cual es necesario calcular inicialmente el área interna de la sección superior de los recipientes plásticos de acuerdo a la Ecuación 2. Además, es necesario contar con el diámetro interno de los recipientes, que de acuerdo al Cuadro 3 es de 55,36 mm.

$$A_{\text{recipiente}} = \frac{\pi}{4.000.000} \times d_{\bar{x}}^2$$

$$A_{\text{recipiente}} = \frac{3,14159}{4.000.000} \times 55,36^2$$

$$A_{\text{recipiente}} = \frac{3,14159}{4.000.000} \times 55,36^2$$

$$A_{\text{recipiente}} = 0,000000785 \times 55,36^2$$

$$A_{\text{recipiente}} = 0,000000785 \times 3.064,73$$

$$A_{\text{recipiente}} = 0,0024058 \text{ m}^2$$

Finalmente, para la estimación del gasto de agua, se utiliza la Ecuación 3, el resultado obtenido anteriormente del área del recipiente y el tiempo de riego (T_{riego}) de 15 minutos.

$$GSR = \frac{0,06 \times \bar{X}}{A_{\text{recipiente}} \times T_{\text{riego}}}$$

$$GSR = \frac{0,06 \times 9,75}{0,0024058 \times 15}$$


$$GSR = \frac{0,585}{0,036087}$$

$$GSR = 16,21 \text{ mm}/h$$

Para el sistema de riego caracterizado se puede indicar que el gasto de agua es de 16,21 L/m^2 por cada hora de funcionamiento, o 16,21 mm/h , realizando un riego con un coeficiente de uniformidad del 87,3%.

4. CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR

La determinación de cuándo regar, depende en gran medida del monitoreo de humedad del medio de crecimiento. Si bien, este monitoreo puede suponer algunas dificultades operacionales y trabajo adicional, su realización es de absoluta necesidad, ya que el volumen y almacenamiento de agua de los contenedores son limitados, y esto puede inducir a niveles de estrés hídrico rápidamente, afectando el adecuado desarrollo de las plantas.

Dentro de los factores que afectan la disponibilidad de agua para el consumo de la planta se encuentran el tipo de sustrato, el volumen del contenedor, la fase de crecimiento de la planta, y factores climáticos como viento y temperatura, los que en su conjunto determinarán cuándo y cuánto regar.

4.1. Agua en el medio de crecimiento

- Funciones del medio de crecimiento

El tipo de sustrato utilizado como medio de crecimiento influye en la cantidad de agua disponible para la planta y la tasa de pérdida de humedad a través del tiempo (evaporación).

El medio de crecimiento tiene cuatro funciones principales:

- ❖ **Soporte físico:** Si bien parece obvio, el medio de crecimiento debe ser lo suficientemente poroso como para permitir el crecimiento de las raíces y así dar soporte a la planta. Esto es especialmente crítico durante la germinación, ya que las plantas son más frágiles y necesitan soporte físico que les permita crecer de forma vertical para realizar la fotosíntesis.
- ❖ **Aireación:** Las raíces de las plantas necesitan oxígeno, para convertir los fotosintatos de las hojas en energía para que las raíces puedan crecer y absorber agua y nutrientes. Este proceso es llamado respiración aeróbica (Taiz y Zieger 2006) y requiere un abastecimiento constante de oxígeno, mientras que el producto de este proceso es el dióxido de carbono que debe ser dispersado a la atmósfera. Este intercambio gaseoso se lleva a cabo en los poros más grandes del medio de crecimiento (macroporos).

- ❖ **Abastecimiento de agua:** Los medios de crecimiento poseen poros más pequeños, llamados microporos, que son capaces de almacenar agua entre sus partículas. Esta agua abastecerá a la planta durante su proceso de viverización.
- ❖ **Abastecimiento de nutrientes minerales:** Los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas son obtenidos desde el medio de cultivo a través de la absorción radicular. Los nutrientes minerales se encuentran en el medio en forma de iones cargados positivamente (cationes), entre los que se incluyen el amonio (NH_4^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), entre otros. Estos cationes son atraídos a cargas negativas del medio de crecimiento, presentes en los microporos. La capacidad de un medio de crecimiento para absorber estos cationes se denomina capacidad de intercambio catiónico (CIC).

En relación a las funciones anteriormente mencionadas, el compost de corteza de pino radiata cumple efectivamente con los objetivos de un medio de cultivo apropiado. Un compost de buena calidad y con un nivel de porosidad adecuado, posee una distribución de macro y microporos apropiada para la retención de agua y minerales, y la oxigenación del sistema radicular. Además, al ser un medio de crecimiento inerte, que no contiene nutrientes minerales, permite regular la entrega de nutrientes en cantidades deseadas mediante la fertilización, lo que se complementa con altos valores de capacidad de intercambio catiónico. Estas características, hacen que el compost de corteza de pino sea el medio de crecimiento más utilizado por viveristas forestales.

- **Determinación de la retención de humedad del medio de crecimiento**

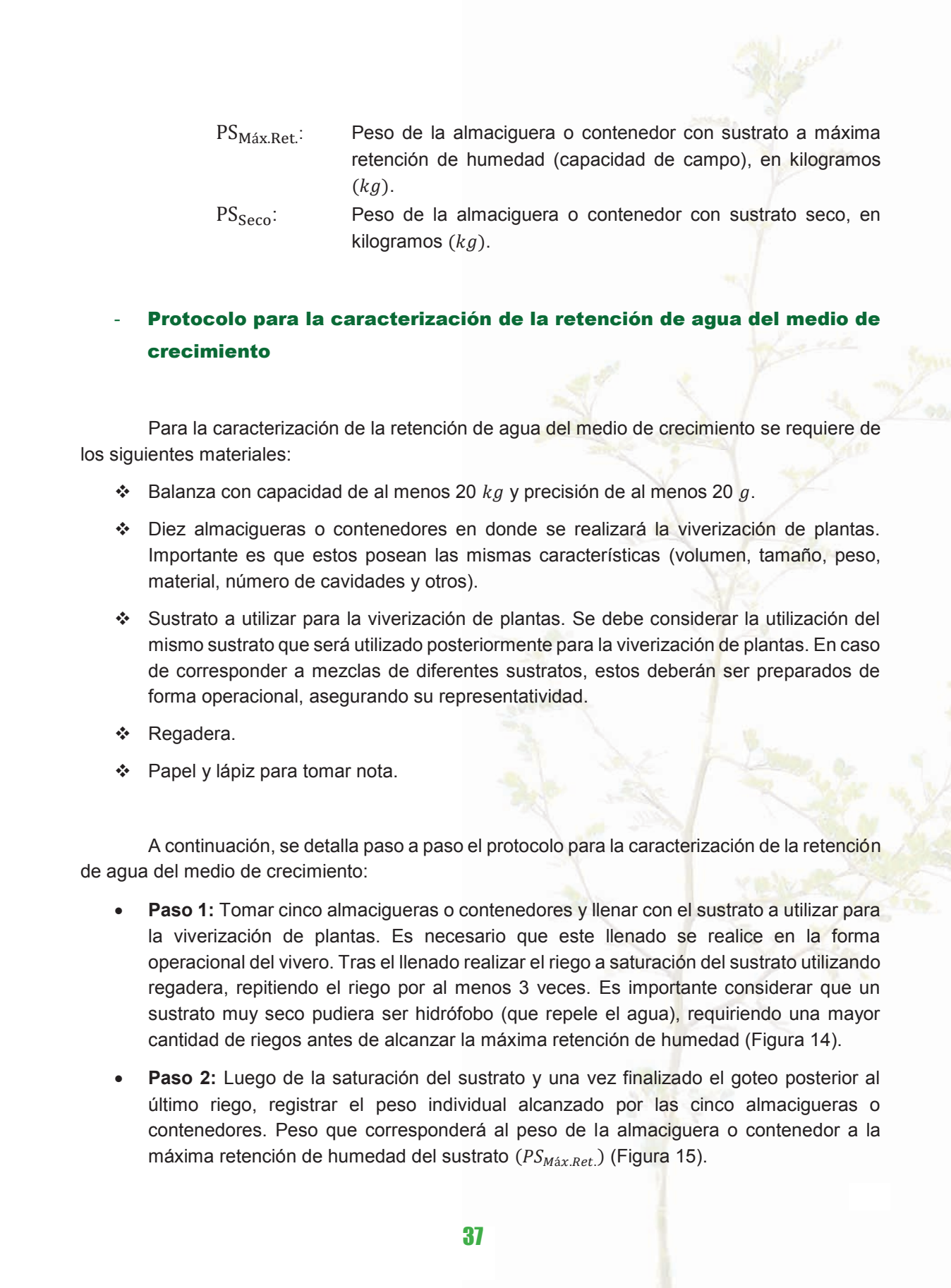
Una correcta caracterización del medio de crecimiento debe determinar su capacidad de retención de agua, de modo de contar con la información suficiente y necesaria para definir el manejo de riego en un vivero. Una manera sencilla de conocer cuánta agua es capaz de retener un determinado sustrato es mediante la diferencia de pesos que se genera entre un sustrato en condiciones de máxima retención de humedad (o capacidad de campo) y el peso seco del mismo sustrato (Ecuación 4).

Ecuación 4

$$RAS = PS_{M\acute{a}x.Ret.} - PS_{Seco}$$

Donde:

RAS: Retención de agua del sustrato, en kilogramos o litros (*kg* o *L*).



$PS_{Máx.Ret.}$:	Peso de la almaciguera o contenedor con sustrato a máxima retención de humedad (capacidad de campo), en kilogramos (<i>kg</i>).
PS_{Seco} :	Peso de la almaciguera o contenedor con sustrato seco, en kilogramos (<i>kg</i>).

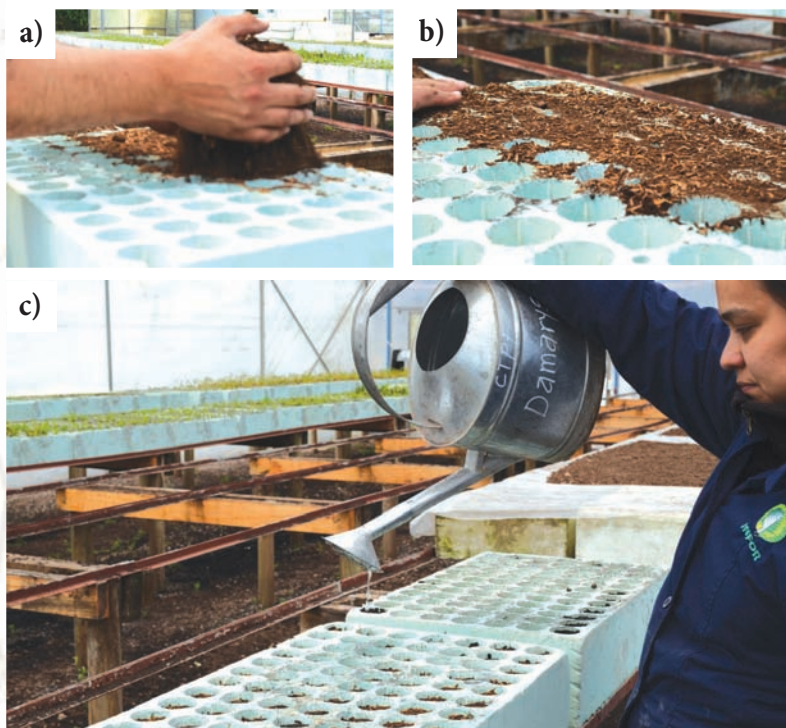
- **Protocolo para la caracterización de la retención de agua del medio de crecimiento**

Para la caracterización de la retención de agua del medio de crecimiento se requiere de los siguientes materiales:

- ❖ Balanza con capacidad de al menos 20 *kg* y precisión de al menos 20 *g*.
- ❖ Diez almacigueras o contenedores en donde se realizará la viverización de plantas. Importante es que estos posean las mismas características (volumen, tamaño, peso, material, número de cavidades y otros).
- ❖ Sustrato a utilizar para la viverización de plantas. Se debe considerar la utilización del mismo sustrato que será utilizado posteriormente para la viverización de plantas. En caso de corresponder a mezclas de diferentes sustratos, estos deberán ser preparados de forma operacional, asegurando su representatividad.
- ❖ Regadera.
- ❖ Papel y lápiz para tomar nota.

A continuación, se detalla paso a paso el protocolo para la caracterización de la retención de agua del medio de crecimiento:

- **Paso 1:** Tomar cinco almacigueras o contenedores y llenar con el sustrato a utilizar para la viverización de plantas. Es necesario que este llenado se realice en la forma operacional del vivero. Tras el llenado realizar el riego a saturación del sustrato utilizando regadera, repitiendo el riego por al menos 3 veces. Es importante considerar que un sustrato muy seco pudiera ser hidrófobo (que repele el agua), requiriendo una mayor cantidad de riegos antes de alcanzar la máxima retención de humedad (Figura 14).
- **Paso 2:** Luego de la saturación del sustrato y una vez finalizado el goteo posterior al último riego, registrar el peso individual alcanzado por las cinco almacigueras o contenedores. Peso que corresponderá al peso de la almaciguera o contenedor a la máxima retención de humedad del sustrato ($PS_{Máx.Ret.}$) (Figura 15).



LLENADO DE ALMACIGUERAS (a y b) Y RIEGO A SATURACIÓN DEL SUSTRATO (c)



Figura 15
PESAJE DE ALMACIGUERAS CON SUSTRATO A LA MÁXIMA
RETENCIÓN DE HUMEDAD

- **Paso 3:** En forma paralela, tomar sustrato suficiente para cinco almacigueras y disponerlo para un secado al aire distribuyéndolo en una delgada capa, y en una condición de sombra con buena ventilación. Dejar secar el sustrato hasta una condición de seco al tacto. Este proceso puede tomar algunos días, dependiendo de la humedad inicial del sustrato (Figura 16).



Figura 16
SECADO AL AIRE DEL SUSTRATO PARA ESTIMACIÓN DE LA
HUMEDAD DE RETENCIÓN

- **Paso 4:** Una vez seco el sustrato, tomar cinco almacigueras o contenedores y sellar los orificios de drenaje utilizando cinta adhesiva. Llenar las almacigueras o contenedores con el sustrato seco, utilizando los protocolos operacionales del vivero. Luego registrar el peso seco de cada almaciguera, el cual corresponderá al peso de la almaciguera o contenedor con sustrato seco (PS_{Seco}) (Figura 17).

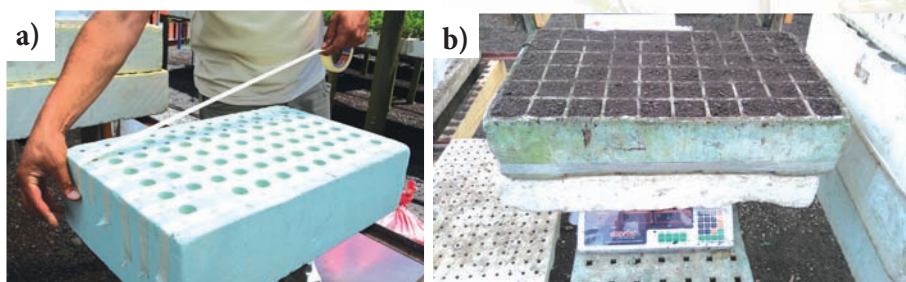


Figura 17
SELLADO DE ALMACIGUERAS (a) Y PESAJE CON SUSTRATO SECO (b)

Con los valores obtenidos en los pasos dos y cuatro es posible calcular la retención de agua del sustrato utilizando la Ecuación 4. Este procedimiento se muestra a continuación mediante el caso práctico N°2.

- Caso Práctico N° 2: Caracterización de la retención de humedad del sustrato

En un vivero se realizaron las pruebas para la caracterización de la humedad del sustrato. Para ello se utilizaron 10 almacigueras de poliestireno expandido de 130 *ml* y 84 cavidades, las cuales fueron llenadas con compost de corteza de pino radiata, utilizando los protocolos de llenado del vivero (con un golpe contra el piso a 50 *cm* de altura para la compactación del sustrato).

Luego cinco de las almacigueras fueron regadas a saturación, para ello se realizaron cuatro instancias de riego, realizando riegos a saturación en cada una de ellas. Una vez finalizado el goteo de las almacigueras y tras cada riego, se registró el peso alcanzado correspondiente al peso del sustrato a máxima retención de humedad ($PS_{Máx.Ret.}$).

El sustrato contenido en las otras cinco almacigueras fue vaciado sobre una cubierta plástica y dispuesto bajo la sombra, formando una delgada capa de entre uno y dos centímetros, donde se dejó secar hasta la condición de seco al tacto.

Una vez finalizado el secado del sustrato, se realizó el sellado de los orificios de drenaje de las almacigueras, para luego realizar el llenado con el sustrato seco y registrar su peso (PS_{Seco}).

La información recopilada, se observa en el Cuadro 6.

Cuadro 6
REGISTRO DE PESO DE ALMACIGUERAS CON SUSTRATO A MÁXIMA
RETENCIÓN DE HUMEDAD Y SUSTRATO SECO

Almaciguera (N°)	Peso de almaciguera con sustrato seco (<i>kg</i>) (PS_{Seco})	Peso de almaciguera tras riegos a saturación (<i>kg</i>) ($PS_{Máx.Ret.}$)			
		Riego 1	Riego 2	Riego 3	Riego 4
1	5,610	8,500	8,900	9,300	9,380
2	5,560	8,400	8,760	9,320	9,230
3	5,530	8,350	8,740	9,200	9,220
4	5,530	8,250	8,850	9,240	9,230
5	5,620	8,200	8,720	9,200	9,210
Promedio	5,570	8,340	8,794	9,252	9,254

En el Cuadro 6 es posible observar que el peso máximo tras los eventos de riego se obtiene tras los riegos 3 y 4, de tal modo que el peso de la almáciguera con sustrato a máxima retención de humedad correspondería al peso promedio de las almacigueras registrado entre ambos riegos, es decir aproximadamente 9,250 *kg*. El peso de las almacigueras con sustrato seco, es en promedio 5,570 *kg*. Con esta información y a partir de la Ecuación 4, se obtiene la cantidad de agua que es capaz de retener el sustrato.

$$RAS = PS_{Máx.Ret.} - PS_{Seco}$$

$$RAS = 9,250 - 5,570$$

$$RAS = 3,680 \text{ kg}$$

4.2. Definición de criterios de riego y monitoreo de la humedad del sustrato

- Cuándo regar

Dada la caracterización de retención de humedad del sustrato, es posible definir los criterios de riegos a utilizar durante la viverización de plantas.

Estos criterios de riegos permiten conocer la frecuencia de riego y la dosis de agua a aplicar en cada evento de riego y/o fertirriego.

De esta forma, un criterio de riego se define como la cantidad mínima de agua contenida en el sustrato antes de una labor de riego y/o fertirriego, representada por una fracción porcentual de la *RAS* (Retención de Agua del Sustrato).

Por ejemplo, en el caso práctico N° 2 se obtuvo que la *RAS* para el compost de corteza de *Pinus radiata* en almacigueras de poliestireno expandido de 130 *ml* y 84 cavidades, es de 3,680 *kg*, es decir que para un criterio de riego de un 50 %, el sustrato deberá contener el 50% de la *RAS* antes de realizar un evento de riego y/o fertirriego, es decir 1,840 *kg* de agua.

Finalmente, considerando el peso de la almáciguera o contenedor con sustrato seco (PS_{Seco}) (Paso 4, del Protocolo para la caracterización de la retención de agua del medio de crecimiento), el criterio de riego es posible expresarlo como el peso que debe alcanzar una almáciguera o contenedor con un sustrato que contiene un porcentaje de la *RAS* (Ecuación 5).

De este modo, la frecuencia de riego estará dada por la tasa de pérdida de agua desde la almáciguera o contenedores, la cual deberá ser monitoreada mediante el pesaje de las almacigueras dentro del vivero (Figura 18).

$$PCR_{X\%} = PS_{seco} + \frac{X\%}{100} \times RAS$$

Donde:

$PCR_{X\%}$: Peso almaciguera a un criterio riego de un $X\%$, en kilogramos (kg).

PS_{seco} : Peso almaciguera con sustrato seco, en kilogramos (kg).

$X\%$: Porcentaje del criterio de riego objetivo, en porcentaje (%).

RAS : Retención de agua del sustrato, en kilogramos (kg).



Figura 18
MONITOREO PARA FRECUENCIA DE RIEGO MEDIANTE EL PESAJE
BANDEJAS

Existen dos formas para considerar el monitoreo de peso de almacigueras o contenedores dentro del vivero. Una de ellas es mediante la utilización de una balanza tradicional (no resistente a la intemperie) que deberá ser trasladada hasta las bandejas de monitoreo cada instancia de medición. Otra opción es la instalación de balanzas de acero inoxidable en el vivero, con las cuales se monitoreará permanentemente el peso de las almacigueras y solo requerirá el chequeo visual de cada una de ellas en cada instancia de medición.

- Caso Práctico N°3: Estimación de criterios de riego y monitoreo de humedad

En el caso práctico N°2 se obtuvo que una almaciguera de poliestireno expandido de 130 ml y 84 cavidades con sustrato compost de corteza de pino radiata, tiene un peso con sustrato seco de 5,570 kg y tras la saturación del sustrato en su máxima retención humedad un peso de 9,250 kg (Cuadro 6). Usando esta información, se realiza la estimación de los criterios de riegos para el 60%, 50% y 40% de la humedad de retención (Cuadro 7).

Cuadro 7
ESTIMACIÓN DE CRITERIOS DE RIEGO

Criterio riego (X%)	Peso almaciguera sustrato con seco (kg) (PS_{Seco})	Retención de agua del sustrato (kg) (RAS)	Peso de almaciguera para un determinado criterio de riego (kg) $PCR_{X\%} = PS_{Seco} + \left(\frac{X\%}{100} \times RAS\right)$
60	5,570	3,680	$= 5,570 + \left(\frac{60}{100} \times 3,680\right) = 7,778 \approx 7,780$
50	5,570	3,680	$= 5,570 + \left(\frac{50}{100} \times 3,680\right) = 7,410$
40	5,570	3,680	$= 5,570 + \left(\frac{40}{100} \times 3,680\right) = 7,042 \approx 7,050$

Para un criterio de riego del 60%, un evento de riego y/o fertirriego se deberá realizar cuando las almacigueras monitoreadas alcancen un peso promedio de 7,780 kg.

La necesidad de riego estará dada por las tasas de evapotranspiración de agua desde las bandejas y no por la sistematización del riego.

Alcanzado el peso correspondiente al criterio de riego, se deberá aportar la cantidad de agua necesaria para llegar al peso descrito como el peso de la almaciguera a máxima retención de humedad del sustrato, en este caso equivalente a aproximadamente 1,470 kg de agua para el criterio de riego del 60 % (Cuadro 8).

Cuadro 8
APORTES DE AGUA NECESARIOS PARA UN EVENTO DE RIEGO Y/O
FERTIRRIGACIÓN TRAS ALCANZAR UN DETERMINADO CRITERIO DE
RIEGO SEGÚN CASO PRÁCTICO N°3

Criterio riego (X%)	Peso de almaciguera para un determinado criterio de riego (kg) ($PCR_{X\%}$)	Peso de almaciguera con sustrato a máxima retención de humedad (kg) ($PS_{Máx.Ret.}$)	Aporte de agua necesario ($PS_{Máx.Ret.} - PCR_{X\%}$) (kg)
60	7,780	9,250	= 9,250 – 7,780 = 1,470
50	7,410	9,250	= 9,250 – 7,410 = 1,840
40	7,050	9,250	= 9,250 – 7,050 = 2,200

- **Cuánto regar**

Es recomendable que tras cada evento de riego se logre alcanzar el punto de máxima retención de humedad del sustrato o bien un punto cercano al mismo. Para esto es necesario tener presente la caracterización del sistema de riego (gastos del sistema de riego y coeficientes de uniformidad de riego), la caracterización de la retención de humedad del sustrato y la definición de los criterios de riego a utilizar en el vivero.

La interrogante de cuánto regar, debe ser resuelta en cada vivero, donde las dosis y frecuencias de riego dependerán tanto del tipo de sustrato como del tamaño de contenedor, las tasas de evapotranspiración del cultivo en producción, el sistema de riego de cada vivero, y el esquema de manejo establecido por el viverista para una especie en particular o grupo de estas.

Tradicionalmente el volumen de riego está dado por la cantidad de agua que debe ser repuesta durante un evento de riego y/o fertirriego.

Es posible expresar dicho requerimiento, como el tiempo durante el cual debe estar en funcionamiento un determinado sistema de riego. Es así como la dosis de riego estará dada por la Ecuación 6.

Ecuación 6

$$TR_{CR_{X\%}} = \frac{0,6 \times CUR}{S \times GSR} \times AR_{CR_{X\%}}$$

Donde:

$TR_{CRX\%}$:	Tiempo de funcionamiento del sistema de riego, para un determinado criterio de riego, en minutos (<i>min</i>).
$AR_{CRX\%}$:	Cantidad de agua de riego necesaria para llevar una almaciguera o contenedor desde un determinado criterio de riego al peso de máxima retención de humedad del sustrato, en kilogramos o litros (<i>kg o L</i>).
CUR :	Coefficiente de uniformidad de riego, en porcentaje (%).
S :	Superficie de almaciguera o contenedor, en metros cuadrados (m^2).
GSR :	Gasto del sistema de riego ($L/m^2/h$) correspondiente al aporte de una hora de funcionamiento del sistema de riego.

- Caso Práctico N°4: Estimación de los tiempos de riego

Empleando la información obtenida en los casos prácticos anteriores (N°1, N°2 y N°3), se estima los tiempos de riego para cada uno de los criterios de riego (60%, 50% y 40%) (Cuadro 9).

Para la caracterización del sistema de riego se obtuvo un coeficiente de uniformidad de riego $CUR = 87,3\%$ y un gasto del sistema de riego $GSR = 16,2 \text{ mm}$.

Tras la medición de algunas almacigueras de 130 *ml* y 84 cavidades se determinó que su largo y ancho corresponden a 0,64 *m* y 0,39 *m*, respectivamente (Figura 19), por lo que su superficie es de 0,2496 m^2 .

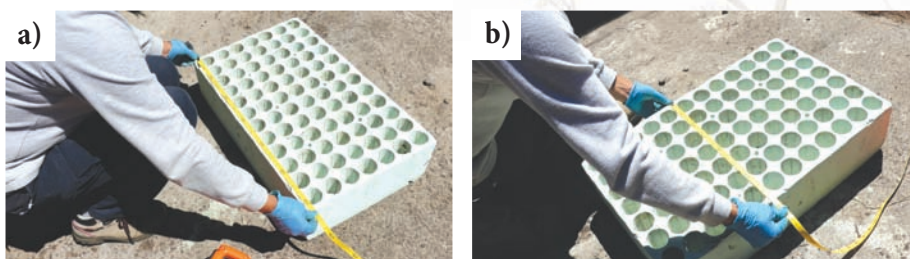


Figura 19
MEDICION DE LARGO (a) Y ANCHO (b) DE ALMACIGUERAS DE
POLIESTIRENO EXPANDIDO

Cuadro 9
ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE RIEGO

Criterio riego (%)	Aporte de agua necesario (kg) $AR_{CRX\%}$	Tiempo riego para un determinado criterio de riego (min) $TR_{CRX\%} = \frac{0,6 \times CUR}{S \times GSR} \times AR_{CRX\%}$
60	1,470	$= \frac{0,6 \times 87,3}{0,2496 \times 16,2} \times 1,470 = \frac{52,38}{4,04} \times 1,470$ $12,95 \times 1,470 = 19,03 \approx 19$
50	1,840	$= 12,95 \times 1,840 = 23,82 \approx 24$
40	2,200	$= 12,95 \times 2,200 = 28,49 \approx 29$





II MANEJO DE FERTILIZACIÓN EN VIVEROS FORESTALES

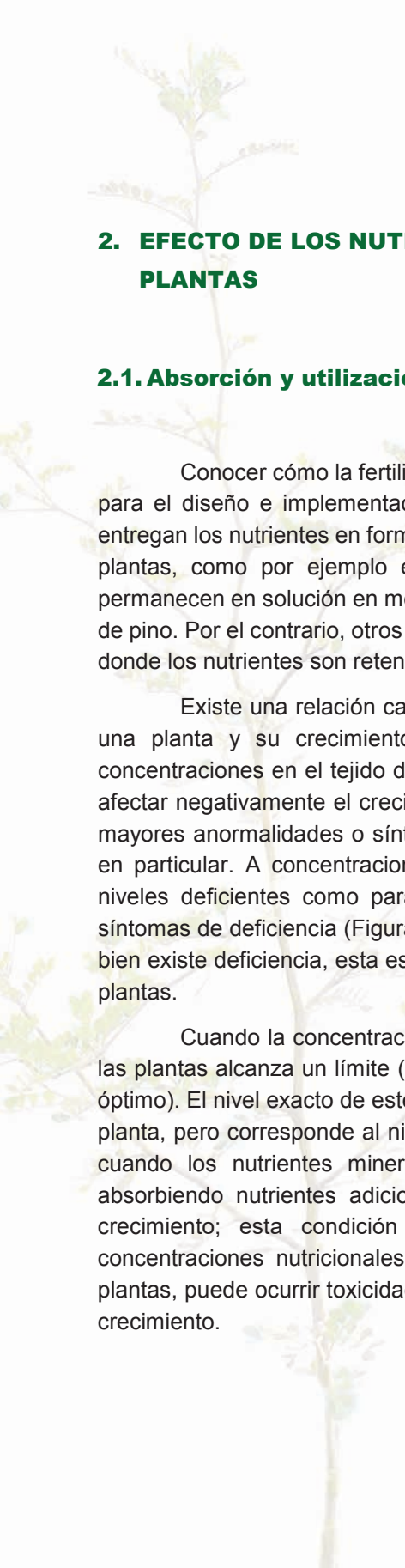
1. IMPORTANCIA DE LA FERTILIZACIÓN

La nutrición mineral, tanto para la calidad como para la cantidad del crecimiento de plantas en contenedor, es de gran importancia. La fertilización controla tanto la tasa de crecimiento de plantas en contenedor, al igual que el riego. El viverista puede manejar la tasa de crecimiento de la planta aplicando los nutrientes adecuados en las concentraciones correctas (Escobar, 2007).

Los beneficios de agregar sustancias minerales al suelo o medio de cultivo para mejorar el crecimiento de las plantas han sido conocidos por más de 2.000 años. La fertilización de plantas en contenedor tiene como principal objetivo entregar los elementos minerales esenciales para el crecimiento, que no se encuentran disponibles en sustratos inertes, como es caso del *compost* de corteza de *Pinus radiata*. Estos minerales cumplen con tres características que los hacen esenciales:

- ❖ La omisión del elemento resulta en crecimiento anormal, falla en completar el ciclo de vida o muerte prematura de la planta.
- ❖ La función de dicho elemento es específica, no reemplazable por otro elemento.
- ❖ El elemento ejerce un efecto directo en el crecimiento de la planta y su metabolismo, es componente de un constituyente de la planta, como una enzima; o es requerido para un proceso metabólico específico, tal como una reacción enzimática.

Los nutrientes esenciales pueden ser clasificados como macronutrientes, que son utilizados por las plantas en altas cantidades, y como micronutrientes, que son requeridos en bajas cantidades. Además, dentro de los nutrientes esenciales se encuentran el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O), pero estos son absorbidos por la planta a través del agua y el dióxido de carbono del aire y no a través de fertilización. Dentro de los macronutrientes se encuentran: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y silicio (Si). Mientras que entre los micronutrientes están: cloro (Cl), hierro (Fe), boro (Bo), manganeso (Mn), sodio (Na), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) y molibdeno (Mo) (Epstein, 1999).



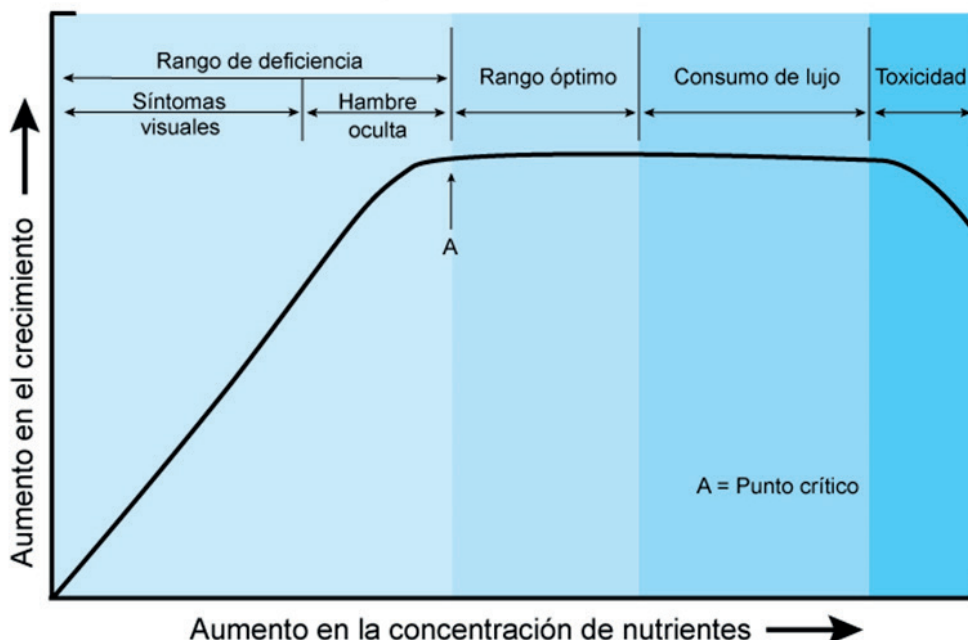
2. EFECTO DE LOS NUTRIENTES MINERALES EN EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

2.1. Absorción y utilización de nutrientes

Conocer cómo la fertilización afecta el crecimiento de plantas en contenedor es esencial para el diseño e implementación de un programa de fertilización en vivero. Los fertilizantes entregan los nutrientes en forma de iones, los que son absorbidos por el sistema radicular de las plantas, como por ejemplo el amonio (NH_4^+) y el sulfato (SO_4^{2-}). Estos iones minerales, permanecen en solución en medios de crecimiento inertes como el caso del compost de corteza de pino. Por el contrario, otros sustratos no inertes, poseen cargas negativas en su superficie en donde los nutrientes son retenidos hasta que son absorbidos por el sistema radicular.

Existe una relación característica entre la concentración de un nutriente en el tejido de una planta y su crecimiento (Figura 20). Cuando un nutriente está presente en bajas concentraciones en el tejido de la planta, se encuentra en condiciones deficientes que pueden afectar negativamente el crecimiento. A mayor deficiencia de un nutriente, las plantas exhiben mayores anomalías o síntomas de deficiencia que son característicos para cada nutriente en particular. A concentraciones ligeramente mayores, los nutrientes aún se encuentran en niveles deficientes como para afectar negativamente el crecimiento, pero no para mostrar síntomas de deficiencia (Figura 20). Esta condición es llamada “hambre oculta” debido a que, si bien existe deficiencia, esta es difícil de diagnosticar únicamente a partir de los síntomas en las plantas.

Cuando la concentración de nutrientes aumenta y ya no es limitante, el crecimiento de las plantas alcanza un límite (Figura 20), que corresponde al nivel nutricional adecuado (rango óptimo). El nivel exacto de este óptimo varía dependiendo del nutriente y de las demandas de la planta, pero corresponde al nivel en donde se alcanza el máximo crecimiento. Posteriormente, cuando los nutrientes minerales están presentes en exceso, las plantas pueden seguir absorbiendo nutrientes adicionales, aunque ya no exista un incremento significativo en el crecimiento; esta condición se denomina “consumo de lujo”. Finalmente, cuando las concentraciones nutricionales alcanzan niveles extremadamente altos en los tejidos de las plantas, puede ocurrir toxicidad de nutrientes lo que también afecta negativamente las tasas de crecimiento.



(Fuente: Modificado de Landis, 1989)

Figura 20
RELACIÓN ENTRE EL CRECIMIENTO DE PLANTA Y EL CONTENIDO DE
NUTRIENTES EN EL TEJIDO

- Síntomas de deficiencia nutricional

Un abastecimiento inadecuado de un elemento esencial resulta en un desorden nutricional manifestado a través de síntomas característicos de deficiencia. Estos síntomas pueden ser útiles para el diagnóstico de deficiencia de nutrientes minerales, pero muchos síntomas (por ejemplo: clorosis) pueden ser causados por la deficiencia de diversos nutrientes, lo que hace que el diagnóstico visual de las deficiencias sea altamente inexacto.

Sin embargo, otro factor para relacionar un síntoma de deficiencia a un elemento esencial en particular es el grado en el cual un elemento puede ser reciclado dentro de las plantas desde hojas más viejas hacia hojas juveniles. Algunos elementos, tales como nitrógeno, fósforo y potasio, pueden ser movilizados fácilmente entre las hojas; otros, como el boro, hierro y calcio, son relativamente inmóviles en casi todas las especies (Cuadro 10).

Si un elemento esencial es móvil, los síntomas de deficiencia tienden a aparecer primero en hojas viejas. Por el contrario, la deficiencia de elementos no móviles será evidente en hojas nuevas.

Cuadro 10
ELEMENTOS MINERALES CLASIFICADOS EN BASE A SU MOVILIDAD
DENTRO DE LA PLANTA Y SU TENDENCIA A SER RETRANSLOCADOS
DURANTE DEFICIENCIAS

Elementos Móviles	Elementos Inmóviles
Nitrógeno	Calcio
Potasio	Azufre
Magnesio	Hierro
Fósforo	Boro
Cloro	Cobre
Sodio	
Zinc	
Molibdeno	

De manera visual es posible observar e identificar las deficiencias nutricionales (Cuadro 11). Sin embargo, hay que tener en consideración que una vez que los síntomas de deficiencia son visibles, una cantidad considerable de crecimiento puede haber sido afectada negativamente, como consecuencia del hambre oculto (Figura 20).

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los síntomas de deficiencia son evidentes solo cuando la deficiencia de algún elemento esencial es significativa. Además, como se observa en el Cuadro 11, muchos síntomas de deficiencia son similares entre los diferentes elementos, lo que dificulta la detección del elemento deficitario.

En consecuencia, el diagnóstico visual debe ser una referencia y siempre será necesario corroborar con un análisis químico de laboratorio.

El método más recomendado para detectar deficiencias de elementos minerales específicos es realizar análisis nutricionales de las plantas en producción.

Estos análisis se pueden realizar durante el proceso de viverización de plantas, a modo de diagnóstico, y esto permitirá conocer el estado nutricional de las plantas y detectar posibles deficiencias, que podrán ser corregidas mediante fertilizaciones complementarias.

Además, es posible realizar análisis nutricionales al final del período de viverización de plantas, para caracterizar el estado nutricional y poder corroborar que se alcanzaron los niveles nutricionales deseados.

Para realizar análisis nutricionales en plantas perennes, que no pierden sus hojas en invierno, es necesario tomar muestras de plantas representativas de cada especie. Luego, se removerán las hojas y se pesarán hasta alcanzar el peso requerido, lo cual depende de las exigencias de cada laboratorio. Las hojas se almacenarán en bolsas de papel, rotulando en su exterior las características de la muestra tales como la especie y fecha de la toma de muestra. Posteriormente, las bolsas con las muestras en su interior serán secadas en un horno a 60°C

por 48 h, para finalmente enviar las muestras secas al laboratorio indicando el tipo de análisis a realizar.

En el caso de plantas caducas, aquellas especies que pierden sus hojas en temporada de invierno, las muestras para caracterización del estado nutricional al final de la temporada de crecimiento corresponderán a la planta completa incluyendo tallo y raíz. Mientras que, en análisis nutricional con objetivo de diagnóstico al inicio de la temporada y durante el proceso de producción, la muestra estará compuesta por follaje.

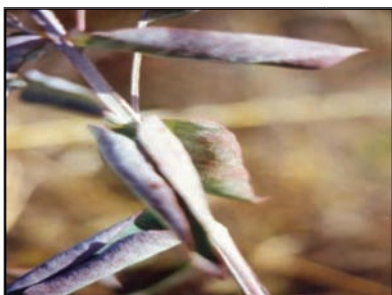
Cuadro 11
SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA DE ELEMENTOS ESENCIALES EN
PLANTAS DE VIVERO

Elemento	Aspecto	Descripción
N Nitrógeno		Clorosis seguida por un estancamiento en crecimiento. Follaje de menor tamaño. Follaje más viejo es el primero en presentar síntomas.
P Fósforo		Plantas presentan enanismo. Síntomas foliares varían entre especies, con colores desde verde pálido a amarillo y morado.
K Potasio		Follaje de menor tamaño, con clorosis y hojas verdes en la base. En casos severos se observa color morado y necrosis.

(Fuente: Modificado de Landis ,1989 y Escobar, 2007)

Cuadro 11 (Continuación)

Ca
Calcio



Clorosis y abarquillamiento en hojas juveniles.

En casos graves las yemas terminales pueden morir.

Es común observar ápices radiculares de color café y con mortalidad.

Mg
Magnesio



Se observa clorosis entre las venas de las hojas.

También se observa color amarillo o naranja en la punta de las hojas que en casos severos puede llegar a necrosis.

S
Azufre



Follaje con clorosis o amarillo. Las hojas juveniles son las más afectadas.

Fe
Fierro



Se observa clorosis en follaje juvenil.

En casos severos el color puede ser de amarillo brillante hasta blanco.

(Fuente: Modificado de Landis ,1989 y Escobar, 2007)

3. MÉTODOS DE FERTILIZACIÓN PARA PLANTAS EN CONTENEDOR

Existen tres métodos básicos para aplicar fertilizantes en viveros de plantas en contenedor:

- ❖ Incorporación de fertilizantes sólidos en la superficie del medio de crecimiento.
- ❖ Incorporación de fertilizantes de lenta entrega directamente en el medio de crecimiento.
- ❖ Inyección de una solución de fertilizante líquido en el agua de riego (fertilirriego).

Si bien este manual se enfocará específicamente en la metodología para aplicar la fertilización a través del fertilirriego, se explicará brevemente en que consiste cada una de las metodologías mencionadas.

3.1. Fertilizantes sólidos en el medio de crecimiento

Es la metodología más utilizada en plantas en contenedores de gran tamaño, específicamente en plantas ornamentales. Dentro de las ventajas que presenta esta metodología está que no es necesario contar con equipamiento de inyección de fertilizantes, existe un bajo costo y una escasa dificultad en labores de mezcla de fertilizantes, y los niveles nutricionales pueden ser mantenidos durante los meses húmedos, cuando el riego no es requerido.

También existen desventajas al incorporar fertilizantes sólidos en el medio de crecimiento, tales como la imposibilidad de controlar la concentración y balance nutricional en el medio de crecimiento, y la dificultad para obtener una distribución homogénea del fertilizante en todas las áreas del vivero, especialmente en contenedores pequeños (Landis, 1989).

Una de las principales ventajas de la producción de plantas en contenedor es precisamente que el crecimiento puede ser controlado a través de todas las fases de crecimiento de las plantas. El completo control sobre la entrega de todos los minerales esenciales es la herramienta más efectiva disponible para los viveristas, pero este control es sacrificado cuando este método de fertilización es aplicado.

Así, cuando un fertilizante sólido es agregado al medio de crecimiento que se encuentra húmedo, este puede adherirse a las partículas húmedas del sustrato, provocando que el fertilizante no sea mezclado adecuadamente y disminuya su disponibilidad para la planta.

3.2. Fertilizantes de lenta entrega y entrega controlada

Si bien lenta entrega y entrega controlada son términos muchas veces utilizados bajo un mismo significado, ya que ambos son fertilizantes granulares que involucran la liberación gradual en el tiempo de nutrientes hacia la planta, existen diferencias entre ellos. Inicialmente, los fertilizantes de lenta entrega liberan los nutrientes de manera más gradual en comparación a los fertilizantes sólidos discutidos anteriormente, sin embargo, las tasas de liberación de los nutrientes en fertilizantes de lenta entrega dependen de factores ambientales como humedad, temperatura, pH y actividad microbiana, que se encuentran fuera del control del viverista. Por el contrario, los fertilizantes de entrega controlada se encuentran cubiertos por un polímero o resina (dependiendo del fabricante), que restringe el contacto del fertilizante con la humedad y permite una liberación gradual en el tiempo.

Las ventajas del uso de este tipo de fertilizantes son similares a los fertilizantes sólidos antes comentados, incluyendo la gradualidad en la entrega de los elementos minerales. Recientemente estos fertilizantes se han adaptado a la industria forestal aumentando el período de entrega de nutrientes hasta 16 y 24 meses, asegurando un abastecimiento de nutrientes durante todo el ciclo de viverización (Benson, 1997) y eventualmente este abastecimiento puede continuar luego del traspaso a condiciones de campo.

Consecuentemente, el uso de fertilizantes de entrega controlada provee una opción de bajo costo y simple de administrar, y a su vez permite un control relativo en el abastecimiento de nutrientes durante todo el período de crecimiento.

Una desventaja de este tipo de fertilizantes es que, a pesar de la larga duración en la liberación de nutrientes, estos son liberados en una proporción mayor durante las primeras fases de crecimiento de las plantas, cuando estas son pequeñas y el requerimiento nutricional es bajo (Huett y Gogel, 2000), lo que puede agotar rápidamente el fertilizante y promover altos niveles de salinidad durante esta etapa de producción, lo que incluso puede llegar a causar daño radicular y afectar negativamente el crecimiento de las plantas.

Existen variados tipos de fertilizantes de entrega controlada que difieren en los elementos minerales presentes y su concentración, la tasa de entrega de nutrientes y el tiempo de duración, entre otros. Estos factores deben ser considerados de acuerdo a las especificaciones de cada fabricante y seleccionar de acuerdo a los requerimientos de cada vivero (Rose, 2002).

3.3. Inyección de solución de fertilizante en el agua de riego o fertirriego

Este es el método más utilizado y recomendado para la producción de plantas en contenedor. Los beneficios son considerables e incluyen aspectos como el control preciso de la concentración y el balance de los elementos minerales aplicados en el agua de riego, la posibilidad de cambiar completamente el esquema de fertilización en cualquier momento de la producción de plantas, y un muy bajo riesgo de aplicar fertilizantes en exceso disminuyendo los daños por salinidad.

Si bien esta metodología es altamente recomendada, existen ciertos requerimientos que pueden ser desventajosos para pequeños viveros, como la necesidad de un equipo de inyección especializado y un mayor costo asociado al mezclado frecuente y aplicación de fertilizantes. Un sistema de riego bien diseñado, es esencial para asegurar una aplicación homogénea del fertilizante.

El sistema de aplicación de fertirriego, que involucra una configuración de bomba y tanque, es una forma económica y simple para aplicar fertilizantes (Figura 21). Este sistema consiste en un tanque de mezclado, en donde los fertilizantes son mezclados a la concentración deseada y una bomba que inyecta la solución en el sistema de riego.

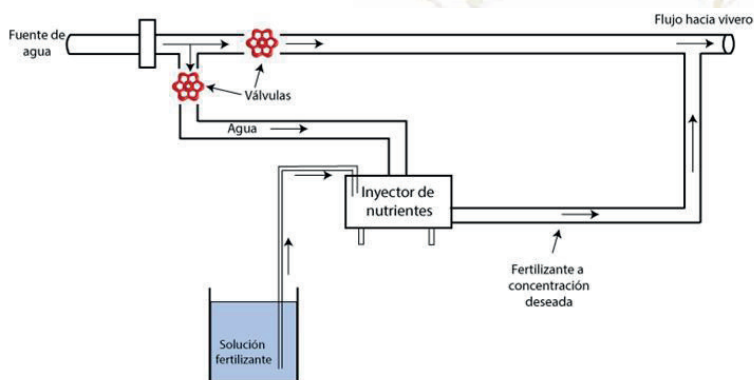


Figura 21
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE SISTEMA DE INYECCIÓN DE
FERTILIZANTE PARA VIVEROS DE PLANTAS EN CONTENEDOR

De manera similar, un sistema económico y eficiente para realizar la fertilización, corresponde a un recipiente de 200 L (o mayor volumen), en el cual se prepara la solución a la concentración deseada, y mediante una configuración de una bomba de 0,5 hp, tubos de PVC y manguera (Figura 22) es posible realizar la aplicación de nutrientes.

Este último sistema se emplea en forma operacional en algunos viveros con capacidad de producción cercana al medio millón de plantas con excelente resultado. Al igual que cualquier sistema de riego o fertilización, sea este manual o automático, la homogeneidad de la aplicación es un aspecto fundamental, por lo que la destreza del operador de sistema en la aplicación es muy importante.



Figura 22
CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS PARA LA APLICACIÓN DE SOLUCIÓN
FERTILIZANTE (a y b) Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN PARA PLANTAS
EN BOLSAS O EN ALMACIGUERAS (c y d)

Como se mencionó anteriormente, el fertirriego es el método más común y permite un mayor control de la concentración de elementos nutricionales y su tasa de entrega, lo que a su vez entrega mayor versatilidad para manejar el estado nutricional de las plantas en contenedor.

Es por esto que a continuación se explicará en detalle la metodología para el balance nutricional.

4. BALANCE DE SOLUCIONES NUTRITIVAS

La fertilización en viveros en contenedor tiene como principal objetivo entregar los macro y micronutrientes necesarios para la planta y así cumplir con los objetivos esperados para la producción de plantas de calidad.

Si bien la concentración nutricional adecuada de las plantas depende de factores como la especie y el sitio de establecimiento de estas, la norma chilena de calidad de plantas (NCh2957/0 de 2006) y Landis (1989) han entregado información respecto a concentraciones nutricionales deseables (Cuadro 12), que pueden ser utilizadas como referencia.

Cuadro 12
CONCENTRACIONES DE MACRO Y MICROELEMENTOS EN PLANTAS

Elemento	Concentración	
	NCh 2957/0 of. 2006	Landis (1989)
Nitrógeno (N) (%)	1,7 - 2,5	1,5
Fósforo (P) (%)	0,12 - 0,25	0,2
Potasio (K) (%)	0,5 - 1,5	1,0
Calcio (Ca) (%)	-	0,5
Magnesio (Mg) (%)	0,1 - 0,3	0,2
Azufre (S) (%)	0,15 - 0,2	0,1
Hierro (Fe) (ppm)	50 - 400	100
Cobre (Cu) (ppm)	6 - 100	6
Manganeso (Mn) (ppm)	100 - 1.250	50
Zinc (Zn) (ppm)	10 - 150	20
Boro (B) (ppm)	10 - 100	20

El balance nutricional tiene como objetivo determinar las cantidades adecuadas de cada nutriente que deberá ser entregados a la planta mediante fertirriego. Los nutrientes podrán ser proporcionados mediante la preparación de soluciones nutritivas personalizadas o a través de la utilización de fertilizantes comerciales previamente mezclados.

A continuación, se detallará la metodología para realizar balances nutricionales utilizando ambos tipos de soluciones nutricionales.

4.1. Balance nutricional para soluciones nutritivas personalizadas

Este tipo de soluciones nutritivas se caracteriza por la mezcla de distintas sustancias químicas que proporcionan macronutrientes, las cuales deben ser utilizadas en distintas cantidades de acuerdo a la concentración deseada de cada nutriente.

Los pasos para realizar el balance nutricional son los siguientes:

- **Paso 1:** Es necesario tener en cuenta el porcentaje de nutriente que proporciona (%NP) cada sustancia química (Landis, 1989) (Cuadro 13). Esta información se requerirá cada vez que se desee realizar un balance nutricional.

Cuadro 13
PORCENTAJE DE NUTRIENTE PROPORCIONADO POR CADA
COMPUESTO QUÍMICO

Compuesto	Fórmula Química	Solubilidad *	Nutriente proporcionado (%NP)						
			N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P	K	Ca	Mg	S
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	1.180	17	17	--	--	--	--	--
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	710	21	--	--	--	--	--	24
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	1.020	--	15	--	--	17	--	--
Fosfato diamónico	(NH ₄) ₂ HPO ₄	430	21	--	24	--	--	--	--
Fosfato dipotásico	K ₂ HPO ₄	1.670	--	--	18	45	--	--	--
Sulfato de magnesio	MgSO ₄	710	--	--	--	--	--	10	13
Fosfato monoamónico	NH ₄ H ₂ PO ₄	230	11	--	21	--	1	--	3
Fosfato monopotásico	KH ₂ PO ₄	330	--	--	23	28	--	--	--
Ácido nítrico	HNO ₃	ND	--	22	--	--	--	--	--
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	5.480	--	--	32	--	--	--	--
Carbonato de potasio	K ₂ CO ₃	1.120	--	--	--	56	--	--	--
Cloruro de potasio	KCl	350	--	--	--	52	--	--	--
Nitrato de potasio	KNO ₃	130	--	13	--	37	--	--	--
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	70	--	--	--	44	--	--	18
Nitrato de sodio	NaNO ₃	730	--	16	--	--	--	--	--
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	ND	--	--	--	--	--	--	33
Urea	CO(NH ₂) ₂	780	45	--	--	--	--	--	--

(Fuente: Landis, 1989).

*: Solubilidad en agua (g/1L de agua).

ND: No disponible.

- Paso 2:** Llenar el cuadro para el balance nutricional (Cuadro 14). En la segunda fila (rojo) se lista los macroelementos que se debe entregar a la planta en cada instancia de fertilización, los que incluyen fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y nitrógeno (N). Para el caso del nitrógeno, este puede ser entregado en forma de nitrato (N-NO_3^-) o amonio (N-NH_4^+), por lo que N-Total indica la suma de ambas fuentes de nitrógeno. En la tercera fila (celeste), se indica la concentración objetivo (mg/L o ppm) de cada elemento nutricional que se desea alcanzar (OB).

Cuadro 14
TABLA TIPO PARA CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL

	Concentración de elementos ($[C_x]$) (mg/L o ppm)							
	N-Total	N- NO_3^-	N- NH_4^+	P	K	Ca	Mg	S
Objetivo (OB_x)								
Análisis de agua (Aa_x)								
A agregar (CF_x)								
Sales								Solución aplicada (SA) (mg/L)
Solución resultante								

Se indican los macroelementos necesarios, concentraciones objetivo (OB), concentraciones de elementos en el agua de riego (Aa), concentración final a agregar de cada elemento (CF), las sales a utilizar, la solución a aplicar de cada sal (SA) y las concentraciones de la solución resultante.

- Paso 3.** Luego, en la cuarta fila (amarillo) se indica la concentración de los elementos presentes en el agua de riego (Aa), de acuerdo a los resultados obtenidos desde un análisis químico de agua.

- **Paso 4:** En la quinta fila (verde), se incorpora la concentración final de cada elemento a agregar (CF). Esto corresponde a la diferencia entre la concentración objetivo y la concentración de elementos presentes en el agua de riego (Ecuación 7).

Ecuación 7

$$CF = OB - Aa$$

Donde:

- CF : Concentración final del elemento a agregar (mg/L o ppm).
 OB : Concentración objetivo para cada elemento (mg/L o ppm).
 Aa : Concentración de elemento presente en el agua de riego de acuerdo al análisis químico (mg/L o ppm).

- **Paso 5:** En la primera columna (lila) se listan las sales o compuesto químico que se tiene a disposición para realizar el balance nutricional.
- **Paso 6:** En el área central de la tabla (gris) se agregarán las concentraciones de cada elemento (mg/L o ppm) ($[C_X]$) necesarias para alcanzar CF_X , esto de acuerdo al elemento que proporciona cada sal o compuesto químico. Esto se realiza de manera secuencial a medida que se van agregando las sales (columna lila) que se utilizarán para el balance nutricional.
- **Paso 7:** Se realiza el cálculo de la cantidad de cada sal a aplicar (SA) para alcanzar la concentración final (CF_X) de cada elemento, este valor se incorpora en la última columna (naranja). Esto se realiza de acuerdo a la Ecuación 8.

Ecuación 8

$$SA = \frac{[C_X]}{\%NP/100}$$

Donde:

- SA : Cantidad de sal a aplicar a la solución (mg/L o ppm).
 $[C_X]$: Concentración de cada elemento X al ser aportado por una sal específica (mg/L o ppm).
 $\%NP$: Porcentaje de aporte de un elemento en relación a una sal específica de acuerdo a Cuadro 13.

- **Paso 8:** Finalmente, en la última fila (blanca) se indica la solución resultante que corresponde a la suma de todas las concentraciones de cada elemento aportado por las diferentes sales. Este resultado debería ser igual o similar a las concentraciones objetivo (*OB*) indicadas en el paso 2.

El resultado final del balance se logra únicamente mediante prueba de distintas combinaciones y cantidades de sales que permitan satisfacer el nivel objetivo.

De esto se desprende que no existe una única combinación de sales que satisfagan una solución en particular. Así, un balance nutricional exitoso puede resultar luego de un trabajo de prueba y error utilizando las distintas sales.

- **Caso Práctico N°5. Balance para solución nutricional personalizada**

A continuación, se demostrará mediante un caso práctico el cálculo de un balance nutricional. En el Cuadro 23, presentado al final de este caso práctico, serán indicados los valores finales agregados, los que se desarrollarán a continuación paso a paso para cada sal a partir del Cuadro 15. Los valores objetivos para este balance nutricional específico corresponden a:

$$OB_{N-NO_3^-} = 100 \text{ mg/L de } N - NO_3^-$$

$$OB_{N-NH_4^+} = 100 \text{ mg/L de } N - NH_4^+$$

$$OB_{N_{total}} = OB_{N-NO_3^-} + OB_{N-NH_4^+} = 200 \text{ mg/L de } N_{total}$$

$$OB_P = 80 \text{ mg/L de } P$$

$$OB_K = 100 \text{ mg/L de } K$$

$$OB_{Ca} = 80 \text{ mg/L de } Ca$$

$$OB_{Mg} = 40 \text{ mg/L de } Mg$$

$$OB_S = 60 \text{ mg/L de } S$$

Cuadro 15
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES OBJETIVO AÑADIDAS

	Concentración de elementos ($[C_x]$) (mg/L o ppm)							
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
Objetivo (OB_x)	200	100	100	80	100	80	40	60
Análisis de agua (Aa_x)								
A agregar (CF_x)								
Sales								Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)								
Nitrato de calcio (CaNO ₃)								
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)								
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)								
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)								
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)								
Urea CO(NH ₂) ₂								
Solución resultante								

Luego, según los resultados obtenidos del análisis químico del agua de riego, se tiene que existe presencia de potasio y calcio cuyas concentraciones de elementos corresponden a:

$$Aa_K = 3 \text{ mg/L de K}$$

$$Aa_{Ca} = 22 \text{ mg/L de Ca}$$

De acuerdo a esto, las concentraciones finales a agregar (CF_x) de cada elemento en particular corresponden a:

$$CF_{N-NO_3^-} = OB_{N-NO_3^-} - Aa_{N-NO_3^-} = 100 - 0 = 100 \text{ mg/L de N} - NO_3^-$$

$$CF_{N-NH_4^+} = OB_{N-NH_4^+} - Aa_{N-NH_4^+} = 100 - 0 = 100 \text{ mg/L de N} - NH_4^+$$

$$CF_P = OB_P - Aa_P = 80 - 0 = 80 \text{ mg/L de P}$$

$$CF_K = OB_K - Aa_K = 100 - 3 = 97 \text{ mg/L de K}$$

$$CF_{Ca} = OB_{Ca} - Aa_{Ca} = 80 - 22 = 58 \text{ mg/L de Ca}$$

$$CF_{Mg} = OB_{Mg} - Aa_{Mg} = 40 - 0 = 40 \text{ mg/L de Mg}$$

$$CF_S = OB_S - Aa_S = 60 - 0 = 40 \text{ mg/L de S}$$

Estos valores son agregados en la fila de CF_X y bajo cada elemento nutricional correspondiente, como se observa en el Cuadro 16.

Cuadro 16
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTE A ELEMENTOS PRESENTES
EN EL AGUA DE RIEGO Y CONCENTRACIONES FINALES A AGREGAR
DE CADA ELEMENTO

	Concentración de elementos ($[C_X]$) (mg/L o ppm)							
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60
Sales								Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)								
Nitrato de calcio (CaNO ₃)								
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)								
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)								
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)								
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)								
Urea CO(NH ₂) ₂								
Solución resultante								

Una vez que se conocen las concentraciones finales de cada elemento es posible comenzar a agregar las sales, considerando el porcentaje de aporte de elementos de cada una y así calcular la cantidad final de cada sal que será necesaria.

Así, para satisfacer la necesidad de 40 mg/L de Mg se utiliza el sulfato de magnesio ($MgSO_4$) el cual contiene un 10% de este elemento (Cuadro 13). Por lo que para saber cuánta sal de $MgSO_4$ se requiere se utiliza la Ecuación 8:

$$SA_{MgSO_4} = \frac{[C_{Mg}]}{\%NP_{Mg}/100}$$
$$SA_{MgSO_4} = \frac{[40 \text{ mg/L de Mg}]}{10/100} = 400 \text{ mg/L de } MgSO_4$$

Además, como se observa en el Cuadro 13, esta sal también contiene azufre (S) en un 13% y de acuerdo al resultado anterior se sabe que se agregarán 400 mg/L de $MgSO_4$, por lo que es necesario saber que concentración de S se está aportando a la solución $[C_S]$:

$$SA_{MgSO_4} = \frac{[C_S]}{\%NP_S/100}$$
$$[C_S] = SA_{MgSO_4} \times \frac{\%NP_S}{100}$$
$$[C_S] = 400 \text{ mg/L de } MgSO_4 \times \frac{13}{100} = 52 \text{ mg/L de S}$$

La aplicación de 400 mg/L de $MgSO_4$ implican un aporte de 40 mg/L de Mg y 52 mg/L de S, aportes que deben ser ingresados en las columnas de cada elemento en la fila correspondiente al Sulfato de magnesio ($MgSO_4$) en el Cuadro 17.

Cuadro 17
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
MAGNESIO Y AZUFRE Y CANTIDAD DE SULFATO DE MAGNESIO A
UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_x]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_x)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_x)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_x)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)							40	52	400
Nitrato de calcio (CaNO ₃)									
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)									
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)									
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)									
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)									
Urea CO(NH ₂) ₂									
Solución resultante							40		

Siguiendo el mismo procedimiento, se sabe que la CF de Ca es 58 mg/L . Para ello, se utilizará nitrato de calcio ($CaNO_3$). Para saber cuánto nitrato de calcio se debe agregar para aportar 58 mg/L de Ca, se realiza el cálculo de acuerdo a la Ecuación 8, considerando que esta sal contiene un 17% de Ca:

$$SA_{CaNO_3} = \frac{[C_{Ca}]}{\%NP_{Ca}/100}$$

$$SA_{CaNO_3} = \frac{52\text{ mg/L de Ca}}{17/100} = 341\text{ mg/L de } CaNO_3$$

El CaNO_3 también aporta nitrógeno (N) en forma de NO_3^- en un 15% (Cuadro 13), por lo que es necesario calcular la concentración de N-NO_3^- que aportarían al aplicar 341 mg/L de CaNO_3 .

$$SA_{\text{CaNO}_3} = \frac{[C_{\text{N-NO}_3^-}]}{\%NP_{\text{N-NO}_3^-}/100}$$

$$[C_{\text{N-NO}_3^-}] = SA_{\text{CaNO}_3} \times \frac{\%NP_{\text{N-NO}_3^-}}{100}$$

$$[C_{\text{NO}_3}] = 341 \text{ mg/L de } \text{CaNO}_3 \times \frac{15}{100} = 51 \text{ mg/L de } \text{N} - \text{NO}_3^-$$

La aplicación de 341 mg/L de CaNO_3 , implica un aporte de 52 mg/L de Ca y 51 mg/L de N en forma de NO_3^- , aportes que deben ser ingresados en las columnas de cada elemento en la fila correspondiente al Nitrato de Calcio (CaNO_3) en el Cuadro 18.

Es importante mencionar que en la tabla de balance la cantidad de N en forma de NO_3^- (51 mg/L) se copia también en la columna de N-Total, además de en la columna correspondiente a N-NO_3^- , a objeto de llevar la suma del total de nitrógeno que se estaría aportando.

Cuadro 18
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
CALCIO Y NITRATO Y CANTIDAD DE NITRATO DE CALCIO A UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_X]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)							40	52	400
Nitrato de calcio ($CaNO_3$)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K_2SO_4)									
Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)									
Fosfato diamónico ($(NH_4)_2HPO_4$)									
Nitrato de amonio (NH_4NO_3)									
Urea $CO(NH_2)_2$									
Solución resultante						80	40		

La concentración objetivo de S corresponde a 60 mg/L . Sin embargo 52 mg/L fueron agregados con $MgSO_4$, por lo que ahora faltan 8 mg/L de S. Para lograr la cantidad deseada, se suplementa con sulfato de potasio (K_2SO_4).

Para saber cuánto K_2SO_4 agregar para completar los 8 mg/L de S se utiliza la Ecuación 8, considerando que esta sal contiene 18% de S de acuerdo a al Cuadro 13.

$$SA_{K_2SO_4} = \frac{[C_S]}{\%NP_S/100}$$

$$SA_{K_2SO_4} = \frac{[8 \text{ mg/L de S}]}{18/100} = 44 \text{ mg/L de } K_2SO_4$$

K_2SO_4 contiene un 44% de K, por lo que es necesario calcular la concentración de K que se aportaría al aplicar 44 mg/L de K_2SO_4 .

$$SA_{K_2SO_4} = \frac{[C_K]}{\%NP_K/100}$$

$$[C_K] = SA_{K_2SO_4} \times \frac{\%NP_K}{100}$$

$$[C_K] = 44 \text{ mg/L de } K_2SO_4 \times \frac{44}{100} = 19 \text{ mg/L de K}$$

La aplicación de 44 mg/L de K_2SO_4 , implica un aporte de 8 mg/L de S y 19 mg/L de K, aportes que deben ser ingresados en las columnas de cada elemento en la fila correspondiente al sulfato de potasio (K_2SO_4) en el Cuadro 19.

Cuadro 19
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
AZUFRE Y POTASIO Y A LA CANTIDAD DE SULFATO DE POTASIO A
UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_X]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)							40	52	400
Nitrato de calcio (CaNO ₃)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)					19			8	44
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)									
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)									
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)									
Urea CO(NH ₂) ₂									
Solución resultante						80	40	60	

Se necesitan 97 mg/L de K en total para este balance nutricional, considerando que con K₂SO₄ ya se han aportado 19 mg/L de K, aún se deben aportar 78 mg/L de este elemento. Para esto, es posible utilizar fosfato monopotásico (KH₂PO₄) y se utilizará la Ecuación 8 para conocer la cantidad de KH₂PO₄ necesaria, teniendo en consideración que esta sal contiene un 28% de K.

$$SA_{KH_2PO_4} = \frac{[C_K]}{\%NP_K/100}$$

$$SA_{KH_2PO_4} = \frac{[78 \text{ mg/L de K}]}{28/100} = 279 \text{ mg/L de KH}_2\text{PO}_4$$

La aplicación de KH_2PO_4 también aportaría P en un 23% (Cuadro 13), por lo que se debe calcular la concentración de P que está siendo aportada por la aplicación de 279 mg/L de KH_2PO_4 .

$$SA_{\text{KH}_2\text{PO}_4} = \frac{[C_P]}{\%NP_P/100}$$

$$[C_P] = SA_{\text{KH}_2\text{PO}_4} \times \frac{\%NP_P}{100}$$

$$[C_P] = 279 \text{ mg/L de } \text{KH}_2\text{PO}_4 \times \frac{23}{100} = 64 \text{ mg/L de P}$$

La aplicación de 279 mg/L de KH_2PO_4 , implica un aporte de 78 mg/L de K y 64 mg/L de P, aportes que deben ser ingresados en las columnas de cada elemento en la fila correspondiente al fosfato monopotásico (KH_2PO_4) en el Cuadro 20.

Cuadro 20
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
POTASIO Y FÓSFORO Y A LA CANTIDAD DE FOSFATO
MONOPOTÁSICO A UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_x]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_x)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_x)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_x)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)							40	52	400
Nitrato de calcio (CaNO ₃)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)					19			8	44
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)				64	78				279
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)									
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)									
Urea CO(NH ₂) ₂									
Solución resultante					100	80	40	60	

Para completar los 80 mg/L de P indicados en la **CF** aún faltan 16 mg/L de P los que son suplementados con fosfato diamónico ($(NH_4)_2HPO_4$).

Para saber cuánto $(NH_4)_2HPO_4$ es necesario, se utiliza la Ecuación 8, considerando que esta sal aporta 24% de P.

$$SA_{(NH_4)_2HPO_4} = \frac{[C_P]}{\%NP_P/100}$$

$$SA_{(NH_4)_2HPO_4} = \frac{16\text{ mg/L de P}}{24/100} = 67\text{ mg/L de } (NH_4)_2HPO_4$$

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ también contiene un 21% de N en forma de NH_4^+ , por lo que es necesario conocer la concentración de N-NH_4^+ aportada por la aplicación de 67 mg/L de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

$$SA_{(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4} = \frac{[C_{\text{N-NH}_4^+}]}{\%NP_{\text{N-NH}_4^+}/100}$$

$$[C_{\text{N-NH}_4^+}] = SA_{(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4} \times \frac{\%NP_{\text{N-NH}_4^+}}{100}$$

$$[C_{\text{N-NH}_4^+}] = 67 \text{ mg/L de } (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 \times \frac{21}{100} = 14 \text{ mg/L de N - NH}_4^+$$

La aplicación de 67 mg/L de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, implica un aporte de 16 mg/L de P y 14 mg/L de N en forma de NH_4^+ , aportes que deben ser ingresados en las columnas de cada elemento en la fila correspondiente al fosfato diamónico ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) en el Cuadro 21. Considerando a su vez el registro de la concentración de N-NH_4^+ en la columna de N-Total

Cuadro 21
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
AMONIO Y FÓSFORO Y LA CANTIDAD DE FOSFATO DIAMÓNICO A
UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_X]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N- NO_3^-	N- NH_4^+	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)							40	52	400
Nitrato de calcio ($CaNO_3$)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K_2SO_4)					19			8	44
Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)				64	78				279
Fosfato diamónico ($(NH_4)_2HPO_4$)	14		14	16					67
Nitrato de amonio (NH_4NO_3)									
Urea $CO(NH_2)_2$									
Solución resultante				80	100	80	40	60	

Como recomendación, dejar el nitrógeno como último elemento en el proceso de balance de la solución nutritiva.

Esto debido a que existen sales que solo aportan nitrógeno tales como el nitrato de amonio (NH_4NO_3), la urea ($CO(NH_2)_2$) y el nitrato de sodio ($NaNO_3$).

Hasta este punto, en el balance nutricional se han alcanzado las concentraciones objetivo de P, K, Ca, Mg y S (Cuadro 21), por lo que solo queda el balance de N. Ahora, es posible retomar el balance de nitrato ($N-NO_3^-$).

Anteriormente, con $CaNO_3$ se aportaron 51 mg/L de $N-NO_3^-$, por lo que falta aportar 49 mg/L para alcanzar los 100 mg/L de $N-NO_3^-$ fijados como concentración objetivo.

Para esto se utiliza nitrato de amonio (NH_4NO_3), por lo que para saber la cantidad de sal a agregar se utiliza la Ecuación 8, teniendo en cuenta que esta sal contiene un 17% de N-NO_3^- .

$$SA_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = \frac{[C_{\text{N-NO}_3^-}]}{\%NP_{\text{N-NO}_3^-}/100}$$

$$SA_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = \frac{49 \text{ mg/L de N-NO}_3^-}{17/100} = 288 \text{ mg/L de NH}_4\text{NO}_3$$

Se necesitarían 288 *mg/L* de NH_4NO_3 para aportar 49 *mg/L* de N-NO_3^- , el valor obtenido se registra en la columna de N-NO_3^- y N-Total y en la fila de esta sal (Cuadro 22). Luego, esta sal también contiene N en forma de NH_4^+ en un 17% (Cuadro 13) por lo que es necesario calcular la concentración de N-NH_4^+ que es aportada con la aplicación de 288 *mg/L* de NH_4NO_3 .

$$SA_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = \frac{[C_{\text{N-NH}_4^+}]}{\%NP_{\text{N-NH}_4^+}/100}$$

$$[C_{\text{N-NH}_4^+}] = SA_{\text{NH}_4\text{NO}_3} \times \frac{\%NP_{\text{N-NH}_4^+}}{100}$$

$$[C_{\text{N-NH}_4^+}] = 288 \text{ mg/L de NH}_4\text{NO}_3 \times \frac{17}{100} = 49 \text{ mg/L de N-NH}_4^+$$

Así, se agregan 49 *mg/L* de N-NH_4^+ , valor que se registra bajo la columna de este elemento y en la de N-Total (Cuadro 22).

En relación al N-Total, hasta este punto se han aportado 163 *mg/L* de N, sumando los 51 *mg/L* aportados por CaNO_3 , más los 14 *mg/L* aportados por $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ y los 98 *mg/L* aportados por NH_4NO_3 .

Cuadro 22
TABLA DE CÁLCULO DE BALANCE NUTRICIONAL CON
CONCENTRACIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS
NITRATO Y AMONIO Y LA CANTIDAD DE NITRATO DE AMONIO A
UTILIZAR

	Concentración de elementos ($[C_x]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)							40	52	400
Nitrato de calcio (CaNO ₃)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)					19			8	44
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)				64	78				279
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)	14		14	16					67
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)	98	49	49						
Urea CO(NH ₂) ₂									
Solución resultante		100		80	100	80	40	60	

Faltan aún 37 mg/L de N, los que deberán ser entregados por alguna sal cuya fuente de N sea NH₄⁺, ya que N-NO₃⁻ ya ha alcanzó su concentración objetivo. Para esto se utilizará la urea (CO(NH₂)₂) como fuente de N-NH₄⁺, considerando que aporta un 45% en forma de N-NH₄⁺ (Cuadro 13), de acuerdo a la Ecuación 8.

$$SA_{CO(NH_2)_2} = \frac{[C_{N-NH_4^+}]}{\%NP_{N-NH_4^+}/100}$$

$$SA_{CO(NH_2)_2} = \frac{37 \text{ mg/L de N} - NH_4^+}{45/100} = 82 \text{ mg/L de CO(NH}_2)_2$$

Finalmente, con los 82 mg/L de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ se alcanzan los 200 mg/L de N-Total fijados como concentración objetivo, de los cuales 100 mg/L son aportados a través de N-NO_3^- y 100 mg/L a través de N-NH_4^+ . Con este último paso se ha alcanzado la concentración objetivo para todos los macroelementos, lo cual puede verificarse en la última fila del Cuadro 23, al sumar todas las concentraciones agregadas para cada elemento nutricional.

Cuadro 23
BALANCE NUTRICIONAL FINAL - CASO PRÁCTICO N°5

	Concentración de elementos ($[C_X]$) (mg/L o ppm)								
	N-Total	N- NO_3^-	N- NH_4^+	P	K	Ca	Mg	S	
Objetivo (OB_X)	200	100	100	80	100	80	40	60	
Análisis de agua (Aa_X)	0	0	0	0	3	22	0	0	
A agregar (CF_X)	200	100	100	80	97	58	40	60	
Sales									Solución aplicada (SA) (mg/L)
Sulfato de magnesio (MgSO_4)							40	52	400
Nitrato de calcio (CaNO_3)	51	51				58			341
Sulfato de potasio (K_2SO_4)					19			8	44
Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)				64	78				279
Fosfato diamónico ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$)	14		14	16					67
Nitrato de amonio (NH_4NO_3)	98	49	49						
Urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	37		37						
Solución resultante	200	100	100	80	100	80	40	60	

Respecto de la aplicación de la solución fertilizante calculada, es importante destacar que la aplicación se debe hacer a través de dos soluciones por separado. La primera debe contener todos los macronutrientes excepto el calcio (Ca), que en este caso es aportado como nitrato de calcio, mientras que la segunda solución solamente corresponde al calcio.

Esta separación debe realizarse debido a la incompatibilidad química entre ciertos iones de nutrientes y el calcio, generando sales insolubles como el yeso ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{CaSO}_4$, yeso) (Figura 23), lo que perjudica la absorción de los nutrientes por la planta.

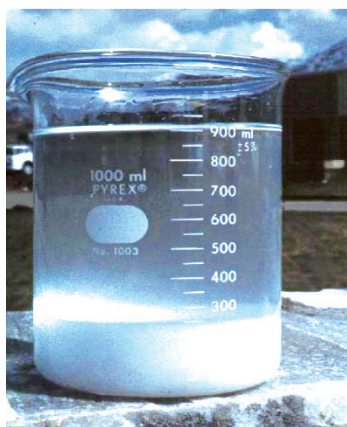


Figura 23
INCOMPATIBILIDAD QUÍMICA ENTRE CIERTOS IONES DE NUTRIENTES
MINERALES, EN ESTE CASO CALCIO Y SULFATO, PUEDE ORIGINAR
PRECIPITADOS INSOLUBLES EN LAS SOLUCIONES DE FERTILIZANTE

4.2. Balance nutricional con fertilizantes comerciales

Como se mencionó anteriormente, otra opción a la utilización de soluciones nutritivas personalizadas con diferentes sales, es el empleo de fertilizantes comerciales. Si bien la principal ventaja de este método es que el balance nutricional es más sencillo, el balance de los distintos nutrientes es más rígido ya que los distintos elementos vienen en proporciones fijas. A continuación, se explica paso a paso el balance nutricional con fertilizantes comerciales:

- **Paso 1:** Es necesario obtener la ficha técnica del producto específico que se desea usar. En ella se detallan los porcentajes de aporte de cada elemento.
- **Paso 2:** A diferencia de las sales utilizadas en el balance de soluciones nutritivas personalizadas, en los fertilizantes comerciales el porcentaje de fósforo en la etiqueta de los fertilizantes esta expresado como fosfato (P_2O_5); el de potasio como óxido de potasio (K_2O) y el de magnesio como óxido de magnesio (MgO). Por lo tanto, es necesario llevar desde estos compuestos a porcentaje elemental (P, K y Mg), por lo que es necesario multiplicar el porcentaje entregado por el fabricante por los factores expresados en el Cuadro 24, de acuerdo a la Ecuación 9.

Cuadro 24
FACTORES DE CONVERSIÓN PARA FÓSFORO (P), POTASIO (K) Y
MAGNESIO (Mg) PARA BALANCE NUTRICIONAL CON FERTILIZANTES
COMERCIALES

Desde la forma A	A la forma B	Factor Conversión (F_c)
P ₂ O ₅	P	0,4364
P	P ₂ O ₅	2,2910
K ₂ O	K	0,8301
K	K ₂ O	1,2050
MgO	Mg	0,6030
Mg	MgO	1,6584

Ecuación 9

$$\%E_{balance} = \%E_{producto} \times F_c$$

Donde:

$\%E_{balance}$: Porcentaje de aporte del elemento usado en el balance nutricional.

$\%E_{producto}$: Porcentaje de aporte del elemento de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

F_c : Factor de conversión de acuerdo a Cuadro 24.

- **Paso 3:** Fijar la concentración del elemento principal. Ya que las proporciones de los elementos en cada fertilizante vienen determinadas desde fábrica, al fijar la concentración de un elemento necesariamente se establece la concentración de aporte del resto de los elementos. Es por esto que al ser el nitrógeno el elemento más importante para la nutrición de la planta, se recomienda fijar la concentración de nitrógeno que desea ser aplicada en el esquema de fertilización.
- **Paso 4:** Calcular la cantidad de fertilizante comercial utilizando la Ecuación 10, en base al porcentaje de aporte de nitrógeno.

Ecuación 10

$$[C]_{fert} = \frac{[C]_e}{\%A_N / 100}$$

Donde:

$[C]_{fert}$: Concentración del fertilizante comercial (mg/L o ppm)

$[C]_e$: Concentración del elemento fijado. En este caso nitrógeno (mg/L o ppm)

$\%A_N$: Aporte de nitrógeno indicado por el fabricante del fertilizante comercial (%)

- **Paso 5:** Calcular el aporte del resto de los elementos nutricionales entregados en las especificaciones del fabricante, de acuerdo a la Ecuación 11.

Ecuación 11

$$[C]_e = [C]_{fert} \times \frac{\%A_e}{100}$$

Donde:

$[C]_e$: Concentración aportada por un elemento (mg/L o ppm).
 $[C]_{fert}$: Concentración del fertilizante comercial (mg/L o ppm).
 $\%A_e$: Porcentaje que aporta cada elemento de acuerdo a las especificaciones del fabricante (%).

- Caso Práctico N°6: Balance para solución nutricional utilizando fertilizante comercial

Para los efectos de este caso práctico se utilizará como ejemplo el fertilizante comercial soluble Ultrasol® Crecimiento con micronutrientes de SQM (Figura 24).



Figura 24
FERTILIZANTE ULTRASOL® CRECIMIENTO CON MICRONUTRIENTES
DE SQM

De acuerdo a la ficha técnica de este fertilizante, la composición porcentual de cada uno de los compuestos y elementos que aporta son los que se indica en el Cuadro 25.

Cuadro 25
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE
COMPUESTOS Y ELEMENTOS PRESENTES EN EL FERTILIZANTE
ULTRASOL ® CRECIMIENTO CON MICRONUTRIENTES

Elemento de Aporte	Concentración (%)
N	25
P ₂ O ₅	10
K ₂ O	10
MgO	1
S	1
B	0,02
Zn	0,02
Cu	0,01
Fe	0,03
Mn	0,01
Mo	0,005

Como se mencionó, se debe hacer la transformación de P₂O₅, K₂O y MgO a P, K y Mg, respectivamente, mediante la Ecuación 9.

Fósforo: $\%P_{balance} = 10\%_{P_2O_5} \times 0,4364 = 4,4\% \text{ de } P$

Potasio: $\%K_{balance} = 10\%_{K_2O} \times 0,8301 = 8,3\% \text{ de } K$

Magnesio: $\%Mg_{balance} = 10\%_{MgO} \times 0,6030 = 0,6\% \text{ de } Mg$

Con estos resultados, se modifica la tabla de distribución de elementos y compuestos proporcionada por el fabricante, reemplazando los valores de P, K y Mg por los valores obtenidos (Cuadro 26).

Cuadro 26
ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE
COMPUESTOS Y ELEMENTOS PRESENTES EN EL FERTILIZANTE
ULTRASOL ® CRECIMIENTO CON MICRONUTRIENTES

Elemento de Aporte	Concentración* (%)
N	25
P	4,40
K	8,30
Mg	0,60
S	1
B	0,02
Zn	0,02
Cu	0,01
Fe	0,03
Mn	0,01
Mo	0,005

*: En rojo se encuentran reemplazados los porcentajes de P, K y Mg de acuerdo al porcentaje calculado a través de la ecuación de conversión (Ecuación 9).

Obtenidos los valores porcentuales de cada elemento presente en el fertilizante Ultrasol® Crecimiento con Micronutrientes, se puede realizar el balance fijando la concentración de nitrógeno que se desea aplicar. Para efectos de este caso práctico la concentración de N se fijará en 200 mg/L y la concentración de fertilizante a utilizar se calcula mediante la Ecuación 10.

$$[C]_{fert} = \frac{[C]_N}{\%AN/100}$$

$$[C]_{fert} = \frac{200 \text{ mg/L de N}}{25/100} = 800 \text{ mg/L de Ultrasol Crecimiento}$$

Así, se necesitan 800 mg/L del fertilizante Ultrasol Crecimiento® para aportar una concentración de 200 mg/L de N. Como se observa en el Cuadro 26, este fertilizante además aporta otros macro y micronutrientes, por lo que se debe calcular la concentración en la que se aporta cada uno al balance nutricional al utilizar la concentración de fertilizante anteriormente calculada. Para esto se utilizará la Ecuación 10, considerando los porcentajes de aporte de cada elemento (Cuadro 26).

Fósforo:

$$[C]_P = [C]_{fert} \times \frac{\%A_P}{100}$$

$$[C]_P = 800 \text{ mg/L} \times \frac{4,4}{100} = 35 \text{ mg/L de P}$$

Potasio:

$$[C]_K = [C]_{fert} \times \frac{\%A_K}{100}$$

$$[C]_K = 800 \text{ mg/L} \times \frac{8,3}{100} = 66 \text{ mg/L de K}$$

Magnesio:

$$[C]_{Mg} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Mg}}{100}$$

$$[C]_{Mg} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,6}{100} = 5 \text{ mg/L de Mg}$$

Azufre:

$$[C]_S = [C]_{fert} \times \frac{\%A_S}{100}$$

$$[C]_S = 800 \text{ mg/L} \times \frac{1}{100} = 8 \text{ mg/L de S}$$

Boro:

$$[C]_B = [C]_{fert} \times \frac{\%A_B}{100}$$

$$[C]_B = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,02}{100} = 0,16 \text{ mg/L de B}$$

Zinc:

$$[C]_{Zn} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Zn}}{100}$$

$$[C]_{Zn} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,02}{100} = 0,16 \text{ mg/L de Zn}$$

Cobre:

$$[C]_{Cu} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Cu}}{100}$$

$$[C]_{Cu} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,01}{100} = 0,08 \text{ mg/L de Cu}$$

Fierro:

$$[C]_{Fe} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Fe}}{100}$$

$$[C]_{Fe} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,03}{100} = 0,24 \text{ mg/L de Fe}$$

Manganeso:

$$[C]_{Mn} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Mn}}{100}$$

$$[C]_{Mn} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,01}{100} = 0,08 \text{ mg/L de Mn}$$

Molibdeno:

$$[C]_{Mo} = [C]_{fert} \times \frac{\%A_{Mo}}{100}$$

$$[C]_{Mo} = 800 \text{ mg/L} \times \frac{0,005}{100} = 0,04 \text{ mg/L de Mo}$$

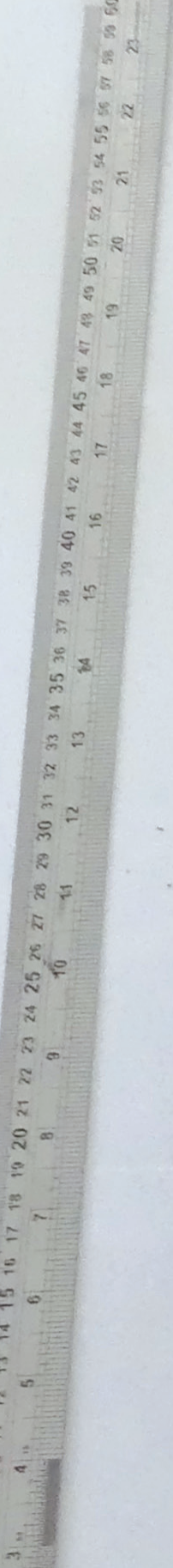
Finalmente, es posible generar una nueva tabla indicando la concentración de elementos para una solución de Ultrasol ® Crecimiento de 800 mg/L (Cuadro 27).

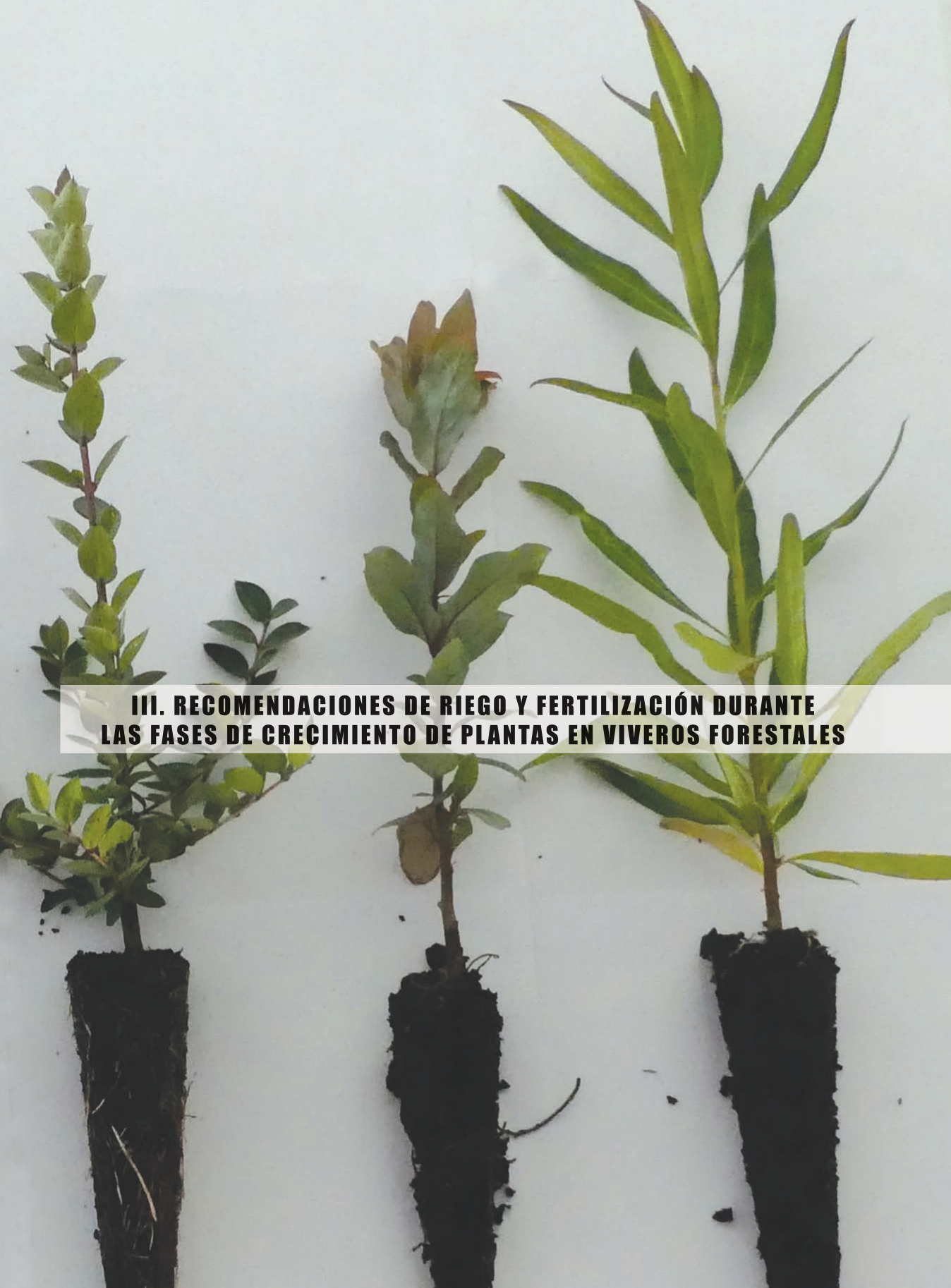
Cuadro 27
CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS NUTRICIONALES PARA UNA
SOLUCIÓN DE FERTILIZACIÓN DE ULTRASOL® CRECIMIENTO DE 800
mg/L

Elemento de Aporte	Concentración (<i>mg/L</i> o <i>ppm</i>)
N	200
P	35
K	66
Mg	5
S	8
B	0,16
Zn	0,16
Cu	0,08
Fe	0,24
Mn	0,08
Mo	0,04

En este ejercicio es posible visualizar la comentada rigidez en el balance al trabajar con fertilizantes comerciales, ya que, al fijar un elemento, necesariamente se fija el resto. Sin embargo, es importante mencionar también que estas dos aproximaciones pueden ser complementarias (uso de fertilizantes comerciales y uso de sales).

Así, el Ultrasol® Crecimiento pudiera ser suplementado con MgSO_4 , con el objeto de elevar las concentraciones de magnesio y azufre que aporta. A su vez, en una fertilización posterior, por la incompatibilidad química, podría ser suplementado también con nitrato de calcio, ya que como se observó en la ficha técnica, el Ca no está presente en el Ultrasol® Crecimiento.





**III. RECOMENDACIONES DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN DURANTE
LAS FASES DE CRECIMIENTO DE PLANTAS EN VIVEROS FORESTALES**

1. FASE DE ESTABLECIMIENTO

Durante el proceso de viverización, el desarrollo de las plantas puede ser dividido en tres etapas o fases; establecimiento, pleno crecimiento y endurecimiento, y el conocimiento de cada una es esencial para una buena planificación de las labores de riego y fertilización.

Las plantas en cada una de estas fases tienen diferentes requerimientos de agua y nutrientes y hay diferentes otros factores que afectan su crecimiento. Es por esto que los objetivos durante cada etapa son diferentes y serán discutidos a continuación.

La fase de establecimiento corresponde a una de las más críticas para el desarrollo exitoso de plantas en contenedor. En general, para plantas producidas desde semillas, esta fase está definida desde las labores de siembra y pasa por la germinación, la emergencia y hasta el desarrollo de las primeras hojas verdaderas (Figura 25).

Dependiendo de la especie, esta fase puede durar entre seis y 12 semanas. El objetivo principal durante este periodo, es maximizar el crecimiento para ocupar todo el espacio de crecimiento radicular en el contenedor y minimizar las pérdidas de plántulas.

Dentro de las necesidades especiales de las plantas durante el establecimiento se incluyen la protección contra condiciones climáticas adversas como frío o heladas y la mantención de la humedad, esta última no a niveles excesivos para evitar la aparición de infecciones por hongos.

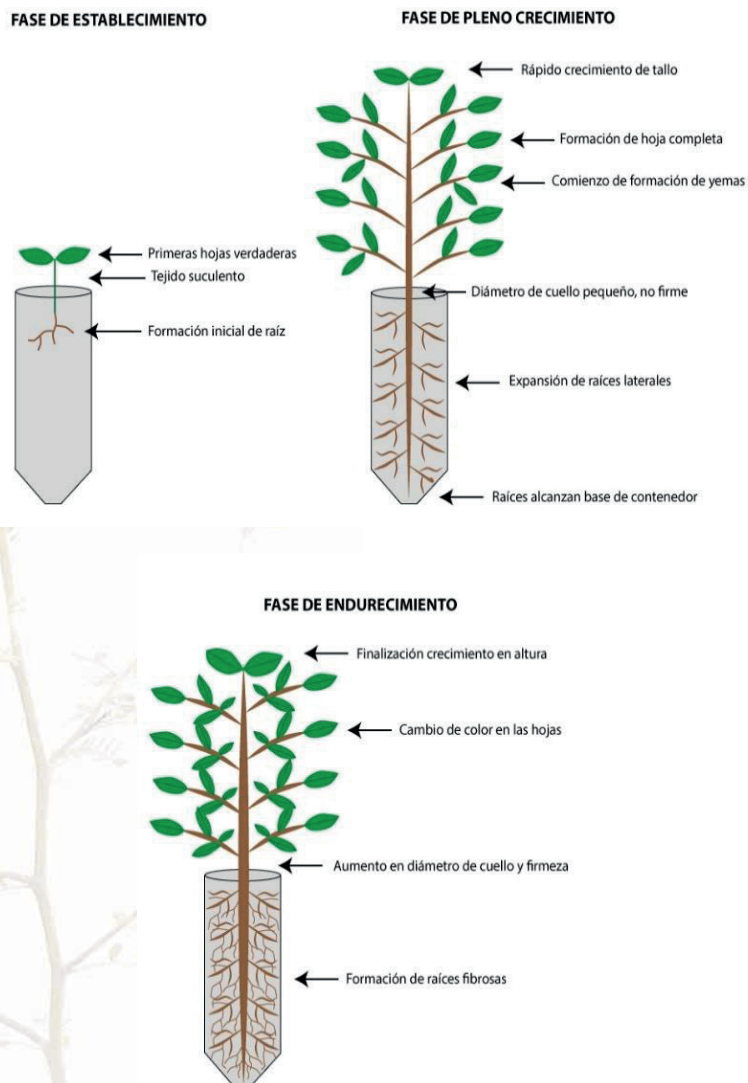
Además, en esta fase hay bajas tasas de fertilización debido a que la principal fuente de nutrición para las plantas durante esta etapa proviene de las semillas y hojas cotiledonares, por lo que uno de los mayores requerimientos es el agua, ya que las tasas de crecimiento durante esta fase no son altas (Figura 26).

Así, el correcto abastecimiento de agua durante esta fase es de crítica importancia. Labores de riego poco frecuentes causarán que la semilla se seque y no se hidrate apropiadamente, lo que causará disminución en la germinación e incluso pérdida total de la producción de plantas. Por el contrario, exceso en la irrigación puede crear condiciones con exceso de humedad promoviendo la infección por hongos.

Para determinar las necesidades hídricas de las plantas durante esta etapa, se aconseja considerar las condiciones hídricas del hábitat natural de la especie durante el periodo del año durante el cual germina.

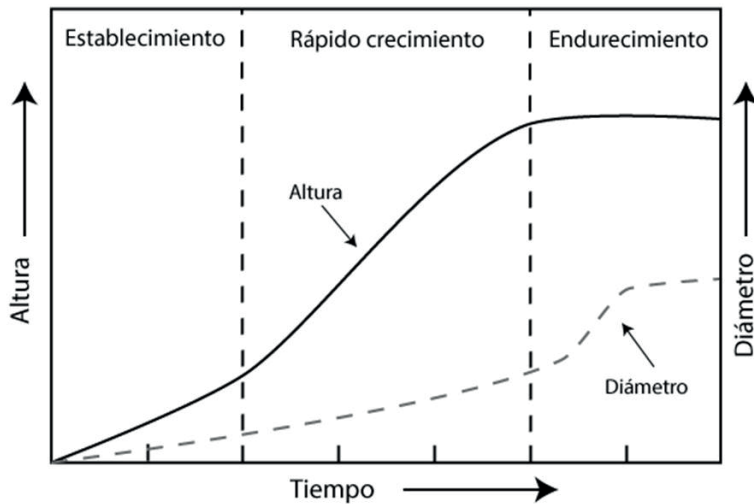
Durante esta fase, dado que las raíces no han ocupado la totalidad del contenedor, la mayor pérdida de agua corresponde a la evaporación desde la superficie del sustrato. La

irrigación durante este período, por tanto, debe ser aplicada con el objetivo de reponer la humedad en la capa superior del medio de crecimiento. Esto puede lograrse a través de aspersores u otro método para aplicar riego en forma de gotas pequeñas, evitando así el daño mecánico a las plantas provocado por la caída de gotas muy grandes. La inspección visual de la humedad en la superficie del sustrato puede ayudar a determinar la frecuencia de riego.



(Adaptado de Jacobs y Wilkinson, 2008)

Figura 25
FASES DE CRECIMIENTO DE PLANTAS EN CONTENEDOR



(Adaptado de Wood 1994)

Figura 26
CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA DE PLANTAS DURANTE LAS TRES FASES DE CRECIMIENTO

El crecimiento es relativamente bajo durante el establecimiento. El mayor crecimiento en altura ocurre durante la fase de rápido o pleno crecimiento, la que termina cuando la altura objetivo ha sido cumplida. Durante el endurecimiento las raíces siguen creciendo mientras las temperaturas sean favorables, lo que resulta en un aumento del diámetro de cuello.

La clave para el riego durante la fase de establecimiento es mantener el medio de crecimiento húmedo, pero no saturado de agua.

En la fase de establecimiento, las plantas son particularmente vulnerables a daño radicular por alta concentración de sales. Además, una alta adición de nitrógeno en el establecimiento puede resultar en el desarrollo de tejido succulento en el cuello de las plantas, aumentando su vulnerabilidad a infecciones por hongos como el complejo damping-off u otros.

Se recomiendan, en consecuencia, aplicaciones moderadas de nitrógeno durante esta etapa (Mullin y Hallett, 1983). De acuerdo a Jacobs y Landis (2008), una fertilización con 50 mg/L de N puede ser apropiada durante esta etapa, mientras que un aumento en la fertilización con P puede ser adecuada para mejorar el desarrollo radicular.

2. FASE DE PLENO CRECIMIENTO

Durante esta fase la altura de las plantas incrementa significativamente (Figura 26), por lo que el principal objetivo de esta etapa es que las plantas alcancen la altura final deseada. Los viveristas deben monitorear el crecimiento detalladamente, esto para asegurar que las plantas no aumenten su altura más allá de su objetivo. Dependiendo de cada especie, esta etapa puede durar entre 10 a 20 semanas.

De acuerdo a lo anterior, los principales objetivos de la etapa de pleno crecimiento son minimizar estrés, promover el crecimiento en altura, mantener factores ambientales en niveles óptimos, monitorear el crecimiento en altura hasta alcanzar aproximadamente el 80% de la altura objetivo, y que el sistema radicular haya ocupado el contenedor en su totalidad.

Respecto del riego durante esta etapa, se debe considerar que el sistema radicular se ha expandido ocupando el contenedor y que existe un aumento en la pérdida de agua a través de la transpiración, por lo que las labores de riego deberán ser más frecuentes y duraderas, asegurando alcanzar la máxima retención de humedad del sustrato tras cada evento de riego y/o fertirriego. Para esto, un buen indicador es observar goteo por la parte inferior de las bandejas o contenedores.

Si bien las demandas hídricas dependen de la especie, habiendo algunas que se ven beneficiadas por períodos breves de estrés hídrico (Gallé *et al.*, 2007; Varone *et al.*, 2012), el sustrato no debería secarse por completo jamás. Es altamente recomendable ajustar un criterio de riego para cada especie utilizando la metodología expuesta en el primer capítulo de este manual.

Durante la etapa de rápido crecimiento las plantas forman una copa más densa, lo cual es más pronunciada en especies latifoliadas, y esto causa una reducción significativa en el agua de riego que llega al sustrato, especialmente si se utiliza un sistema de riego aéreo. Para reducir este problema se pueden realizar riegos de mayor duración y es muy importante que estos alcancen la máxima retención de humedad del sustrato.

Durante esta etapa se alcanza una máxima tasa de crecimiento en altura (Figura 26), por lo que la fertilización es uno de los factores más importantes a controlar. De acuerdo a Landis (1989), se recomiendan distintas concentraciones nutricionales para cada etapa de crecimiento (Cuadro 28).

Dado que la promoción de crecimiento en altura es el principal objetivo de esta fase, la aplicación de nitrógeno es de mayor importancia y de acuerdo con Landis (1989) puede alcanzar concentraciones de entre 100 y 200 mg/L en coníferas.

Sin embargo, de acuerdo a estudios en variadas especies (Luis *et al.*, 2009; Villar-Salvador *et al.*, 2012; Oliet *et al.*, 2013) las concentraciones de nitrógeno pueden alcanzar valores aún mayores, lo que además de promover el crecimiento en altura, aumenta las tasas de supervivencia durante el establecimiento en campo.

Esto demuestra que el nivel de fertilización apropiado con nitrógeno es altamente especie-específico.

Cuadro 28
NIVELES ÓPTIMOS PARA LOS 12 ELEMENTOS ESENCIALES EN
SOLUCIONES DE FERTILIZANTE LÍQUIDO Y PARA FERTILIZACIÓN
CONSTANTE DE ESPECIES FORESTALES

Nutriente mineral	Concentración de aplicación según fase		
	Establecimiento	Pleno crecimiento	Endurecimiento
	(mg/L)		
Macronutrientes			
N	50	150	50
P	100	60	60
K	100	150	150
Ca	80	80	80
Mg	40	40	40
S	60	60	60
Micronutrientes			
Fe	4,00	4,00	4,00
Mn	0,80	0,80	0,80
Zn	0,32	0,32	0,32
Cu	0,15	0,15	0,15
Mn	0,02	0,02	0,02
B	0,50	0,50	0,50

(Fuente: Landis, 1989)

Si bien la fertilización con N puede aumentar a valores mayores que los 200 mg/L, es necesario monitorear constantemente el crecimiento en altura de las plantas, ya que la fase de pleno crecimiento debería terminar cuando la altura de las plantas alcance el 80% de la altura final.

3. FASE DE ENDURECIMIENTO

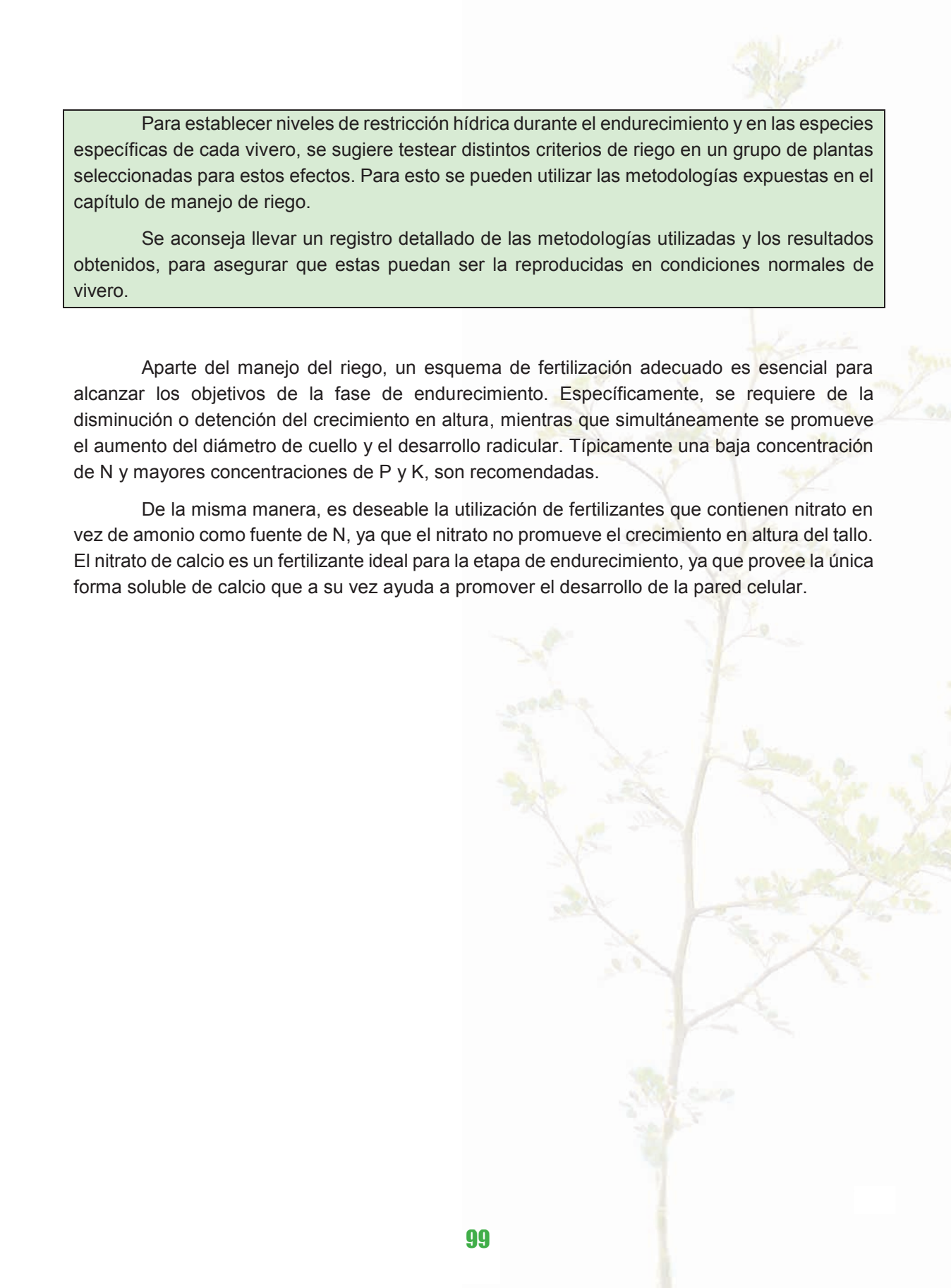
Durante el proceso de producción de plantas, el objetivo es promover el crecimiento y desarrollo ideal de estas. Esto es logrado principalmente al abastecer todos los niveles requeridos de agua y nutrientes, minimizando a su vez los efectos de estrés ambiental. Sin embargo, al finalizar este proceso, las plantas deben pasar por un período de endurecimiento previo a la plantación.

Posterior a la viverización, las plantas deben tolerar diversos tipos de estrés asociados a los procesos de traslado de plantas y a condiciones ambientales adversas en los sitios de plantación. La promoción del desarrollo de características morfológicas y fisiológicas que inducen tolerancia al estrés en plantas, es el principal objetivo de la fase de endurecimiento en vivero.

Durante esta fase, que tiene una duración uno a tres meses dependiendo de la especie, se puede alcanzar los valores requeridos de diámetro de cuello y desarrollo radicular. El crecimiento en altura en tanto, disminuye o incluso cesa del todo (Figura 25). Con esta detención del crecimiento en altura (Figura 26) se espera que las plantas aumenten los niveles de reservas, lo que les permitirá sobrevivir y desarrollarse en condiciones de campo. Usualmente este período calza con la disminución del fotoperíodo (horas de luz) y las temperaturas, lo que ayuda a generar un estado de dormancia en las plantas.

El manejo apropiado del riego es una de las herramientas más eficaces para modificar el crecimiento en plantas durante el proceso de endurecimiento, ya que el crecimiento está fuertemente ligado a los niveles de humedad del medio de crecimiento y, al inducir un estrés hídrico moderado, es posible disminuir el crecimiento y aumentar la resistencia a estrés en general (Duryea y Lavender, 1982; Villar-Salvador *et al.*, 2004).

Debido al carácter crítico del esquema de riego durante esta fase, el estrés hídrico debe ser manejado muy cuidadosamente, por lo que no existe sustituto para la experiencia. Al igual que con la fertilización durante la fase de pleno crecimiento, el nivel de tolerancia al estrés hídrico es altamente especie-específico. Por lo tanto, inducir niveles de estrés hídrico puede ser riesgoso si los niveles de tolerancia al estrés son desconocidos para la especie de interés. Bajo este escenario, se recomienda que los viveristas generen sus propios ensayos con las especies que producen en sus viveros, para determinar los niveles de estrés hídrico adecuados. A pesar de estas advertencias, la inducción de estrés hídrico leve puede ser considerada como una técnica para manipular las características fisiológicas y morfológicas de las plantas.



Para establecer niveles de restricción hídrica durante el endurecimiento y en las especies específicas de cada vivero, se sugiere testear distintos criterios de riego en un grupo de plantas seleccionadas para estos efectos. Para esto se pueden utilizar las metodologías expuestas en el capítulo de manejo de riego.

Se aconseja llevar un registro detallado de las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos, para asegurar que estas puedan ser reproducidas en condiciones normales de vivero.

Aparte del manejo del riego, un esquema de fertilización adecuado es esencial para alcanzar los objetivos de la fase de endurecimiento. Específicamente, se requiere de la disminución o detención del crecimiento en altura, mientras que simultáneamente se promueve el aumento del diámetro de cuello y el desarrollo radicular. Típicamente una baja concentración de N y mayores concentraciones de P y K, son recomendadas.

De la misma manera, es deseable la utilización de fertilizantes que contienen nitrato en vez de amonio como fuente de N, ya que el nitrato no promueve el crecimiento en altura del tallo. El nitrato de calcio es un fertilizante ideal para la etapa de endurecimiento, ya que provee la única forma soluble de calcio que a su vez ayuda a promover el desarrollo de la pared celular.

4. CONSOLIDANDO EL MANEJO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN PARA UN VIVERO

A partir de la información obtenida de los casos prácticos anteriores, a continuación, se consolidará la información referente al esquema y a las dosis, tanto de riego como de fertilización a realizar dentro de un vivero.

En el caso práctico N°1 se obtuvo que la caracterización del sistema de riego indicó un gasto de agua equivalente a $16,2 \text{ L/m}^2$ por cada hora de funcionamiento (o $16,2 \text{ mm/h}$), realizando un riego con un coeficiente de uniformidad del 87,3%

Para el mismo vivero, durante los casos prácticos N° 2, 3 y 4 se logró definir los criterios de riego mediante la estimación de los pesos de bandeja que deben ser alcanzados antes de un evento de riego y los tiempos de riego necesarios para lograr el peso de la almaciguera que describe la máxima retención de humedad del sustrato.

Esto considerando que dicho vivero realiza su producción de plantas utilizando almacigueras de poliestireno expandido de 130 ml y 84 cavidades, utilizando como sustrato el compost de corteza de *Pinus radiata* (Cuadro 29).

Cuadro 29
INFORMACIÓN OBTENIDA EN LOS CASOS PRÁCTICOS N° 2, 3 Y 4

Criterio de riego (%) $CR_{X\%}$	60	50	40
Peso de almaciguera para cada criterio de riego (kg) $PCR_{CR_{X\%}}$	7,780	7,410	7,050
Tiempo de riego para cada criterio de riego (min) $TR_{CR_{X\%}(min)}$	19	24	29

Luego, durante el caso práctico N°5, se definió un esquema de fertilización de referencia utilizando sales solubles que podrán ser aplicadas mediante fertirriego (Cuadro 30).

Cuadro 30
CONCENTRACIÓN DE SALES PARA ESQUEMA DE FERTILIZACIÓN
DEFINIDO SEGÚN BALANCE DE SALES REALIZADO EN CASO
PRÁCTICO N°5

Sales	Concentración (mg/L)
Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)	400
Nitrato de Calcio ($CaNO_3$)	341
Sulfato de potasio (K_2SO_4)	44
Fosfato monopotásico (KH_2PO_4)	279
Fosfato diamónico ($(NH_4)_2HPO_4$)	67
Nitrato de amonio (NH_4NO_3)	288
Urea ($CO(NH_2)_2$)	82

De esta forma, bajo el supuesto de que la superficie de la unidad de manejo es de $600\ m^2$, mediante la Ecuación 12, sería posible estimar el volumen de riego ($VR_{(L)}$) necesario para llevar desde el peso de almaciguera para un determinado criterio de riego ($PCR_{CRX\%}$), hasta el peso de la almaciguera a máxima retención de humedad del sustrato ($PS_{Max.Ret.}$).

Ecuación 12

$$VR_{(L)} = \frac{SUM \times GSR \times TR_{CRX\%}}{60}$$

Donde:

- $VR_{(L)}$: Volumen de riego que pasa por la matriz durante la aplicación de un riego (L)
- $SUM_{(m^2)}$: Superficie de la unidad de manejo (m^2).
- $GSR_{(mm/h)}$: Gasto del sistema de riego (mm/h aportados por 1 h de riego)
- $TR_{CRX\%}(min)$: Tiempo de funcionamiento del sistema de riego, para un determinado criterio de riego (min).

De tal modo que en base a la información referida a los casos prácticos anteriores se realizará el cálculo del volumen de riego para los criterios de riego del 60%, 50% y 40%.

Criterio de riego del 60%:

$$VR_{(L)} = \frac{600 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ mm/h} \times 19 \text{ min}}{60}$$

$$VR_{(L)} = 3.079,9 \approx 3.080 \text{ L}$$

Criterio de riego del 50%:

$$VR_{(L)} = \frac{600 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ mm/h} \times 24 \text{ min}}{60}$$

$$VR_{(L)} = 3.890,4 \approx 3.890 \text{ L}$$

Criterio de riego del 40%:

$$VR_{(L)} = \frac{600 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ mm/h} \times 29 \text{ min}}{60}$$

$$VR_{(L)} = 4.700,9 \approx 4.701 \text{ L}$$

Luego de conocer el volumen de riego a aplicar para cada criterio de riego, utilizando la información descrita en el Cuadro 23, es posible calcular la cantidad de cada sal a utilizar durante la fertilización según el criterio de riego a considerar (Cuadro 31).

Cuadro 31
PESAJE DE SALES A APLICAR DURANTE EL FERTIRIEGO

Criterios Riego (%)		60	50	40
Volumen Riego (L)		3.080	3.980	4.701
Sales	Concentración (mg/L)	Pesaje de Sales (g)		
Sulfato de magnesio (MgSO ₄)	400	$\frac{3.080 \times 400}{1.000} = 1.232$	$\frac{3.980 \times 400}{1.000} = 1.592$	$\frac{4.701 \times 400}{1.000} = 1.880$
Nitrato de calcio (CaNO ₃)	341	$\frac{3.080 \times 341}{1.000} = 1.050$	$\frac{3.980 \times 341}{1.000} = 1.357$	$\frac{4.701 \times 341}{1.000} = 1.603$
Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)	44	$\frac{3.080 \times 44}{1.000} = 136$	$\frac{3.980 \times 44}{1.000} = 175$	$\frac{4.701 \times 44}{1.000} = 207$
Fosfato monopotásico (KH ₂ PO ₄)	279	$\frac{3.080 \times 279}{1.000} = 859$	$\frac{3.980 \times 279}{1.000} = 1.110$	$\frac{4.701 \times 279}{1.000} = 1.312$
Fosfato diamónico ((NH ₄) ₂ HPO ₄)	67	$\frac{3.080 \times 67}{1.000} = 206$	$\frac{3.980 \times 67}{1.000} = 267$	$\frac{4.701 \times 67}{1.000} = 315$
Nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃)	288	$\frac{3.080 \times 288}{1.000} = 887$	$\frac{3.980 \times 288}{1.000} = 1.146$	$\frac{4.701 \times 288}{1.000} = 1.354$
Urea CO(NH ₂) ₂	82	$\frac{3.080 \times 82}{1.000} = 253$	$\frac{3.980 \times 82}{1.000} = 326$	$\frac{4.701 \times 82}{1.000} = 385$

Para un criterio de riego del 60%, se deberán aplicar por cada instancia de fertilización: 1.232 g de sulfato de magnesio + 136 g de sulfato de potasio + 859 g de fosfato monopotásico + 206 g de fosfato diamónico + 887 g de nitrato de amonio + 253 g de urea, considerando en otra instancia alternada la aplicación de 1.050 g de nitrato de calcio, para la unidad de manejo descrita.

Para un criterio de riego de riego del 50%, se deberán aplicar por cada instancia de fertilización: 1.592 g de sulfato de magnesio + 175 g de sulfato de potasio + 1.110 g de fosfato monopotásico + 267 g de fosfato diamónico + 1.146 g de nitrato de amonio + 326 g de urea,

considerando en otra instancia alternada la aplicación de 1.357 g de nitrato de calcio, para la unidad de manejo descrita.

Para un criterio de riego de riego del 40%, se deberán aplicar por cada instancia de fertilización: 1.880 g de sulfato de magnesio + 207 g de sulfato de potasio + 1.312 g de fosfato monopotásico + 315 g de fosfato diamónico + 1.354 g de nitrato de amonio + 385 g de urea, considerando en otra instancia alternada la aplicación de 1.603 g de nitrato de calcio, para la unidad de manejo descrita.

Como parte de un manejo de riego y fertilización adecuado, es necesario realizar las actividades tanto de riego como fertilización de forma alternada, de tal modo de realizar ciclos de manejo que se repitan de forma sistemática durante el proceso de viverización. Por ejemplo:

Riego – Fertilización (Macronutriente sin Ca) – Fertilización (Ca) – Fertilización (Micronutrientes)

De igual forma tanto durante las actividades de riego como fertirriego se debe alcanzar el peso de la almaciguera a la máxima retención del sustrato ($PS_{Max.Ret.}$).





IV. REFERENCIAS

Benson, R. R., 1997. Fertilizer technology. In: Haase, D. L. and Rose, R. (Eds.) Proceedings of the symposium on forest seedling nutrition from the nursery to the field. Nursery Technology Cooperative, Oregon State University. Pp 5-9.

Christensen, J. E., 1942. The uniformity of application of water by sprinkler systems. *Agricultural Engineering* 22: 89-92.

Duryea, M. and Lavender, D. P., 1982. Water relations, growth, and survival of root-wrenched Douglas-Fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 12: 545-555.

Escobar, R., 2007. Manual de viverización *Eucalyptus globulus* a raíz cubierta. Proyecto INNOVA- CORFO Chile 03C9FM-01. Desarrollo de estándares de origen de la semilla y la calidad de la planta para el aumento de la productividad en plantaciones y bosques naturales. Chile.

Epstein, E., 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology* 50: 641-664.

Fuller, W. H. and Halderman, A. D., 1975. Management for the control of salts in irrigated soils. Bulletin A-43. University of Arizona, Tucson.

Gallé, A.; Haldimann, P. and Feller, U., 2007. Photosynthetic performance and water relations in young pubescent Oak (*Quercus pubescens*) trees during drought stress and recovery. *New Phytologist* 174: 799-810.

Ganatsas, P. P. and Tsakalimi, M. N., 2007. Effect of light conditions and salinity on germination behavior and early growth of Umbrella Pine (*Pinus pinea* L) seed. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 82: 605-610.

Handreck, K. A. and Black, N. D., 1984. Growing media for ornamental plants and turf. Kensington, Australia: New South Wales University Press.

Huett, D. O. and Gogel, B. J., 2000. Longevities and nitrogen, phosphorous and potassium release patterns of polymer-coated controlled release fertilizers at 30 and 40°C. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 959-973.

Jacobs, D. F. and Wilkinson, K. M., 2008. Planning crops and developing propagation protocols. In: Dumroese, R. K.; Luna, T. and Landis, T. D. (Eds.) Nursery manual for native plants: A guide for tribal nurseries. USDA Forest Service. Pp 33-53.

Jacobs, D. F. and Landis, T. D., 2008. Fertilization. In: Dumroese, R. K.; Luna, T. and Landis, T. D. (Eds.) Nursery manual for native plants: A guide for tribal nurseries. USDA Forest Service. Pp 201-215.

Kramer, P. J., 1983. Water relations of plants. Academic Press. New York.

Landis, T. D., 1989. Mineral nutrients and fertilization. In: Landis, T. D.; Tinus, R. W.; McDonald, S. E. and Barnett, J. P. The Container Tree Nursery Manual, Volume 4. Agric. Handbook.

Luis, V. C.; Puértolas, J.; Climent, J.; Peters, J.; González-Rodríguez, A. M.; Morales, D. and Jiménez, M. S., 2009. Nursery fertilization enhances survival and physiological status in Canary Island pine (*Pinus canariensis*) seedlings planted in a semi-arid environment. *European Journal of Forest Research* 128: 221-229.

Mathers, H. M.; Yeager, T. H. and Case, L. T., 2005. Improving irrigation water use in container nurseries. *HortTechnology* 15(1): 8-12.

Mc Donald, S. E., 1984. Irrigation in forest-tree nurseries: Monitoring and effects on seedling growth. In: Duryea, M. L.; Landis, T. D. and Perry, C. R. (Eds) Forestry nursery manual: Production of bareroot seedlings. Forestry Sciences, vol 11. Springer, Dordrecht.

Mullin, T. and Hallett, R., 1983. Fertilization of containerized tree seedlings by the replacement method. Tech. Note 93. Fredericton, NB: Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre. P 8.

Oliet, J. A.; Puértolas, J.; Planelles, R. and Jacobs, D. F., 2013. Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: A Mediterranean perspective. *New Forests* 44: 649-669.

Pezeshki, S. R., 1992. Response of *Pinus taeda* L to soil flooding and salinity. *Annals of Forest Science* 49: 149-159.

Rose, R., 2002. Slow release fertilizers. In: Dumroese, D. L.; Riley, L. E. and Landis, T. D. (Eds.) National proceedings of the forest and conservation nursery associations. USDA Forest Service. Pp 304-308.

Schmal, J. L.; Dumroese, R. K.; Davis, A. S.; Pinto, J. R. and Jacobs, D. F., 2011. Subirrigation for production on native plants in nurseries – concepts, current knowledge, and implementation. *Native Plants Journal* 12: 81-93.

Taiz, L. and Zieger, E., 2006. Plant Physiology. 4th Ed.

Varone, L.; Ribas-Carbo, M.; Cardona, C.; Gallé, A.; Medrano, H.; Gratani, L. and Flexas, J., 2012. Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in seedlings and saplings of Mediterranean species pre-conditioned and aged in nurseries: Different response to water stress. *Experimental and Environmental Biology* 75: 235-247.

Villar-Salvador, P.; Planelles, R.; Oliet, J.; Peñuelas-Rubira, J. L.; Jacobs, D. F. and González, M., 2004. Drought tolerance and transplanting performance of Holm Oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24: 1147-1155.

Villar-Salvador, P.; Puértolas, J.; Cuesta, B.; Peñuelas, J. L.; Uscola, M.; Heredia-Guerrero, N. and Rey Benayas, J. M., 2012. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations: Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests* 43: 755-770.

Wood, B., 1994. Conifer seedling grower guide. Smoky Lake. Environmental Protection. P 73.



INFOR