



International
Fertilizer Industry
Association



Fertilización Foliar

Principios Científicos y Práctica de Campo

V. Fernández, T. Sotiropoulos
y P. Brown

Fertilización Foliar

Principios Científicos y Práctica de Campo

Victoria Fernández, Thomas Sotiropoulos
y Patrick Brown

La versión español fue traducida por Ricardo Melgar
y editada por Victoria Fernandez.

Las designaciones empleadas y la presentación del material en este producto de información no implican la expresión de opinión alguna por parte de la Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes. Esto incluye cuestiones relativas a la condición jurídica de cualquier país, territorio, ciudad o zonas, o de sus autoridades, ni respecto a la delimitación de sus fronteras o límites.

Fertilización Foliar: Principios Científicos y Práctica de Campo

V. Fernández, T. Sotiropoulos and P. Brown

Primera edición, versión revisada, IFA, París, Francia, Noviembre 2015

Copyright 2015 IFA. Todos los derechos reservados

ISBN 979-10-92366-03-7

La publicación puede ser descargada desde el sitio web de IFA.

Para obtener copias en papel, contacte a IFA.



Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes

28, rue Marbeuf

75008 Paris

Francia

Tel: +33 1 53 93 05 00

Fax: +33 1 53 93 05 45/ 47

publications@fertilizer.org

www.fertilizer.org

Twitter: [fertilizernews](#)

Impreso en Francia

Fotos de Tapa: Manzanas (Bigstock), Trigo (123RF), Pistachos, Melones (iStockphoto)

Diseño: Claudine Aholou-Putz

Grafica: Hélène Ginet

Contenidos

Acerca del libro	5
Acerca de los autores	5
Agradecimientos	7
Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos	7
Listado de términos	7
1. Introducción y objetivos	10
1.1. Una breve historia de la fertilización foliar	10
2. Los mecanismos de penetración en la planta	13
2.1. Rol de la morfología y estructura de la planta	16
2.1.1. Cutícula y estructuras epidérmicas especializadas	17
2.1.2. Efecto de la topografía: micro- y nano-estructura de la superficie de la planta	20
2.2. Vías y mecanismos de penetración	22
2.2.1. Permeabilidad cuticular	22
2.3. Conclusiones	30
3. Propiedades fisicoquímicas de las soluciones de pulverización y su impacto en la penetración	32
3.1. Factores determinantes de la retención de la pulverización, mojado de la hoja, cobertura y tasa de penetración	33
3.1.1. Concentración	33
3.1.2. Solubilidad	34
3.1.3. Peso molecular	34
3.1.4. Carga eléctrica	35
3.1.5. pH de la solución	35
3.1.6. Punto de deliquesencia	36
3.2. Ambiente	36
3.3. Formulaciones y coadyuvantes	37
3.3.1. Compuestos minerales aplicados con pulverizaciones foliares	38
3.3.2. Aditivos para la formulación: co-adyuvantes	39
3.4. Conclusiones	47

4. Factores ambientales, fisiológicos y biológicos que afectan la respuesta de las plantas a la fertilización foliar	49
4.1. Introducción	49
4.2. Edad, superficie, ontogenia, homogeneidad de la hoja y desarrollo de la canopia	51
4.3. Especies y variedades	58
4.4. Efecto del ambiente en la eficacia de los nutrientes aplicados por vía foliar	61
4.4.1. Luz	61
4.4.2. Temperatura	63
4.4.3. Humedad	65
4.5. Resumen de los efectos del ambiente sobre la respuesta de las plantas a la fertilización foliar	69
4.6. Movilidad y transporte de nutrientes	69
4.7. Conclusiones	80
5. Años de práctica – aprendiendo del campo	82
5.1. Tecnología de aplicación por pulverización	82
5.2. Formulaciones foliares tecnología de aplicación	84
5.3. Justificación biológica del uso de fertilizantes foliares	85
5.3.1. Rol de la fenología de los cultivos y del ambiente en la respuesta de las plantas	85
5.3.2. Influencia del ambiente en la eficacia de las aplicaciones foliares durante la primavera	86
5.3.3. Eficacia de las aplicaciones foliares para la floración y cuajado de granos en cultivos de campo	93
5.3.4. La fertilización foliar durante los picos de demanda de nutrientes	95
5.3.5. Pulverizaciones postcosecha y de final de estación	99
5.3.6. Fertilización foliar y calidad de los cultivos	100
5.4. Impacto del estado nutricional de la planta en la eficacia de los fertilizantes foliares	100
5.5. Fuentes y formulaciones de nutrientes para pulverización foliar	103
5.6. Toxicidad	108
5.7. Conclusiones	113
6. Consideraciones regulatorias y ambientales	115
6.1. Asuntos regulatorios	115
6.2. Consideraciones ambientales y de calidad alimentaria	116
6.3. Conclusiones	118
7. Perspectivas de la fertilización foliar	120
7.1. Conclusiones	123
8. Referencias	127

Acerca del libro

La fertilización foliar es una estrategia de nutrición de cultivos ampliamente utilizada y de creciente importancia a nivel mundial. Utilizándolos de manera adecuada, los fertilizantes foliares pueden ser más amigables con el medio ambiente y eficaces que la fertilización al suelo, aunque a veces la respuesta de las plantas a estos tratamientos puede ser variable y muchos de los factores implicados en la eficacia de fertilización foliar se desconocen a día de hoy.

El objetivo de éste libro es proporcionar información actualizada y clara sobre las bases científicas relacionadas con las respuestas de las plantas a la fertilización foliar, haciendo hincapié en los principales factores ambientales, fisiológicos y físico-químicos subyacentes. En los diversos capítulos del libro se discute la información extraída de investigaciones teóricas, ensayos de campo y estudios observacionales, así como sobre el estado de conocimiento de las técnicas de formulación y de aplicación de los fertilizantes foliares.

Acerca de los autores

Victoria Fernández

Grupo de Investigación en Genética Forestal y Ecofisiología, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Victoria Fernández trabaja como investigadora y profesora en la Universidad Politécnica de Madrid, España, desde principios de 2011. Obtuvo una Licenciatura en Ciencias en Horticultura en el University College, Dublín, Irlanda, y un doctorado (PhD) en la Humboldt University, Berlín, Alemania. Desde hace unos 15 años, la Dra. Fernández ha estado implementando estrategias de investigación aplicada y fundamental para analizar las superficies vegetales y su permeabilidad en relación a la nutrición vegetal, como estrategia para mejorar la efectividad de las pulverizaciones foliares. Victoria Fernández ha publicado aproximadamente 50 contribuciones científico-técnicas a este respecto y colabora en la diseminación de conocimiento, dando conferencias científico-técnicas en diversos lugares del mundo. Actualmente está enfocando sus investigaciones en el análisis de las propiedades físico-químicas de las superficies de las plantas desde un punto de vista eco-fisiológico y agronómico así también como su interacción con diversos agroquímicos de aplicación foliar.

Thomas Sotiropoulos

Ministerio de Desarrollo Rural y Alimentario, Organización Agrícola de Grecia 'Demeter', Instituto de Fruticultura, Naoussa, Grecia.

Thomas Sotiropoulos recibió una Licenciatura en Ciencias de la Agricultura en la Universidad Aristóteles de Tesalónica, Grecia, en 1993, una Maestría (MSc) en Fitomejoramiento y Fisiología Vegetal en 1996 y un doctorado (PhD) en la misma universidad en 1999. En la actualidad el Dr. Sotiropoulos es Investigador Asociado la Organización Agrícola de Grecia 'Demeter' del Instituto de Fruticultura, Naoussa. Sus principales intereses incluyen la investigación aplicada y fundamental en fertilización, así como el mejoramiento genético y su evaluación, principalmente en frutales de hojas caducas. Ha participado en varios proyectos de investigación nacionales y europeos y publicado diversos artículos sobre los temas anteriores. También se desempeñó como profesor a tiempo parcial en la Escuela de Agricultura de la Universidad Aristóteles de Tesalónica y el Instituto Alexander para la Educación Tecnológica de Tesalónica.

Patrick Brown

Profesor, Departamento de Ciencias Vegetales, Universidad de California, Davis, California, EE.UU.

Patrick Brown recibió una Licenciatura en Ciencias (con honores) en agronomía y bioquímica en la Universidad de Adelaida, Australia en 1984 y un doctorado en agronomía y desarrollo internacional agrícola de la Universidad de Cornell, EE.UU., en 1988. En la actualidad el Dr. Brown es Profesor de Nutrición Vegetal en el Departamento de Ciencias Vegetales de la Universidad de California, Davis. Su investigación se centra en el papel de los micronutrientes en el crecimiento y desarrollo de las plantas y abarca investigaciones desde biología fundamental hasta aplicación a campo y extensión. El Dr. Brown es autor de 150 artículos científicos, libros y capítulos de libros con importantes contribuciones en el área de fisiología del boro, el papel del níquel en biología de las plantas y mecanismos de transporte elemental en plantas.

Sus investigaciones actuales se centran en la optimización del uso de nutrientes en cultivos hortícolas y desarrollo de sistemas de soporte de decisiones para productores. El Dr. Brown ha sido Director de Programas Internacionales de la Universidad de California, Davis, y Presidente del Coloquio Internacional de Nutrición de Plantas y también trabaja frecuentemente como consultor de organizaciones gubernamentales, de la industria y de productores.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los muchos colegas académicos y de la industria de fertilizantes que han respondido a nuestras frecuentes preguntas y solicitudes de información. Los autores agradecen especialmente el apoyo de diversos productores y consultores que han sido fundamental para, en última instancia, demostrar lo que funciona, lo que no funciona y lo que no tiene sentido cuando se dan tratamientos foliares. Nos ha quedado claro que todavía tenemos mucho que aprender!

Lista de abreviaturas, acrónimos y símbolos

ATP	Adaptation to Technical Progress (<i>así usado en el libro</i>)
B	boro
B(OH)_3 o H_3BO_3	ácido bórico
Ca^{2+}	ion calcio
CaCl_2	cloruro de calcio
$\text{Ca(H}_2\text{PO}_4)_2$	fosfato de calcio
$\text{Ca(NO}_3)_2$	nitrato de calcio
Cu	cobre
DAFB	días después de plena floración
EC	Comisión Europea
EDDHA	etilenediamin-di-(2-hidroxí-5-sulfonilacetato)
EDDS	etilendiaminodisuccinato
EDTA	etilendiaminotetraacetato
EE.U.U.	Estados Unidos (de América)
EU	Unión Europea
Fe	hierro
FeCl_3	cloruro de hierro
$\text{Fe(NO}_3)_3$	nitrato de hierro
HEDTA	N-2-hidroxietil-etilendiaminotriacetato
H_3PO_4	ácido fosfórico

IDHA	ácido iminodisuccinico
K	potasio
kg ha ⁻¹	kg por hectárea
KCl	cloruro de potasio también conocido como muriato de potasio (MOP)
K ₂ CO ₃	carbonato de potasio
KH ₂ PO ₄	fosfato monopotásico
K ₂ HPO ₄	fosfato dipotásico
KM	metalosato de potasio
KNO ₃	nitrato de potasio
K ₂ SO ₄	sulfato de potasio
KTS	tiosulfato de potasio
lbs acre ⁻¹	libras por acre
Mg	magnesio
mg kg ⁻¹	miligramos por kilogramo
mg L ⁻¹	miligramos por litro
MgCl ₂	cloruro de magnesio
Mg(NO ₃) ₂	nitrato de magnesio
MgSO ₄	sulfato de magnesio
MKP	fosfato monopotásico
mM	milimoles (10 ⁻³ moles)
Mn	manganeso
mN m ⁻¹	miliNewton por metro
MnSO ₄	sulfato de manganeso
Mo	molibdeno
N	nitrógeno
Na	sodio
Na ₂ B ₄ O ₇	bórax
Na ₂ B ₈ O ₁₃	octoborato de sodio
NH ₄ H ₂ PO ₄	fosfato dihidrógeno deamonio
(NH ₄) ₅ P ₃ O ₁₀	tripolifosfato de amonio
Ni	níquel
nm	nanómetro (10 ⁻⁹ m)
P	fosforo
³² P	isótopo de fosforo
PHP	polihidroxifenilcarboxilato
PO ₄ ³⁻	fosfato
POD	punto de delicuescencia
PO(NH ₂) ₃	fosforil triamida
Q10	coeficiente de temperatura
Rb	rubidio
S	azufre
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
µg cm ²	microgramo por centímetro cuadrado

μL	microlitro
μM	micromolar
UV	ultravioleta
Zn	zinc
ZnSO_4	sulfato de zinc
°	grados
°C	grados Celsius

Listado de términos

Absorción	El proceso de transporte de nutrientes aplicados a las hojas o superficies vegetales, que conlleva el paso de los nutrientes a través de la superficie cuticular hacia el espacio celular, donde pueden tener un efecto fisiológico y metabólico.
Adsorción	La adherencia de nutrientes foliares aplicados a las superficies vegetales. En cualquier momento una proporción de los nutrientes adsorbidos puede no estar disponible para la absorción en el espacio celular, donde pueden tener un efecto fisiológico y metabólico.

1. Introducción y objetivos

La fertilización foliar es una herramienta importante para el manejo sostenible y productivo de los cultivos. Sin embargo, la comprensión actual de los factores que influyen para alcanzar la máxima eficacia de las aplicaciones foliares aún sigue siendo incompleta. Este libro ofrece un análisis integrado de los principios físico-químicos y biológicos, conocidos por su influencia en la absorción foliar y su utilización por la planta, así como una revisión sobre los resultados experimentales de laboratorio y de campo que proporcionan información sobre los factores que determinan en última instancia la eficacia de las aplicaciones foliares. La optimización de los tratamientos foliares no es posible sin una sólida comprensión de los principios físicos, químicos, biológicos y ambientales que rigen la absorción y utilización de los nutrientes aplicados mediante aspersiones. El objetivo de este libro es describir en detalle el estado del conocimiento sobre los mecanismos de la absorción por los órganos de la planta (principalmente hojas y frutos) de soluciones nutritivas aplicados en la superficie de las plantas, así como también describir los factores ambientales y biológicos y sus interacciones que son clave para comprender estos procesos. La información empírica obtenida en ensayos de pulverización foliar de nutrientes y las prácticas de campo se combinarán con una visión global del estado de conocimiento actual sobre los principios físicos, químicos y biológicos con objeto de facilitar una mejor comprensión de esta tecnología, su potencial, sus debilidades y los muchos factores que se desconocen al respecto a día de hoy. Los autores también se han esforzado en ilustrar los retos que plantea al la fertilización foliar, así como la investigación y desarrollo necesarios para su avance. Por lo tanto, la intención de este libro es dotar al lector con estos conocimientos y una visión general y actualizada de la fertilización foliar como estrategia complementaria a la nutrición radicular.

1.1. Una breve historia de la fertilización foliar

La capacidad de las hojas de la planta para absorber agua y nutrientes fue reconocida hace aproximadamente tres siglos (Fernández y Eichert, 2009). La aplicación de las soluciones de nutrientes al follaje de las plantas como estrategia alternativa para fertilizar un cultivo como las viñas, se utilizó ya al principio del siglo XIX (Gris, 1843). Aparte de este uso agronómico de la fertilización foliar, por aquel entonces los esfuerzos de investigación se enfocaron en tratar de caracterizar la naturaleza química y física de la cutícula de la hoja de la planta, la fisiología y la estructura celular de las hojas de las plantas, así como centrarse en los posibles mecanismos de penetración de las pulverizaciones foliares. Con la llegada de las nuevas técnicas primero de fluorescencia y luego de radio-marcado en la primera mitad del siglo 20, fue posible

desarrollar métodos más precisos para investigar los mecanismos de penetración foliar y la consiguiente translocación de los nutrientes dentro de las plantas luego de una aplicación foliar de soluciones nutritivas (Alexander, 1985; Fernández y Eichert, 2009; Fernández *et al.*, 2009; Kannan, 2010).

El papel de los estomas en el proceso de absorción foliar ha sido un asunto de interés desde los comienzos del siglo 20. Sin embargo en 1972 se postuló que el agua pura no puede infiltrarse espontáneamente a través de los estomas a menos que se aplique con la solución un agente tensioactivo que reduzca la tensión superficial a menos de a 30 mN m⁻¹ (Schönherr y Bukovac, 1972), cosa que posteriormente se ha comprobado que puede ocurrir al menos en algunas especies (Eichert *et al.*, 1998, Eichert y Goldbach, 2008). Como consecuencia de esto, la mayoría de las investigaciones posteriores se llevaron a cabo exclusivamente usando membranas cuticulares aisladas de superficies adaxiales (superiores) de hojas en las especies que podría conducirse procedimientos de aislamiento enzimáticos, por ejemplo, en hojas de álamo o de peral. Utilizando este sistema se encontró que las cutículas son preferentemente permeables a sustancias con una mayor componente apolar en sus moléculas (por ejemplo, como los aceites o muchos pesticidas, herbicidas o insecticidas). También se comprobó que el agua, los iones y otros compuestos polares también puede penetrar las cutículas (Fernández y Eichert, 2009; Kerstiens, 2010). En base a la concepción de la cutícula como una “membrana extra-celular lipídica”, aproximación que puede no ser correcta al haberse demostrado recientemente que este tejido parece ser una zona lipidizada de la pared celular de las células epidérmicas (Guzmán *et al.*, 2014a), Schönherr y sus colaboradores sugirieron la existencia de dos vías distintas de penetración de la cutícula, una para sustancias hidrofílicas y otra para sustancias lipofílicas, (Schönherr, 2006; Schreiber y Schönherr, 2009).

El papel que juegan los estomas en cuanto a la penetración foliar fue re-evaluado por Eichert y colaboradores desde finales de la década de los 90' (Eichert y Burkhardt, 2001; Eichert y Goldbach, 2008; Eichert *et al.*, 1998; Fernández y Eichert, 2009). En la actualidad la importancia cuantitativa de esta vía de absorción y la contribución de otras estructuras de la superficie de las hojas, tales como los tricomas, para la absorción de soluciones de fertilizantes foliares siguen sin conocerse bien.

Desde el primer registro de su uso con fines agrícolas en el siglo 19 (Gris, 1843), la fertilización foliar ha sido un tema de considerables investigaciones bajo ambiente controlado y de campo, y se ha adoptado como una práctica estándar para muchos cultivos (Alexander, 1985; Fernández y Brown, 2013). Las situaciones en las cuales es recomendable el uso de fertilizantes foliares incluyen, entre otras: 1) Cuando las condiciones del suelo limitan la disponibilidad de nutrientes aplicados al suelo; 2) Cuando pueden ocurrir condiciones que conduzcan a altas pérdidas de nutrientes aplicados al suelo; 3) Cuando interactúan las etapas de crecimiento del cultivo, la demanda interna de la planta y las condiciones ambientales para limitar la entrega de nutrientes a órganos críticos de la planta. En cada una de estas condiciones, la decisión de aplicar fertilizantes foliares se determina por la magnitud del riesgo financiero asociado con el fracaso de corregir la deficiencia del nutriente y la probabilidad percibida de eficacia de la fertilización foliar.

Además la fertilización foliar es teóricamente más amigable con el ambiente que la aplicación de nutrientes por vía radicular, tiene una acción más inmediata y orientada al objetivo que la fertilización del suelo ya que los nutrientes pueden ser aplicados directamente a los tejidos vegetales durante las etapas críticas del crecimiento de las plantas. Sin embargo, si bien la necesidad de corregir un estado de carencia nutricional en un cultivo puede estar bien definida, la determinación de la eficacia de la fertilización foliar puede ser mucho más incierta.

2. Los mecanismos de penetración en la planta

Los procesos mediante los cuales una solución de nutrientes que se aplica al follaje de un cultivo es asimilada por las plantas incluyen: contacto con la hoja y adsorción a la superficie de la misma, penetración cuticular/estomática/a través de otras estructuras epidérmicas, absorción celular y penetración en los compartimentos celulares metabólicamente activos en la hoja, y finalmente, en su caso, la translocación y la utilización de los nutrientes absorbidos por la planta. Desde el punto de vista práctico, con frecuencia es difícil distinguir estos procesos entre sí, aunque en muchos ensayos donde se utiliza el término ‘absorción foliar’ a menudo se refieren a un aumento del contenido de nutrientes en los tejidos sin considerar directamente el beneficio biológico relativo de la aplicación a la planta en su conjunto. Esta confusión e imprecisión complica enormemente la interpretación tanto en ambientes controlados de experimentos de laboratorio como de campo y, sin duda, ha dado lugar a respuestas inconsistentes y una incertidumbre general para predecir la eficacia de los tratamientos foliares. Por lo tanto los desafíos que se enfrentan son grandes tanto para los que practican la fertilización foliar como para los investigadores que tratan de entender los factores que determinan la eficacia de los fertilizantes foliares.

La superficie externa de la planta¹ se caracteriza por una compleja y diversa variedad de adaptaciones especializadas, de orden físico y químico, que sirven para mejorar la tolerancia de las plantas a una extensa lista de factores de estrés, que incluyen condiciones desfavorables de irradiación, temperaturas, déficit hídricos, vientos, pastoreo, daño físico, polvo, lluvia, contaminantes, productos químicos antropogénicos, insectos y patógenos. Las estructuras y superficies aéreas de las plantas también están bien adaptadas para controlar el intercambio bidireccional del agua y gases, y limitar así la pérdida de nutrientes, metabolitos y agua interna desde la planta al medio ambiente en condiciones desfavorables. Estas mismas características que protegen a la planta del estrés ambiental y regulan el intercambio de agua, gases y nutrientes son las mismas que afectan la absorción foliar de los nutrientes aplicados. Mejorar la eficacia y la reproducibilidad de la fertilización foliar requiere conocer los atributos físicos y químicos de la superficie de las plantas así como los procesos de penetración en la planta.

¹Para simplicidad usaremos el término ‘superficies aéreas de la plantas’ para significar las superficies externas de todos los órganos de la planta sobre el suelo incluyendo tallos, hojas, troncos y ramas, frutos, órganos reproductivos y otros órganos aéreos donde puede dirigirse las aplicaciones foliares.

Las superficies aéreas de las plantas generalmente están cubiertas por una capa denominada cutícula de carácter generalmente hidrofóbico. Adicionalmente las superficies vegetales a menudo poseen, células epidérmicas modificadas como tricomas y estomas. La superficie externa de la cutícula está cubierta por ceras que confieren un carácter hidrofóbico a la superficie de la planta. El grado de hidrofobicidad y polaridad de cada superficie vegetal en particular dependerá de la especie, su composición química y topografía (rugosidad) específica. Como las hojas, los frutos, las flores y los tallos también están protegidos por una cutícula y pueden contener estructuras epidérmicas como estomas² o tricomas³ que pueden modular la tasa de transpiración y contribuir a la absorción y transporte de agua y nutrientes críticos para el crecimiento, rendimiento y calidad de los frutos y las cosechas (Gibert *et al.*, 2005; Morandi *et al.*, 2010).

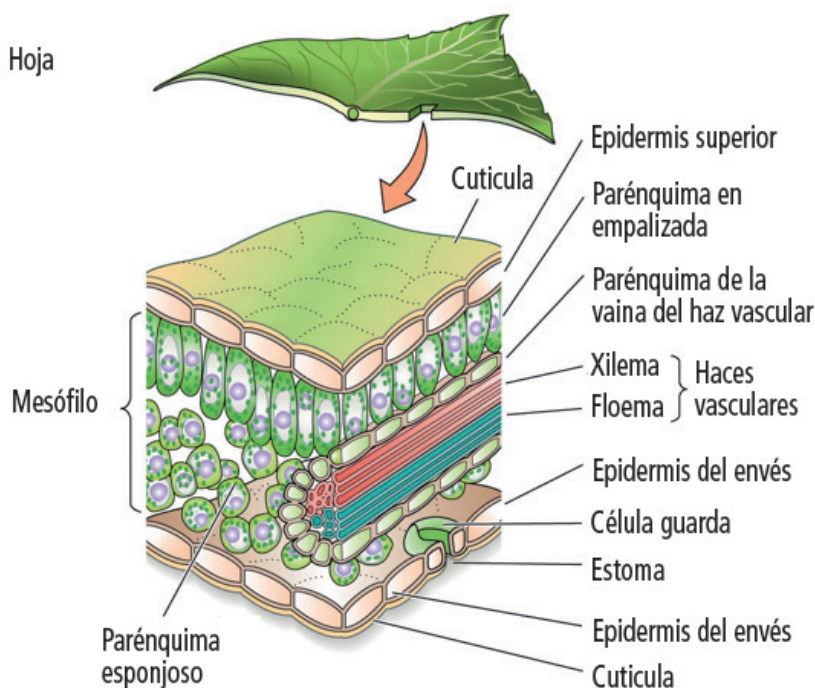


Figura 2.1. Estructura típica de la hoja de una dicotiledónea incluyendo los tejidos vasculares de una nervadura. (Reproducida con permiso de Plant Physiology, 4^{ta} Edición, 2007, Sinauer Associates).

²Los estomas son poros rodeados de dos células guarda que regulan su apertura y cierre; están presentes en altas densidades en las hojas y son responsables del control del intercambio gaseoso y transpiración de la planta.

³Pelos epidérmicos o protuberancias como cerdas.

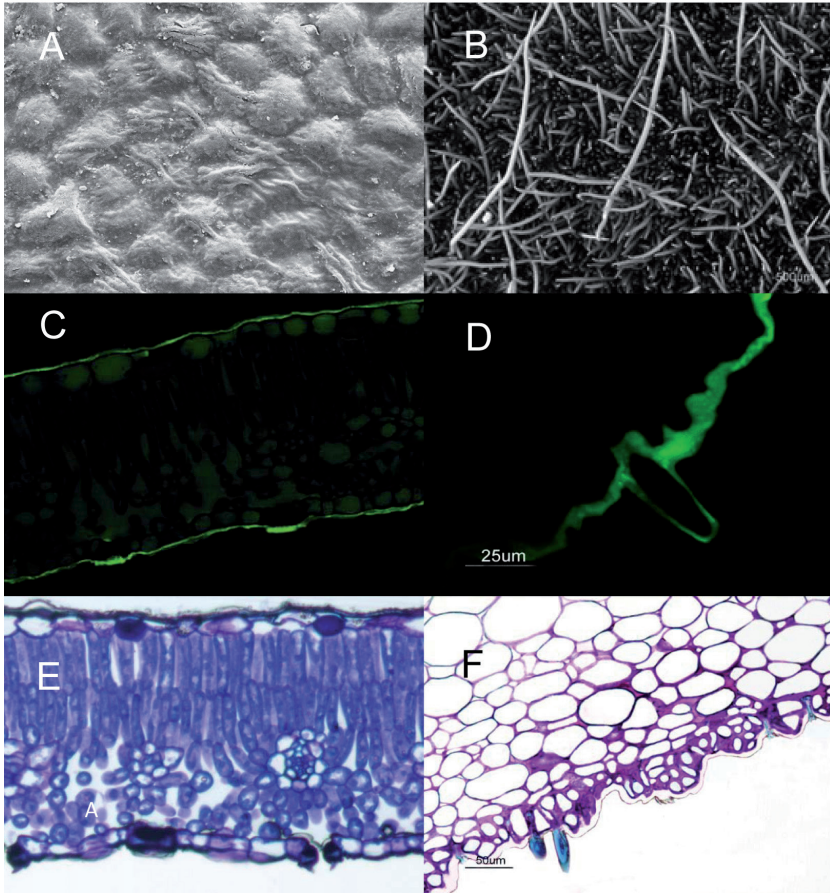


Figura 2.2. Micrografías de la hoja y del fruto del duraznero (melocotonero). Topografía de la superficie de una hoja (A) y fruto (B) observados mediante microscopía SEM (x400). Secciones transversales de una hoja y fruto de durazneros luego de teñir los tejidos con auramina O (observación bajo luz UV; C y D) y azul de toluidina (transmisión de luz; E y F) (micrografías A y B por V. Fernández; C y E por G. López-Casado; D y F por E. Domínguez).

El corte trasversal de una hoja típica de una angiosperma consta de una cutícula que cubre la parte superior e inferior de las células epidérmicas, las que encierran el mesófilo tal como se ilustra en la Figura 2.1. Las hojas de distintas especies difieren en su estructura pero en general consisten en un parénquima en empalizada cerca de la epidermis superior y parénquima esponjoso en la parte inferior (también conocido como mesófilo esponjoso). En este último hay grandes espacios entre las células (Epstein y Bloom, 2005). La epidermis es una capa compacta con dos o más capas de células (Figure 2.2.F). Las características principales de la epidermis en cuanto a su interacción con gotas de agua o agroquímicos y su posterior absorción están ligadas

a la estructura de las ceras epicuticulares y las células epidérmicas, además de con la presencia de estomas, tricomas u otras posibles estructuras epidérmicas.

La topografía superficial y estructura transversal de una hoja de duraznero y su fruto tomada con microscopio electrónico de barrido (“Scanning Electron Microscope”, SEM) y microscopio óptico luego de teñir los tejidos se muestra en la Figura 2.2. Tanto las superficies del fruto como la de la hoja teñidas con auramina O están cubiertas por una cutícula que emite una fluorescencia verde-amarillenta cuando se la observa con luz UV (Figura 2.2. C y D). La hoja tiene una cutícula que protege el lado abaxial (inferior) y adaxial (superior) de la misma, y los tricomas en la superficie del fruto también están cubiertos por una cutícula. En la superficie abaxial de la hoja del duraznero, los estomas están claramente presentes (aproximadamente 220 mm^{-2}) mientras que apenas unos pocos (aproximadamente 3 mm^{-2}) pueden verse debajo de los tricomas que cubre el fruto del melocotón (Figura 2.2. A y B) (Fernández *et al.*, 2008a; Fernández *et al.*, 2011). Se observa una capa de células epidérmicas debajo de la cutícula foliar abaxial y adaxial y encima de las células del mesófilo (Figura 2.2. E). Se encuentra también una epidermis multiseriada (o multi-estratificada) y desorganizada con tricomas unicelulares (también cubiertos por una cutícula) por encima de las células del parénquima y debajo de la superficie del fruto de durazno (Figura 2.2. F).

Cuando están presentes en las especies de plantas de hoja caduca, y siempre en las perennes, las hojas representan la mayor parte de la superficie total de la parte aérea y por lo tanto capturarán la mayor parte de lo que se aplique con un pulverizador. Así también interactuarán con el agua de lluvia, la niebla o el rocío. Si bien la principal función de la superficie de la planta es protegerla contra la deshidratación, la permeabilidad de estas superficies al agua y a los solutos puede desempeñar un papel eco-fisiológico crucial para absorber agua bajo condiciones hídricas limitantes (Fernández y Eichert, 2009; Limm *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2014a).

- Todas las partes aéreas de la planta están cubiertas por una cutícula que limita el intercambio bi-direccional de agua, solutos y gases entre la planta y el entorno ambiental.
- Las estructuras epidérmicas tales como estomas, tricomas, o lenticelas pueden aparecer en la superficie de los distintos órganos de la planta y desempeñar importantes funciones fisiológicas.

2.1. Rol de la morfología y estructura de la planta

El requisito fundamental para una pulverización foliar eficaz de nutrientes es que el ingrediente activo penetre en la superficie de la planta para que pueda resultar metabólicamente activo para las células adonde éstos se necesitan. Un producto químico aplicado por vía foliar puede cruzar la superficie de la hoja a través de la cutícula per se, a lo largo de grietas o imperfecciones de la cutícula, o a través de estructuras epidérmicas modificadas como los estomas, tricomas y lenticelas. La cutícula es una barrera eficaz contra la pérdida de agua que al mismo tiempo, limita la absorción de

productos de las aplicación foliares. La presencia de grietas cuticulares o la aparición de estructuras epidérmicas modificadas puede contribuir significativamente a aumentar la tasa de absorción de las aplicaciones foliares de nutrientes. Se describirán brevemente la estructura y composición de las superficies vegetales como base para entender su papel respecto a la absorción de las pulverizaciones foliares de los nutrientes aplicados.

2.1.1. Cutícula y estructuras epidérmicas especializadas

La cutícula que cubre las partes aéreas de la planta es una capa extracelular compuesta de una matriz de biopolímeros con ceras impregnadas dentro de la cutícula (intracuticular), o depositadas en la superficie (ceras epi-cuticulares), (Heredia, 2003). Del lado interno, una sustancia lipídica llamada cutina se mezcla con los polisacáridos de la pared celular epidérmica (Guzmán *et al.*, 2014a) la cual está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y pectinas. Por lo tanto, la cutícula puede considerarse una pared celular 'cutinizada', lo que enfatiza la naturaleza heterogénea de la composición de esta capa y la interacción fisiológicamente importante con la pared celular que subyace (Dominguez *et al.*, 2011; Guzmán *et al.*, 2014a).

La matriz de la cutícula está hecha de cutina, un bio-poliéster, formando monómeros de ácidos grasos hidroxilados y esterificados de 16 (C_{16}) y/o 18 carbonos (C_{18}) (Kolattukudy, 1980). La composición de este biopolímero puede variar según el órgano, especie y genotipo, etapa de desarrollo y las condiciones de cultivo (Heredia, 2003; Kerstiens, 2010). Si bien la cutina se despolimeriza y solubiliza al saponificarla, la cutícula de algunas especies pueden contener un polímero alternativo no saponificable ni extraíble, conocido como cutan, que produce una serie característica de cadenas largas de *n*-alquenos y *n*-alcanos luego de una pirólisis (Boom *et al.*, 2005; Deshmukh *et al.*, 2005; Villena *et al.*, 1999). Recientemente Boom *et al.* (2005) determinaron la presencia de cutan en las cutículas de las especies *Agave americana*, *Podocarpus sp.* o *Clusia rosea* y sugirieron que podría ser un biopolímero preservado en especial en plantas xeromórficas. La cutina es el único polímero presente en las cutículas de las hojas y frutos de muchas especies de *Solanaceae* y *Citrus* (Jeffree, 2006) mientras que en la remolacha (*Beta vulgaris*) el cutan es el único polímero que forma la matriz cuticular de la hoja (Jeffree, 2006). Proporciones variables de cutina y cutan han sido determinados en membranas cuticulares extraídas de las hojas de algunas especies de plantas tales como *Agave americana* (Villena *et al.*, 1999) y en algunos tipos de frutos tales como las bayas, manzanas y pimientos (Jarvinen *et al.*, 2010; Johnson *et al.*, 2007).

La ceras de la cutícula, ya sean aquellas depositadas sobre la superficie (ceras epicuticulares) o las que están impregnadas en la matriz cuticular (ceras intracuticulares) son mezclas de moléculas alifáticas (lineales) de cadena larga (principalmente de 20 a 40 átomos de carbono, siendo en general *n*-alcoholes, *n*-aldehídos, ácidos grasos de cadena muy larga o *n*-alcanos) y de compuestos aromáticos (cadena de anillos como por ejemplo las amirinas) (Samuels *et al.*, 2008). La composición de las ceras ha sido observada que varían entre diferentes especies, entre distintos órganos de la planta, la etapa de desarrollo y las condiciones ambientales reinantes (Koch *et al.*, 2006; Kosma *et al.*, 2009).

Además de la cutina o el cután y las ceras, en la cutícula pueden estar presentes cantidades y tipos variables de compuestos fenólicos, ya sea en forma libre incrustadas en la matriz o químicamente unidas a la cutina o las ceras por ésteres o uniones de ésteres (Karabourniotis y Liakopoulos, 2005). Se han determinado analíticamente en ceras epicuticulares y extractos de matriz de cutícula, y observados por microscopía de fluorescencia, derivados del ácido hidroxicinámico (p.ej. ácidos ferúlico, cafeico, o p-cumárico), ácidos fenólicos (p.ej. ácido vanílico) y flavonoides (p.ej. naringenina) (Karabourniotis y Liakopoulos, 2005; Liakopoulos *et al.*, 2001). Además del importante papel de los fenoles en la protección contra factores de estrés bióticos (microbios o herbívoros) y abióticos (radiación ultravioleta, contaminantes), también están implicados en la atracción de insectos polinizadores (Liakopoulos *et al.*, 2001).

La presencia de pectinas y celulosa en cutículas aisladas e intactas de hojas de álamo gris, peral y *Eucalyptus globulus*, se ha demostrado recientemente mediante el marcaje enzimático con oro coloidal (Guzmán *et al.*, 2014b). Además, después de la eliminación gradual de lípidos (ceras y cutina) en cutículas aisladas de hojas de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus camaldulensis* se observó por microscopía electrónica de transmisión (TEM) la existencia de una pared celular debajo de la estructura de toda la cutícula a excepción de la zona correspondiente a las ceras epicuticulares (Guzmán *et al.*, 2014b). Estos resultados muestran que existe una red de polisacáridos que puede ser la base de la estructura de la cutícula, un papel que hasta la fecha se ha asignado casi exclusivamente a la cutina (Kolattukudy, 1980). Por lo tanto, es probable que los lípidos cuticulares (cutina y ceras) estén impregnando y se encuentren intruidos en tal matriz de la pared celular, habiendo también ceras depositadas sobre la superficie de la cutícula (ceras epicuticulares), en estadios tempranos de la ontogenia de células epidérmicas (Jeffree 2006; Guzmán *et al.*, 2014b.). Estos autores sugieren que el modelo actual (ver Figura 2.7.) que asume que la cutícula se compone de una “cutícula propiamente dicha” compuesta exclusivamente de cutina y ceras, y una “capa cuticular” constituida por polisacáridos y cutina, debe ser revisado subrayando la naturaleza de pared celular lipidizada que parece tener la cutícula vegetal (Guzmán *et al.*, 2014a).

Muchas superficies de las plantas son pubescentes⁴ en mayor o menor grado, como se muestra en la Figura 2.3 para superficies adaxiales de hojas de soja, maíz y cerezo. De acuerdo a Werker (2000) los tricomas son apéndices unicelulares o multicelulares que se originan sólo de las células epidérmicas, y se proyectan hacia fuera de la superficie de varios órganos de las plantas. Los estudios científicos de estas estructuras epidérmicas

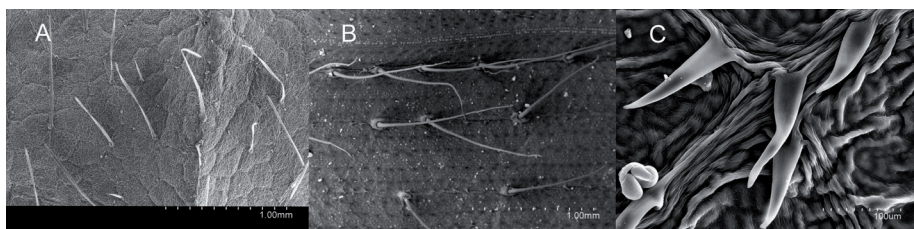


Figura 2.3. Superficie adaxial de hojas de: (A) soja; (B) maíz; y (C) cerezo (Micrografías de V. Fernández, 2010).

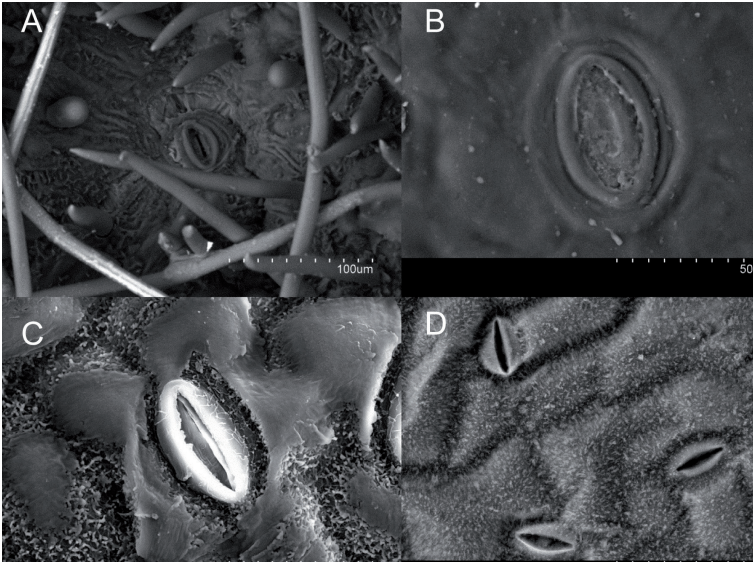


Figura 2.4. Micrografías SEM de estomas presentes en la superficie de: (A) frutos de melocotón; (B) cerezas; (C) superficie abaxial de la hoja de rosas; y (D) superficie abaxial de la hoja de brócoli (Micrografías de V. Fernández, 2010).

empezaron en el siglo 17 con énfasis principalmente puesto ya sea en los tricomas individuales o en las propiedades colectivas de la capa de tricomas referido como el indumento (Johnson, 1975). Los tricomas pueden crecer en todas las partes de la planta y se clasifican como “glandulares” o “no glandulares”. Mientras que estos últimos se distinguen por su morfología, los diferentes tipos de tricomas “glandulares” se definen por los materiales que excretan, acumulan o absorben (Wagner *et al.*, 2004; Werker, 2000). Los tricomas “no glandulares” presentan una gran variabilidad en tamaño, morfología y función, y su presencia es más prominente en las plantas que prosperan en hábitats secos y por lo general en los órganos jóvenes de la planta (Fahn, 1986; Karabourniotis y Liakopoulos, 2005).

Los estomas son células epidérmicas modificadas que controlan el intercambio gaseoso y las pérdidas de agua por transpiración. Están en general en el lado de abajo de la hoja, pero en algunas especies (conocidas como anfiestomáticas) incluyendo maíz y soja, también están en la parte superior. (Eichert y Fernández, 2011). Los estomas también están en la epidermis de muchos frutos como melocotones, nectarinas, ciruelas o cerezas aunque a menores densidades que en las hojas. La funcionalidad, morfología y densidad de los estomas varían entre especies y órganos (Figura 2.4) y pueden verse afectados por factores de estrés como deficiencias de nutrientes (Fernández *et al.*, 2008a; Will *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2014b), o las condiciones ambientales prevalecientes,

⁴Una superficie cubierta por tricomas.

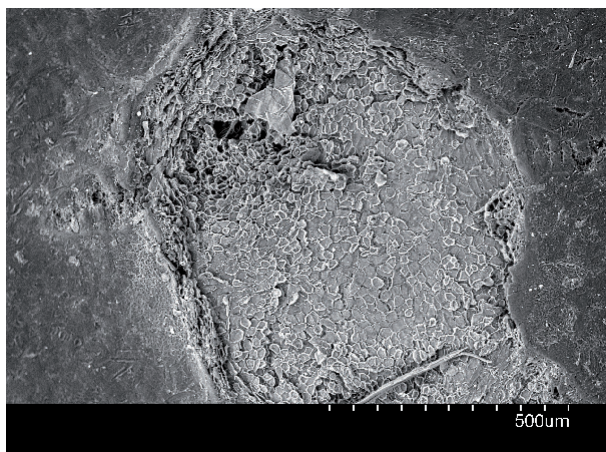


Figura 2.5. Micrografías SEM de una lenticela encontrada en la superficie de la piel de manzana "Golden Delicious" (Micrografía de V. Fernández, 2010).

tales como la intensidad y calidad de la luz como lo muestran los cambios observados en plantas que crecen bajo sombreado natural o artificial (Aranda *et al.*, 2001; Hunsche *et al.*, 2010).

Otro ejemplo de las estructuras epidérmicas que se producen en la superficies de las plantas son las lenticelas (Figura 2.5). Las lenticelas son estructuras macroscópicas que pueden producirse en los tallos, pedicelos o superficies de los frutos (i.e. están presentes en la cáscara de frutas de manzana, pera o mango) una vez que se ha formado la peridermis (corcho). Su origen de desarrollo se ha vinculado a los estomas, grietas epidérmicas y tricomas (Du Plooy *et al.*, 2006; Shaheen *et al.*, 1981).

La absorción de soluciones nutritivas por la superficie de la planta puede ocurrir a través de:

- La cutícula.
- Grietas e irregularidades de la cutícula.
- Estomas, tricomas, lenticelas u otras posibles estructuras epidérmicas.

2.1.2. Efecto de la topografía: micro- y nano-estructura de la superficie de la planta

La topografía de la superficie de la planta, según lo determinado por la composición y estructura de las ceras cuticulares en áreas lisas (sin tricomas) o en superficies con presencia de tricomas o capas de tricomas en superficies pubescentes, determinará sus propiedades y las interacciones con el agua, soluciones nutritivas, contaminantes, microorganismos, agroquímicos, etc.

Las superficies de las plantas tienen diferentes grados de mojabilidad cuando están en contacto con gotas de agua como se muestra en la Figura 2.6 para hojas y frutos de cuatro especies vegetales diferentes.

En la última década se han descrito las propiedades repelentes al agua y contaminantes de superficies de plantas con topografía rugosa (Barthlott y Neinhuis, 1997; Wagner *et al.*, 2003) así como también se clasificaron diferentes tipos de ceras epicuticulares para varias especies vegetales (Barthlott *et al.*, 1998; Koch y Ensikat, 2008).

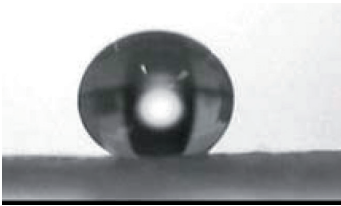
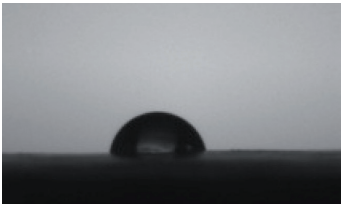
Órgano vegetal y especie	Angulo promedio de contacto con agua pura (°)	Imagen de la gota
Superficie superior (adaxial) de una hoja de <i>Eucalyptus globulus</i>	140	
Superficie superior (adaxial) de una hoja de <i>Ficus elastica</i>	83	
Superficie de fruto de melocotón de 'Calanda' (<i>Prunus persica</i> L. Batsch)	130	
Superficie una manzana (<i>Malus domestica</i> L. Borkh)	84	

Figura 2.6. Ángulo de contacto promedio con gotas de agua pura en el lado superior (adaxial) de hojas de *Eucalyptus globulus* (A) y *Ficus elastica* (B); y superficies de un melocotón (durazno) (C) y una manzana (D) (V.A. Fernández, 2011).

Las características químicas y estructurales de las superficies vegetales tienen un efecto sobre las interacciones con posibles líquidos, partículas, insectos o microorganismos depositados sobre las superficies (Khayet y Fernández, 2012). La presencia de una micro y/o nano-topografía asociada con la forma de las células epidérmicas (por ejemplo, papilas), y/o la estructura de las ceras epicuticulares, junto con la composición química de la superficie, puede aumentar notablemente la ‘rugosidad’ y el área superficial. La combinación de la rugosidad y composición química de las superficies vegetales determinará el grado de humectabilidad, la polaridad e hidrofobicidad de las mismas, así como la posibilidad de que se produzca la absorción de fertilizantes foliares aplicados sobre los órganos vegetales (Fernández y Brown, 2013; Fernández *et al.*, 2014a, b). Se pueden esperar diferencias en cuanto a la polaridad y la hidrofobicidad de las superficies vegetales en relación a su crecimiento en condiciones ambientales distintas, a diferentes especies o variedades, o distintos órganos vegetales. Todas estas posibles diferencias en las características de las superficies vegetales puede que tengan una influencia sobre la eficacia de pulverizaciones foliares de nutrientes. Fernández *et al.* (2011, 2014) examinaron las propiedades de una variedad de durazno (melocotón) que está cubierto por un indumento⁵ muy denso y de la hoja de la encina (*Quercus ilex*) como sistemas modelo de superficies vegetales pubescentes. La piel del melocotón y envés de la hoja de encina resultaron ser muy hidrófobas y repelentes al agua con ángulos de contacto con este líquido superiores a 130°. La estimación de las propiedades físico-químicas, tales como la energía superficial libre, polaridad, o el trabajo de adhesión del agua de los materiales vegetales, que pueden calcularse tras medir los ángulos de contacto de tres líquidos con diferente polaridad y apolaridad, puede ser crucial para una mejor caracterización de las interacciones entre las superficies vegetales y las gotas de agroquímicos (Khayet y Fernández, 2012; Fernández *et al.*, 2011, 2014a, b) como paso preliminar a la absorción foliar (Figura 2.6).

2.2. Vías y mecanismos de penetración

La estructura y química de la superficie de la planta afectará la difusión bi-direccional de las sustancias entre la superficie foliar y el entorno ambiental, y por lo tanto la velocidad de absorción de los fertilizantes foliares. En las secciones siguientes se describirán las vías de penetración superficial más importantes de las pulverizaciones con químicos, con énfasis en los mecanismos de permeabilidad cuticular y absorción estomática.

2.2.1. Permeabilidad cuticular

De acuerdo con el modelo imperante sugerido por von Molh (1847), la cutícula se compone de tres capas (Figura 2.7), a saber desde el exterior a las superficies internas del órgano de la planta): la capa de ceras epicuticulares (EW), la “cutícula propiamente dicha” (CP) que por definición está hecha de cutina y ceras y la “capa cuticular” (CL), que

⁵Una cubierta de tricomas.

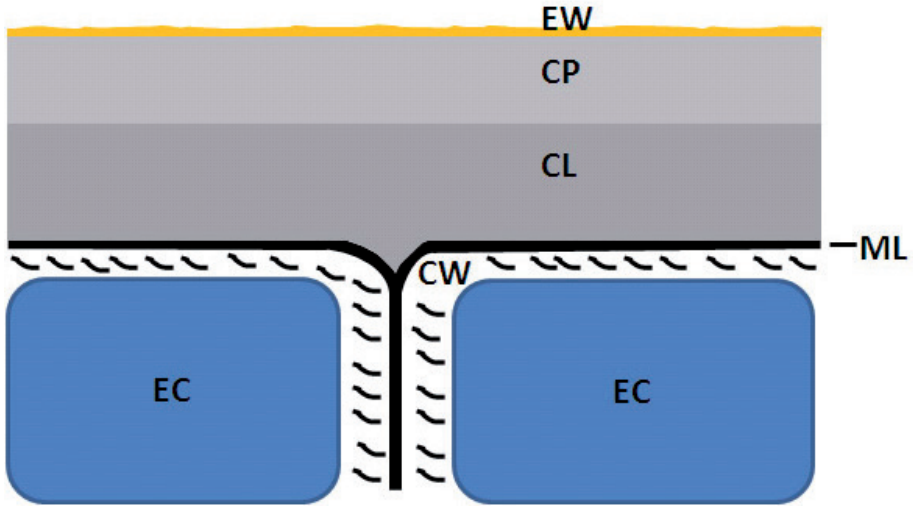


Figura 2.7. Representación esquemática de la estructura general de la cutícula de la planta que cubre dos células epidérmicas adyacentes (EC) separados entre sí por laminillas intermedias, una capa pectinosa (ML) y por la pared celular (CW). Las ceras epicuticulares (EW) se depositan sobre la cutícula propiamente dicha (CP). La capa cuticular (CL) está en contacto con la pared celular epidérmica (CW). Al parecer, tanto la CP como la CL tienen una estructura subyacente de pared celular (CW), la cual a veces puede observarse al extraer químicamente los componentes lipídicos (ceras y cutina; Guzmán *et al.*, 2004a)

contiene principalmente polisacáridos y cutina (Jeffree, 2006). Sin embargo, estudios recientes realizados con cutículas foliares de especies modelo con objeto de analizar la relación entre la ultra-estructura y la composición química de la cutícula (Guzmán *et al.* 2014a, b) han mostrado la presencia de pectinas y celulosa, y de la existencia de una red subyacente de polisacáridos por debajo de la cutícula exceptuando el área de la capa de ceras epicuticulares. Tal hallazgo sugiere que la cutícula más bien debe entenderse como una región de la pared celular epidérmica, que está impregnada de lípidos (cutina y ceras) como también han sugerido Yeats y Rose (2013) y Domínguez *et al.* (2011).

La existencia de una red de polisacáridos a lo largo de toda la sección transversal de la cutícula, con la excepción de la capa de ceras epicuticulares (EW), puede tener implicaciones significativas que no han sido evaluadas hasta ahora respecto, por ejemplo, a la bio-mecánica de la cutícula así como también contribuir al transporte de agua y solutos (Guzmán *et al.*, 2014a, b).

La capa EW es el componente más exterior y más hidrófobo de la cutícula y principalmente contiene ceras. La CP se encuentra debajo de las ceras epicuticulares y es a menudo difícil de distinguir mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM). Se ha creído tradicionalmente que la CP está estrictamente hecha de cutina (y/o cutan) y ceras (es decir, que la CP está libre de polisacáridos) (Jeffree, 2006), pero algunos estudios recientes han demostrado la presencia de pectinas y celulosa en esta capa. La CL se encuentra bajo la CP y está formada cutina/cután, pectinas y hemicelulosas que

aumentan la polaridad de esta capa debido a la presencia de grupos hidroxilo y grupos funcionales carboxílicos (Khayet y Fernández, 2012). La lámina media (rica en pectinas; ML) está situada debajo de la CL y tiene una alta polaridad y afinidad por el agua.

El aumento gradual de la polaridad desde la cera epicuticular a la capa de pectina puede facilitar el movimiento de cationes y moléculas polares (Franke, 1967; Khayet y Fernández, 2012). Sin embargo, es probable que las cutículas de diferentes especies, órganos, variedades o diversos estados de desarrollo, puedan presentar importantes variaciones químicas y estructurales, por lo que se prevee difícil poder establecer unos mecanismos generales de transporte para sustancias de diferentes naturaleza química. Las ceras intracuticulares limitan el intercambio de agua y solutos entre la planta y el medio ambiente circundante (Schreiber y Schönherr, 2009), mientras que las ceras epicuticulares influirán en la capacidad de humectación (Holloway, 1969; Koch y Ensikat, 2008), el grado de polaridad y adhesión o repelencia de las gotas (Khayet y Fernández, 2012) reflectancia de la luz (Lenk *et al.*, 2007; Pfündel *et al.*, 2006) y otras propiedades de la superficie de los órganos vegetales.

La cutícula vegetal puede ser considerada una membrana compuesta, ya que está principalmente hecha de polisacáridos polares e hidrófilos, y ceras y cutina que son más bien apolares e hidrófobas. Por lo tanto, dependiendo de la composición específica relativa de cada cutícula vegetal analizada, en términos de su cantidad y porcentaje de ceras, cutina y polisacáridos, diversas cutículas pueden ser más polares e hidrófilas, o más bien apolares e hidrófobas (Guzmán *et al.*, 2014a). Por lo tanto, la abundancia de compuestos lipídicos en la cutícula (ceras principalmente, pero también la cutina y cután) puede limitar la difusión de los compuestos hidrofílicos, polares y permitir una mayor tasa de transporte de compuestos que tienen componentes mayoritariamente apolares. Sin embargo, la permeabilidad de diversos compuestos agroquímicos puede variar en relación a posibles cambios en la estructura y composición química de la cutícula que surjan por ejemplo en relación al análisis de distintas especies o variedades, órganos, condiciones ambientales durante el crecimiento o diversos estados fenológicos (Khayet y Fernández, 2012). De hecho, los compuestos lipofílicos (que tiene una afinidad por las grasas) pueden penetrar la cutícula a mayores tasas que las disoluciones de electrolitos polares aplicadas en ausencia de agentes tensioactivos (Fernández y Eichert, 2009). Varios estudios dan prueba de la penetración cuticular de agua y solutos (compuestos polares) (Heredia, 2003; Riederer y Schreiber, 2001; Tyree *et al.*, 1992).

La evidencia experimental ha demostrado que las cutículas de las plantas son membranas asimétricas con un gradiente de estructura fina y ceras desde exterior al interior.

A continuación se discutirá brevemente sobre el estado actual de conocimiento de los mecanismos de penetración de los solutos polares y sustancias lipofílicas apolares a través de la cutícula. Sin embargo, los términos “polar”, “apolar”, “lipofílico” e “hidrofílico” se discutirán brevemente en aras de la claridad. La mayoría de las moléculas normalmente contienen grupos funcionales que proporcionan, propiedades apolares, polares e interacciones por puentes de hidrógeno. Por lo tanto, algunos compuestos como por ejemplo, los aceites, los insecticidas o los herbicidas, pueden tener una naturaleza predominantemente apolar pero también contienen grupos

funcionales polares y propensos a las interacciones por enlaces de hidrógeno (Khayet y Fernández, 2012). En la naturaleza se pueden encontrar proporcionalmente pocas sustancias puramente apolares, tales como los alcanos. Por otra parte, el agua es el disolvente principal utilizado para fines agrícolas y esta molécula se sabe que es polar. De este modo, las sustancias que son solubles en agua (es decir, los llamados “solutos” o “electrolitos”) se ionizan cuando se disuelven en agua pero también contienen partes apolares como grupos funcionales. Además, “lipofílico” es un término que indica que un compuesto tiene afinidad química por las grasas (conocidos químicamente como lípidos), mientras que “hidrófilo” sugiere una alta afinidad por el agua. Las sustancias hidrofílicas experimentan principalmente interacciones polares y de puentes de hidrógeno, mientras que las sustancias hidrófobas (que tiene una baja afinidad por el agua) y lipofílicas (estos dos términos están relacionados entre sí dentro de un contexto biológico) tienen un componente predominantemente apolar (Khayet y Fernández, 2012).

Una vez aclarado el significado de los términos polar, apolar, lipofílico e hidrofílico, se puede entender que la clasificación de los mecanismos de penetración cuticular en dos grupos según lo establecido en las dos últimas décadas, es decir, para compuestos apolar-lipofílicos frente a compuestos hidrofílicos-polares, es algo limitada y excesivamente restrictiva (Riederer y Friedmann, 2006; Schreiber y Schönherr, 2009). De este modo, en los párrafos siguientes, se hará referencia en términos generales a los mecanismos de penetración de compuestos lipofílicos e hidrofílicos, consciente de que las moléculas lipofílicas pueden contener predominantemente grupos funcionales apolares, y que los compuestos hidrófilos tienen un importante componente polar y significativas interacciones por puentes de hidrógeno (Khayet y Fernández, 2012).

La cutícula es una membrana asimétrica compuesta principalmente por ceras, cutina y/o cután, polisacáridos y pequeñas cantidades de fenoles:

- La capa de ceras epicuticulares está directamente en contacto con la atmósfera circundante y tiene un carácter mayoritariamente apolar.
- Las diferentes capas internas, pueden a veces distinguirse mediante TEM en las secciones transversales de la cutícula de diferentes especies y órganos. Estas capas están hechas de cutina y/o cután, ceras intracuticulares y polisacáridos, pero pueden presentar diferentes estructuras dependiendo de la disposición estructural de las moléculas constituyentes.
- La diferente polaridad, apolaridad e interacciones por puentes de hidrógeno que pueden ocurrir entre los grupos funcionales de las ceras, los polisacáridos, la cutina, el cután o los compuestos fenólicos presentes en la cutícula pueden facilitar o dificultar el proceso de penetración cuticular de compuestos agroquímicos predominantemente polares o apolares.

Permeabilidad de compuestos lipofílicos

Se ha propuesto que la penetración de sustancias apolares lipofílicas⁶ a través de la cutícula sigue un proceso de disolución-difusión (Riederer y Friedmann, 2006). Este modelo supone que el movimiento de una molécula lipofílica, de una solución que se deposita sobre la cutícula vegetal sigue un proceso de difusión a través de la cutícula (Riederer y Friedmann, 2006). Se ha propuesto que la difusión de una molécula lipofílica se rige por su coeficiente de partición, y la velocidad de penetración será proporcional a la solubilidad y la movilidad del compuesto en la cutícula (Riederer, 1995; Schreiber, 2006). A nivel molecular, tanto la disolución como la difusión de una molécula en la cutícula conlleva su paso entre poros y espacios moleculares de la matriz de los cuales pueden surgir por interacciones de carácter molecular (Elshatshat *et al.*, 2007).

Considerando la primer ley de Fick, el flujo de difusión (J ; $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se relaciona con el gradiente de concentración, con solutos que pasan de regiones de alta a baja concentración con una magnitud que es proporcional al gradiente de concentración (derivada espacial). De acuerdo al modelo de difusión cuticular, que ha sido detalladamente explicado por Riederer y Friedmann (2006), el flujo que difunde J es proporcional al coeficiente de transferencia de masa P (i.e. permeancia de la membrana; m s^{-1}) multiplicado por la diferencia de concentración entre el interior y las paredes exteriores de la cutícula.

La evidencia experimental demuestra que la cutícula es altamente selectiva para el tamaño y que puede actuar como un “tamiz molecular”. El tamaño de los poros sigue una distribución normal, y puede ser igual que el de algunos agroquímicos, los que pueden tener su difusión limitada a través de la cutícula.

$$J = P * (C_i - C_o)$$

donde: C_i es la concentración (mol m^{-3}) del lado interno de la cutícula y C_o es la concentración en el lado externo de la cutícula.

Bajo ciertas condiciones experimentales, la movilidad de una molécula puede predecirse calculando la permeancia, que es un valor específico para una molécula dada y una membrana cuticular en particular (Riederer y Friedmann, 2006). La permeancia ($P \text{ m s}^{-1}$) se expresa como:

$$P = D * K * l^{-1}$$

donde: D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es el coeficiente de difusión en la cutícula; K es el coeficiente de partición, que es la relación entre las concentraciones molares de equilibrio en la cutícula y de la solución en la superficie de la cutícula; y l (m) es la longitud del camino de difusión a través de la cutícula. La longitud de la trayectoria de difusión puede ser tortuosa y mucho mayor que el espesor de la cutícula determinada por las ceras intracuticulares (Baur *et al.*, 1999; Schönherr y Baur, 1994) y por la disposición espacial de las moléculas (Fernández y Eichert, 2009; Fernández and Khayet, 2012). El

⁶Compuestos solubles en solventes orgánicos, aceites o grasas.

coeficiente de difusión D también depende de la temperatura y la viscosidad del fluido de la solución de nutrientes foliares y el tamaño de las moléculas químicas que contiene.

En las últimas décadas se han desarrollado métodos para predecir la movilidad de los compuestos lipofílicos a través de la cutícula de unas pocas especies que permiten el aislamiento enzimático de cutículas sin estomas (adaxial) (Riederer y Friedmann, 2006; Schreiber, 2006; Schreiber y Schönherr, 2009).

La evidencia experimental demuestra que la cutícula es altamente selectiva para el tamaño (Buchholz *et al.*, 1998) y que puede actuar como un “tamiz molecular”. El tamaño de los poros sigue una distribución logarítmica normal que pueden estar en el mismo orden de magnitud de algunos productos agroquímicos cuya difusión a través de la cutícula puede ser limitada por problemas de tamaño (Schreiber y Schönherr, 2009). Sin embargo, la alta afinidad de moléculas lipofílicas tales como insecticidas, fungicidas, aceites o herbicidas por los componentes cuticulares lipídicos (cutina y ceras) facilitará su difusión y es responsable de su persistencia en la piel de diversos productos frutihortícolas (Khayet y Fernández, 2012).

Permeabilidad de electrolitos hidrofílicos

Los mecanismos de permeabilidad cuticular de los solutos se han investigado utilizando cutículas aisladas de órganos sin estomas, utilizando la misma metodología empleada para evaluar la penetración de sustancias lipofílicas (Schreiber y Schönherr, 2009). En ausencia de surfactantes, se ha comprobado que las soluciones de compuestos hidrofílicos⁷ (polares o electrolitos) penetran la cutícula a tasas menores en comparación a las sustancias lipofílicas. Algunos autores han sugerido que la tasa de penetración de los electrolitos determinado experimentalmente es demasiado alta para poder explicarla mediante un modelo de difusión y han propuesto que los solutos pueden penetrar la cutícula siguiendo una vía físicamente distinta, la cual han llamado ruta “polar o de los poros acuosos” (Schönherr, 2006; Schreiber, 2005; Schreiber y Schönherr, 2009). Sin embargo, esta hipótesis se basa en la suposición general de que la cutícula vegetal es una membrana extra-celular estrictamente lipófila e hidrófoba, mientras que la evidencia reciente sugiere que la cutícula debe ser interpretada como una región lipidizada de la pared celular epidérmica, la cual contiene una matriz de polisacáridos (Guzmán *et al.*, 2014a).

Se ha planteado la hipótesis de que tales “poros” pueden surgir de la absorción de moléculas de agua a grupos funcionales polares situados en la capa cuticular (Schönherr, 2000; Schreiber, 2005), como por ejemplo, los grupos carboxilo (Schönherr y Bukovac, 1972); éster y grupos hidroxilo de la cutina (Chamel *et al.*, 1991); y los grupos carboxilo e hidroxilo de los polisacáridos de la pared celular (Kerstiens, 2010; Schönherr y Huber, 1977). Sin embargo, hasta la fecha no existe evidencia experimental concluyente que apoye la existencia de los llamados “poros acuosos” y no existe ningún estudio en el que se muestren tales estructuras mediante algún método de microscopía (Fernández y Eichert, 2009). El tamaño de los llamados “poros acuosos” de unas pocas especies

⁷Compuestos miscibles/solubles en agua tales como sales minerales, quelatos o complejos

de plantas se ha estimado indirectamente a partir de los ensayos de permeabilidad cuticular. Se calcularon diámetros de aproximadamente 1 nm para hojas de cítricos tras la extracción de las ceras epicuticulares (Schönherr, 1976) y la cutícula de la hoja de hiedra (*Hedera helix*; Popp *et al.*, 2005). Sin embargo, Eichert y Goldbach (2008) calcularon diámetros de poros entre 4 a 5 nm para hojas intactas de café y álamo.

La presencia de pectinas y celulosa en la cutícula de algunas especies modelo analizadas se ha demostrado recientemente, y puede ser una alternativa a la hipótesis de los “poros acuosos” para explicar los mecanismos de permeabilidad cuticular de agua y solutos (Guzmán *et al.*, 2014a, b). Los polisacáridos tienen mayoritariamente componentes polares, y experimentan interacciones por puentes de hidrógeno. Estos compuestos tienen una mayor afinidad por el agua y solutos (compuestos polares), y es por tanto posible que estén implicados en los mecanismos de difusión cuticular del agua y los electrolitos (Khayet y Fernández, 2012).

- Los compuestos lipofílicos penetran la cutícula vegetal mediante un proceso de disolución-difusión.
- Los mecanismos de penetración cuticular de los compuestos hidrofílicos no están completamente aclarados todavía.

Permeabilidad de los estomas y otras estructuras de la superficie de la planta

La contribución potencial de los estomas a la penetración de los productos químicos aplicados a la hoja ha sido motivo de controversia por muchas décadas (Dybing y Currier, 1961; Schönherr y Bukovac, 1978; Turrell, 1947) y aún no está completamente entendida (Fernández and Eichert, 2009). Los primeros estudios destinados a evaluar el proceso de absorción por los estomas sugieren que ésta ocurre por infiltración es decir, por un flujo en masa de la soluciones aplicadas a través de los estomas abiertos y hacia el interior de la hoja (Dybing y Currier, 1961; Turrell, 1947; Middleton y Sanderson, 1965). Sin embargo, Schönherr y Bukovac (1972) sugirieron que la infiltración espontánea a través de un estoma abierto de una disolución acuosa no puede ocurrir sin una presión externa o la adición de un agente tensioactivo que reduzca la tensión superficial de la disolución por debajo de un cierto umbral (que ellos establecieron en 30 mN m⁻¹). Posteriormente, muchos estudios han demostrado la mayor tasa de absorción de las superficies foliares donde hay estomas y en especial cuando las condiciones experimentales favorecen su apertura (Eichert y Burkhardt, 2001; Fernández y Eichert, 2009). Investigaciones llevadas a cabo con hojas que contienen estomas solo en el lado de abajo demostraron tasas de penetración foliar mayores por el envés en comparación con el lado superior adaxial (Eichert y Goldbach, 2008; Kannan, 2010). Dado que estas observaciones contradicen las premisas de Schönherr y Bukovac (1972), se han propuesto varias hipótesis y se han llevado a cabo más estudios al respecto durante la última década sin estar los mecanismos de absorción estomática aún bien caracterizados. Se ha comprobado que hay mayores tasas de absorción cuando los estomas presentes están abiertos. Algunos autores han atribuido este fenómeno a la mayor permeabilidad de la cutícula periestomática y las células guarda (Sargent y Blackman, 1962; Schlegel

y Schönherr, 2002; Schlegel *et al.*, 2005; Schönherr y Bukovac, 1978) pero no se ha presentado ninguna evidencia concluyente que explique esta observación (Fernández y Eichert, 2009).

La contribución directa de los estomas en el proceso de penetración de soluciones acuosas aplicadas por vía foliar en ausencia de agentes tensioactivos ha sido posteriormente confirmada (Eichert *et al.*, 1998) en investigaciones de absorción por los estomas llevadas a cabo con partículas hidrofílicas suspendidas en agua (43 nm y 1 μm diámetro respectivamente) usando microscopia confocal laser de barrido, que demostró que la solución de tratamiento pasó a través de los estomas por difusión a lo largo de las paredes de los poros estomáticos (Eichert y Goldbach, 2008). Se reportó que este proceso fue lento y selectivo por tamaño dado que las partículas con un diámetro de 1 μm eran excluidas mientras que partículas de 43 nm atravesaron los poros.

Los mecanismos de absorción de solutos en frutas han sido objeto de pocas investigaciones. Algunos estudios han estimado la permeabilidad de las manzanas a las soluciones de Ca con frutos intactos (Mason *et al.*, 1974; Van Goor, 1973), cortes de frutos (Schlegel y Schönherr, 2002) o membranas cuticulares aisladas (Chamel, 1989; Glenn y Poovaiah, 1985; Harker y Ferguson, 1988; Harker y Ferguson, 1991). Schlegel y Schönherr (2002) reportaron una importante contribución de los estomas y tricomas en la absorción de soluciones de Ca aplicadas sobre la superficie durante las primeras etapas del desarrollo de los frutos. Sin embargo, la posterior desaparición de los estomas y tricomas, seguida por el sellado de las cicatrices remanentes en la cutina parecen reducir significativamente la permeabilidad de la superficie de las manzanas.

La contribución de los tricomas o lenticelas en los frutos en relación a los procesos de absorción de soluciones de nutrientes se ha estudiado en pocos casos. Harker y Ferguson (1988) y otros (Glenn y Poovaiah, 1985; Harker y Ferguson, 1991) sugirieron que las lenticelas presentes en las manzanas son sitios preferenciales para la absorción de disoluciones de Ca a través de la superficie del fruto, aunque esta posibilidad no ha sido evaluada en detalle hasta la fecha.

- Los estomas desempeñan un papel importante en la absorción de soluciones de nutrientes aplicadas al follaje.
- Los mecanismos de penetración estomática del agua pura no están todavía completamente caracterizados, pero parecen estar relacionados con un proceso de difusión a lo largo de las paredes del poro estomático.
- La adición de agentes tensioactivos a la formulación de la solución nutritiva mejora el proceso de absorción estomática (Capítulo 3).

2.3. Conclusiones

En éste Capítulo 2 se ha descrito el estado actual de conocimiento de los procesos de absorción de disoluciones a través de las superficies de la planta. Las plantas están cubiertas por una cutícula que limita la pérdida de agua, solutos y gases al medio ambiente externo, y a la inversa también impide su libre entrada al interior de la planta. Las características estructurales y químicas de las superficies vegetales hacen difícil el mojado, la retención y adsorción de las gotas de una disolución nutritiva (polar) aplicada sobre el follaje. Teniendo en cuenta el estado actual de conocimiento, pueden abordarse las siguientes certezas, incertidumbres y oportunidades para la aplicación de fertilizantes foliares.

Certezas

- Las superficies de las plantas son permeables a las soluciones nutritivas.
- La facilidad con la que una solución nutritiva puede penetrar al interior de la planta dependerá de las características de la superficie vegetal en cuestión, que pueden variar en función del órgano, la especie, la variedad y las condiciones ambientales durante el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como debido a las propiedades físico-químicas de las formulaciones de fertilizantes foliares.
- Las superficies de las plantas están generalmente cubiertas por una capa de ceras epicuticulares.
- El micro y nano relieve asociado a la estructura de las células epidérmicas y las ceras epicuticulares depositadas sobre las superficies vegetales, junto con la composición química de estas ceras, determinará la polaridad e hidrofobicidad de la superficie de cada planta/órgano en particular.
- Las estructuras epidérmicas como las estomas, tricomas o lenticelas, que están presentes en las superficies de hojas y frutos, son permeables a las disoluciones aplicadas a la superficie y pueden desempeñar un papel significativo en cuanto a la absorción de agroquímicos.
- Las sustancias lipofílicas atraviesan la cutícula mediante un proceso de disolución - difusión.

Incertidumbres

- Los mecanismos de penetración cuticular de los compuestos polares (por ejemplo, el agua o fertilizantes foliares en solución acuosa) no están aún bien caracterizados.
- La contribución de la vía estomática al proceso de absorción foliar debe ser aún mejor esclarecida, así como el papel de otras estructuras epidérmicas como los tricomas o las lenticelas.
- Mejorar la efectividad de los fertilizantes foliares requerirá una mejor comprensión de los fenómenos de contacto en la interfase entre el líquido (i.e. la formulación de fertilizantes foliares) y el sólido (i.e. la superficie de la planta).

- La efectividad de los tratamientos con nutrientes foliares mejorará una vez que los mecanismos de absorción foliar sean mejor entendidos en el futuro.

Oportunidades

- Múltiples experimentos científicos y estudios aplicados llevados a cabo en el siglo pasado han demostrado que las superficies de la planta son permeables a los fertilizantes foliares.
- Esta permeabilidad presenta la oportunidad de suministrar nutrientes a los tejidos y órganos de la planta como método complementario a la absorción radicular y que permite sortear los mecanismos de translocación que pueden limitar el suministro de nutrientes a las plantas bajo ciertas condiciones de crecimiento y en relación a los elementos inmóviles.
- La fertilización foliar tiene un gran potencial y debe ser más explorada y explotada en el futuro, como requisito indispensable para la optimización de los tratamientos.

3. Propiedades fisicoquímicas de las soluciones de pulverización y su impacto en la penetración

La absorción de nutrientes aplicados al follaje de una planta envuelve una compleja serie de procesos y eventos. El principal proceso implicado incluye la formulación de la solución de nutrientes; la atomización de la solución a pulverizar y el transporte de las gotitas pulverizadas hasta la superficie de la planta; el mojado, esparcimiento y retención de la solución por la superficie de la planta; la formación de un residuo de pulverización en la superficie; y la penetración y distribución de los nutrientes a los sitios de reacción (metabólico) (Young, 1979). Los eventos mencionados están interrelacionados y se superponen de forma que un cambio en uno de ellos normalmente tiene un efecto en los otros, y cada proceso es afectado por los factores de crecimiento de la planta, condiciones ambientales y parámetros de aplicación (Bukovac, 1985).

Las propiedades de las formulaciones de pulverización son cruciales para determinar la eficiencia de los fertilizantes foliares (Alexander, 1985), especialmente porque al momento de realizar el tratamiento, la mayoría de los factores implicados no se pueden controlar, pese a que es crucial elegir bien las condiciones ambientales en el momento de aplicar los tratamientos. Los fertilizantes foliares se aplican en general como disoluciones acuosas que contienen compuestos de elementos minerales como ingredientes activos. Las características fisicoquímicas de los compuestos minerales específicos de la solución acuosa, tales como la solubilidad, pH, punto de delicuescencia (POD) y peso molecular, tienen una influencia primaria en la tasa de absorción del elemento por la hoja. Sin embargo, a menudo se le agrega un conjunto de aditivos que pueden modificar las propiedades de la solución fertilizante, con la intención de mejorar el resultado final de la pulverización de nutrientes. La tasa de retención, de mojado, de cobertura y resistencia al lavado por las lluvias de una pulverización foliar de nutrientes está gobernada por las propiedades fisicoquímicas de la formulación. Éstas pueden contener compuestos químicos con características diferentes que pueden interactuar entre sí cuando están juntos en la solución acuosa.

Cuando una solución acuosa se aplica a la hoja, inicialmente hay una alta tasa de penetración que decrece con el tiempo, resultante del secado de la disolución aplicada (Sargent y Blackman, 1962). Este secado está influido por las condiciones ambientales prevalentes y por la formulación de la solución foliar pulverizada.

En las secciones siguientes, se describirán en términos teóricos y aplicados, las principales propiedades fisicoquímicas de las formulaciones de fertilizantes foliares que puede afectar y mejorar su performance (eficacia).

- El agua es la matriz que generalmente se usa en las pulverizaciones foliares de nutrientes.
- Las superficies de las plantas son hidrofóbicas en mayor o menor grado, y el área de contacto de las gotas de agua pura puede ser pequeña, dependiendo de las características de la superficie (rugosidad y composición química).
- El ambiente prevaleciente afectará las propiedades fisicoquímicas y la performance de las formulaciones en la superficie de las hojas.

3.1. Factores determinantes de la retención de la pulverización, mojado de la hoja, cobertura y tasa de penetración

La respuesta de las plantas a los fertilizantes foliares puede verse afectada por las propiedades de la solución de pulverización, determinando el éxito para alcanzar la absorción y translocación de los nutrientes aplicados en los órganos de la planta. Mientras que el proceso de absorción de las soluciones aplicadas a la hoja es complejo y no está plenamente esclarecido en la actualidad (Capítulo 2), las propiedades de las formulaciones están asociadas a estrictos principios físico-químicos así como a las condiciones ambientales prevalentes (Por ej. humedad relativa o temperatura ambiente) al momento del tratamiento. La siguiente sección proveerá un recuento de los principales factores fisicoquímicos en relación con la aplicación foliar de soluciones de nutrientes.

3.1.1. Concentración

En el Capítulo 2 se mostró que los modelos actuales de difusión cuticular están basados en la primera ley de Fick, que relaciona el flujo de difusión al gradiente de concentración entre las partes externas e internas de la superficie de la planta. La concentración de un nutriente presente en un spray foliar siempre será significativamente más alta que la concentración encontrada dentro del órgano de la planta. Por lo tanto, se establecerá un gradiente de concentración cuando se aplique una solución nutritiva a la superficie de la planta y ésta conducirá potencialmente a la difusión a través de su superficie. Se han reportado mayores tasas de penetración asociadas a concentraciones crecientes de varios elementos minerales aplicados, en estudios llevados a cabo con cutículas aisladas (Schönherr, 2001) y hojas intactas (Zhang y Brown, 1999a; Zhang y Brown, 1999b). Sin embargo, las relaciones entre la concentración de la solución aplicada y las tasas de penetración foliar no están completamente entendidas. Se ha observado una correlación negativa entre concentraciones crecientes de quelato de Fe y las tasas de penetración a través de cutículas aisladas en hojas intactas, expresadas como porcentaje del total aplicado (Schlegel *et al.*, 2006; Schönherr *et al.*, 2005). Una correlación negativa similar fue reportada para K aplicado por vía foliar (Ferrandon y Chamel, 1988) y otros elementos (Tukey *et al.*, 1961). Se cree que la disminución de la penetración relativa con concentraciones más altas de K puede deberse a una progresiva saturación de los sitios de absorción (Chamel, 1988). Como hipótesis alternativa, se plantea que las sales y quelatos de Fe pueden reducir el tamaño de los canales hidrofílicos al inducir una

deshidratación parcial de los poros en la cutícula (Schönherr *et al.*, 2005; Weichert y Knoche, 2006a; Weichert y Knoche, 2006b).

El rango ideal de concentraciones de las soluciones de nutrientes minerales para la aplicación foliar debería elegirse de acuerdo a factores tales como la clase de nutriente (por ej. macro- o micronutriente), especie vegetal, edad de la planta, estado nutricional y condiciones ambientales (Kannan, 2010; Wittwer y Teubner, 1959; Wojcik, 2004), y todos ellos estarán en definitiva limitados por la necesidad de evitar la fitotoxicidad.

3.1.2. Solubilidad

Antes de aplicar una formulación foliar pulverizada, es crucial que los compuestos que contenga estén apropiadamente disueltos o suspendidos. Los fertilizantes foliares están por lo común disueltos o suspendidos en agua y contienen diversos compuestos químicos como ingredientes activos, tales como sales, quelatos o complejos de nutrientes minerales. La solubilidad de un compuesto químico en un solvente específico (normalmente el agua) a una temperatura determinada, es una propiedad física que puede alterarse con el uso de aditivos. El límite de solubilidad de una sustancia en un solvente se refiere como la concentración de saturación donde agregar más soluto no aumenta la concentración de la solución. La solubilidad en agua de una sustancia aplicada es un factor clave para la absorción foliar, dado que la absorción teóricamente solo ocurre cuando el compuesto aplicado se encuentra en fase líquida sobre la superficie de la planta, y que subsecuentemente se difundirá hacia los órganos de la planta. Sin embargo, estudios recientes muestran la absorción de nutrientes suministrados como suspensiones de nano-partículas (Vu *et al.*, 2013; Kaiser, 2014; Li *et al.* 2014)

3.1.3. Peso molecular

El tamaño de la molécula del nutriente en disolución afectará la tasa de penetración de un fertilizante foliar como consecuencia del mecanismo de absorción cuticular, el cual se ha comprobado que es selectivo en cuanto al tamaño molecular. Se ha sugerido que el agua y los solutos cruzan la cutícula por vía de los poros acuosos (Schönherr, 2006), por un continuo acuoso (Beyer *et al.*, 2005), pero pocos estudios han estimado el radio de dichos poros por medios indirectos y nunca han sido vistos microscópicamente (ver Capítulo 2). Es probable que la difusión de agua y solutos esté relacionada con los polisacáridos presentes en la cutícula (Guzmán *et al.*, 2014a), como se ha discutido en el capítulo anterior. El radio de los llamados “poros acuosos” de unas pocas especies vegetales se ha estimado indirectamente y ronda entre 0.3 y 0.5 nm en hojas y entre 0.7 y 1.2 nm en los frutos (Beyer *et al.*, 2005; Luque *et al.*, 1995; Popp *et al.*, 2005; Schönherr, 2006). Sin embargo se han calculado radios de poros más grandes, entre 4 y 5 nm para la cutícula del café y de álamos por Eichert y Goldbach (2008). Varios experimentos con solutos y membranas cuticulares diferentes han mostrado que el proceso de permeabilidad cuticular es selectivo por tamaño, limitando la entrada de compuestos de alto peso molecular (más grandes) mientras que sí entran las moléculas de bajo peso molecular (Schreiber y Schönherr, 2009).

Eichert y Goldbach (2008) demostraron la importancia de la vía de penetración estomática en relación con la absorción foliar (Capítulo 2). Sin embargo, sugirieron que

el proceso de absorción de los estomas también puede ser selectivo en cuanto al tamaño ya que no se vio evidencia de que las partículas con un diámetro de 1 μm entraran a través de los estomas mientras que las partículas de 43 nm de diámetro penetraron en los estomas (Eichert y Goldbach, 2008). Sin embargo, algunos estudios han demostrado la absorción foliar de elementos esenciales suministrados al follaje como nanopartículas y es posible que los mecanismos de transporte estén relacionados con la ruta penetración estomática (Vu *et al.*, 2013; Kaiser, 2014; Li *et al.*, 2014).

3.1.4. Carga eléctrica

Las sales son electrolitos y se disocian en iones libres cuando se disuelven en agua, siendo la solución final eléctricamente neutra. Los aniones y cationes presentes en la solución acuosa se hidratarán o solvatarán en diferente grado, dependiendo de sus características fisicoquímicas. El mismo fenómeno se da con los nutrientes aportados como quelatos o complejos, dado que con pocas excepciones la mayor parte de estos compuestos no son neutros y por lo tanto se ionizarán cuando se disuelvan en agua. Por ejemplo, muchos de los quelatos de Fe disponibles en el mercado están cargados negativamente (Fernández y Ebert, 2005; Fernández *et al.*, 2005). A $\text{pH} > 3$ la cutículas vegetales están cargadas negativamente (Schönherr y Huber, 1977) y las paredes celulares tienen cargas que se corresponden a ácidos débiles disociados (Grignon y Sentenac, 1991). Consecuentemente, los compuestos sin carga y aniones o compuestos con carga negativa pueden en teoría penetrar las hojas y ser translocados en el apoplasto⁸ más fácilmente que los complejos cargados positivamente o cationes.

Sin embargo, cuando se aplican sales o quelatos o complejos, estos dos últimos formados al mezclar sales metálicas con ligandos acompañados con su propio ion correspondiente, todos los aniones y cationes presentes en la disolución pueden penetrar a través de las superficies vegetales. La naturaleza de los aniones y cationes en la solución foliar aplicada tendrá significancia fisiológica y deberá considerarse cuando se diseña una formulación foliar.

3.1.5. pH de la solución

Dado que las cutículas de las plantas son poli-electrolitos, su capacidad de intercambio catiónico se alterará con las fluctuaciones del pH (Chamel y Vitton, 1996). Las cutículas tienen un punto isoelectrico alrededor de pH 3 y cuando los valores de pH de la solución son más altos que éste, dejarán a la cutícula cargada negativamente, uniéndose entonces los grupos carboxílicos a los iones cargados positivamente (Schönherr y Bukovac, 1972; Schönherr y Huber, 1977).

Si bien está claro que el pH de la solución a pulverizar puede causar un efecto en cuanto a la tasa de penetración, éste efecto no ha sido aún bien caracterizado, y dependerá de los nutrientes aplicados y la especie vegetal tratada. En la mayor parte de los informes científicos sobre fertilización foliar normalmente no se hace referencia al pH de la solución nutritiva aplicada al follaje, una omisión crítica particularmente cuando se

⁸Espacio extracelular, no viviente, alrededor de las células vivas (i.e. el simplasto).

da el caso de elementos minerales como el Fe de pH inestable. Cook y Boynton (1952) informaron la mayor absorción de urea por hojas de manzano en el rango de pH de 5.4 a 6.6. Más aún, la tasa de absorción más alta registrada en hojas de citrus luego de una fertilización foliar con urea fue verificada adonde el pH de la solución se mantuvo entre 5.5 y 6.0 (El-Otmani *et al.*, 2000). Trabajando con compuestos de Fe, Fernández *et al.* (2006) y Fernández y Ebert (2005) observaron que valores de pH alrededor de 5 fueron óptimos para la absorción foliar de soluciones que contenían Fe. Blanpied (1979) mostró que la máxima absorción de Ca por hojas de manzano ocurrió cuando el pH de la solución osciló entre 3.3 y 5.2. Sin embargo, Lidster *et al.* (1977) reportó que tasas más altas de absorción de Ca por frutos de cereza (*Prunus avium L.*) se observaron cuando se aplicó una solución de CaCl_2 de pH 7. Reed y Tukey (1978) observaron una absorción máxima de Ca por hojas de crisantemos cuando el pH de la solución se mantuvo entre 3 y 6 para fosfato de sodio, y entre pH's 7 y 10 para fosfato de potasio.

Con frecuencia la pulverización de tratamientos foliares de sales disueltas en agua pura alterará el pH de la solución y pudiendo tener algunas formulaciones valores extremos de pH, influyendo por lo tanto al proceso de absorción por el follaje. Por ejemplo, la mayoría de las sales de Fe(III)–son muy ácidas, mientras que una solución al 1% de CaCl_2 o al 8% de K_2SO_4 tendrá valores de pH encima de 9.

3.1.6. Punto de deliquesencia

El proceso de hidratación y disolución de una sal está determinado por su punto de deliquesencia (POD) que es una propiedad física de un compuesto asociada a una determinada temperatura (Schönherr, 2001). Las sales deliquescentes son sustancias higroscópicas (i.e. capaces de atrapar agua del ambiente circundante) y se disolverán una vez que se haya alcanzado el punto crítico de humedad relativa. El punto de deliquesencia se define como el valor de humedad relativa al cual la sal se vuelve un soluto. Por ello, cuanto más bajo es el punto de deliquesencia de una sal, más rápido se disolverá a la exposición a la humedad relativa ambiente (Fernández y Eichert, 2009). Cuando la humedad relativa ambiente es más alta que el punto de deliquesencia de un compuesto aplicado por vía foliar, la sustancia se disolverá y se volverá disponible para ser absorbida por la hoja. El efecto de la humedad relativa en la solución o la cristalización de sales ha sido evaluado en varios estudios llevados a cabo con membranas cuticulares y hojas intactas, la que podría ser mejor explorada siguiendo las practicas experimentales usadas en investigación con aerosoles (Fernández y Eichert, 2009). Similarmente, los efectos fisiológicos asociados con la deposición de partículas higroscópicas de aerosoles sobre la superficie de las plantas no están totalmente comprendidos, pero se considera que tales partículas pueden ya sea actuar como desecantes del follaje, o promover un aumento de la tasa de absorción (Burkhardt, 2010).

3.2. Ambiente

Los factores ambientales tales como la humedad relativa y la temperatura juegan un rol importante en la performance de las pulverizaciones foliares y en la absorción de soluciones aplicadas al follaje. El ambiente también puede alterar la eficacia de las

pulverizaciones foliares a través de su influencia en la biología de la planta, procesos que serán discutidos en el Capítulo 4.

Se describirán los factores ambientales más relevantes que afectan la performance de las soluciones cuando son pulverizados en el follaje considerando que bajo condiciones de campo, la continua interacción entre tales factores resultará en respuestas y efectos fisiológicos y fisicoquímicos diferentes. El efecto del ambiente sobre los fenómenos relacionados con la absorción foliar serán discutidos en más detalle cuando se describan los factores biológicos que afectan la eficacia de la fertilización foliar en el Capítulo 4. En éste trataremos los dos factores ambientales que afectan más directamente la performance de la pulverización foliar de nutrientes: la temperatura y la humedad relativa.

La humedad relativa es el principal factor que influye en la absorción foliar de pulverizaciones de nutrientes, dado que afecta la permeabilidad de la superficie de la planta y las respuestas fisicoquímicas a los compuestos aplicados. A una alta humedad relativa la permeabilidad pueda aumentar debido a la hidratación cuticular y a la demora en el secado de las sales depositadas en la superficie de la planta siguiente a la aplicación de la pulverización. Sales con puntos de deliquesencia por debajo de la humedad relativa prevaleciente en la filósfera⁹ teóricamente permanecerán como solutos, prolongándose la penetración a través de la hoja.

La temperatura afectará varios parámetros fisicoquímicos de la formulación de pulverización foliar, tales como la tensión superficial, la solubilidad, viscosidad o punto de deliquesencia. En general bajo cualquier condición de campo, al aumentar el rango de temperatura (i.e. desde 0 a 40°C) aumentará la solubilidad de los ingredientes activos y coadyuvantes, pero decrecerá la viscosidad, la tensión superficial y el punto de deliquesencia. Además las altas temperaturas acelerarán la tasa de evaporación y secado de la solución depositada en el follaje reduciendo el tiempo necesario para que se seque la solución y se detenga la penetración por las hojas.

Otros factores ambientales, tales como la intensidad de la luz o las precipitaciones, puedan afectar también la performance de las pulverizaciones foliares de nutrientes. Por ejemplo, se sabe que varios quelatos de Fe(III) se degradan por la exposición a la luz solar. Por otra parte, la ocurrencia de lluvias inmediatamente después de una pulverización foliar lavará rápidamente el tratamiento recién aplicado.

Como consecuencia, antes de una aplicación foliar deberían consultarse los pronósticos meteorológicos evitando condiciones que puedan reducir la humedad o aumentar la velocidad de secado, tales como fuertes vientos, lluvias intensas o temperaturas extremas al momento de la aplicación foliar.

3.3. Formulaciones y coadyuvantes

Las formulaciones comerciales de nutrientes foliares están compuestos en general de al menos dos componentes principales, a saber: el ingrediente(es) activo, y el material(es) inerte(s) o coadyuvante(s).

⁹La parte aérea de las plantas que sirve como hábitat para los microorganismos.

Los coadyuvantes ayudan a mejorar la cobertura (mojado) y la persistencia (pegajosidad) del ingrediente(s) activo, o de los elemento(s) mineral(es) en la superficie de las hojas, así también como promover mayor velocidad de absorción y bioactividad de los elemento(s) minerales aplicados. Las limitaciones a la absorción foliar de los elementos minerales aplicados ha conducido a un amplio uso y búsqueda continua de coadyuvantes que mejoren la performance de los tratamientos de pulverización foliar. En los párrafos siguientes se brindará información de ingredientes activos y coadyuvantes.

3.3.1. Compuestos minerales aplicados con pulverizaciones foliares

Debería realizarse una distinción preliminar concerniente a la aplicación de macro o micro-nutrientes, siendo los últimos suministrados a dosis y concentraciones menores y a menudo siendo inestables cuando se aplican como sales inorgánicas. Un listado de las fuentes de elementos minerales más comunes según artículos recientes se muestra en las Tablas 3.1 y 3.2. La industria de fertilizantes foliares se caracteriza por un gran número de productos propios, que frecuentemente derivan de sales comunes que pueden ocasionalmente mezclarse en relaciones novedosas y/o con la adición de compuestos que sirven para ‘acomplejar, quelatar, o unir’, y/o coadyuvantes que pueden ‘mejorar’ la eficiencia de absorción.

Tabla 3.1. Fuentes de macro-nutrientes normalmente usados en la formulación de pulverizaciones foliares.

Macronutriente	Compuestos frecuentes	Referencias
N	urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio	Zhang <i>et al.</i> (2009); Fageria <i>et al.</i> (2009)
P	H ₃ PO ₄ , KH ₂ PO ₄ , NH ₄ H ₂ PO ₄ , Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , fosfitos	Noack <i>et al.</i> (2011); Schreiner (2010); Hossain y Ryu (2009)
K	K ₂ SO ₄ , KCl, KNO ₃ , K ₂ CO ₃ , KH ₂ PO ₄	Lester <i>et al.</i> (2010), Restrepo-Díaz <i>et al.</i> (2008)
Mg	MgSO ₄ , MgCl ₂ , Mg(NO ₃) ₂	Dordas (2009a), Allen (1960)
S	MgSO ₄	Orlovius (2001), Borowski y Michalek, (2010)
Ca	CaCl ₂ , propionato de CA, acetato de Ca	Val y Fernández (2011); Wojcik <i>et al.</i> (2010); Kraemer <i>et al.</i> (2009a,b).

Hasta los 1970’s, el mercado de fertilizantes micronutrientes foliares estaba dominado por productos basados en compuestos inorgánicos, en particular sulfatos (Moran, 2004). Durante los 1980’s, se ofreció una amplia variedad de ‘quelatos’ y ‘complejos’ micronutrientes (i.e. quelatos sintéticos usando EDTA, glucoheptonatos, polioles, aminoácidos, o lignosulfonatos, entre muchos otros tipos) como una alternativa a la aplicación de compuestos inorgánicos.

Tabla 3.2. Fuentes de micro-nutrientes normalmente usados en la formulación de pulverizaciones foliares.

Micronutriente	Compuestos frecuentes	Referencias
B	ácido bórico ($B(OH)_3$), bórax ($Na_2B_4O_7$), octoborato de Na ($Na_2B_8O_{13}$), polioles de B	Will <i>et al.</i> (2011); Sarkar <i>et al.</i> (2007), Nyomora <i>et al.</i> (1999)
Fe	$FeSO_4$, quelatos de Fe(III), complejos de Fe- (lignosulfonatos, glucoheptonatos, etc.)	Rodríguez-Lucena <i>et al.</i> (2010a, 2000b); Fernández <i>et al.</i> (2008b); Fernández y Ebert (2005); Moran (2004)
Mn	$MnSO_4$, quelatos de Mn(II)	Moosavi y Ronaghi (2010), Dordas (2009a), Papadakis <i>et al.</i> (2007), Moran (2004)
Zn	$ZnSO_4$, quelatos de Zn(II), ZnO, 'complejos' orgánicos de Zn	Amiri <i>et al.</i> (2008); Haslett <i>et al.</i> (2001), Moran (2004); Zhang y Brown (1999).

Las dosis recomendadas de uso de los fertilizantes foliares son altamente variables y corrientemente se basan en los cultivos específicos a tratar. Como se describió previamente, las propiedades fisicoquímicas de los ingredientes activos, i.e. tamaño de molécula, solubilidad o punto de delicuescencia, influirán en la tasa de absorción por el follaje. En general, los quelatos sintéticos son mucho más grandes y tienen puntos de delicuescencia más altos que las sales minerales inorgánicas, más comúnmente usadas como fuentes de ingredientes activos. Si bien algunos materiales se recomiendan en base a ensayos realizados en ambientes rigurosamente controlados y numerosas evaluaciones de campos, muy frecuentemente se utilizan dosis diseñadas apenas para garantizar la seguridad de uso y satisfacer inquietudes relativas al coste.

No se dispone en la actualidad de las dosis óptimas de concentración para los muchos y variados tipos de fertilizantes foliares disponibles para los diferentes cultivos, y los futuros esfuerzos de investigación deben centrarse en ensayos diseñados para establecer umbrales claros de concentración de las soluciones de nutrientes foliares.

Las soluciones de nutrientes de aplicación foliar podrían ser fitotóxicas debido a su alto potencial osmótico y pH, afectando importantes procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis y/o apertura de los estomas (Bai *et al.*, 2008; Elattal *et al.*, 1984; Fageria *et al.*, 2009; Kluge, 1990; Swietlik *et al.*, 1984; Weinbaum, 1988). Estos efectos pueden ser un factor crítico al considerarse la pulverización de fertilizantes macro-nutrientes sobre el follaje.

3.3.2. Aditivos para la formulación: co-adyuvantes

Información general

Como se describió en el Capítulo 2, la topografía de la superficie de la planta puede variar entre las especies y variedades de plantas, órganos y condiciones de crecimiento. La presencia, la química y la topografía de las ceras epicuticulares y estructuras

epidérmicas tales como tricomas, pueden hacer difícil mojar las superficies de la planta. Bajo tales circunstancias, la tasa de mojado adecuada, la retención y la penetración de los fertilizantes foliares puede requerir la adición de coadyuvantes, tales como agentes surfactantes que modifiquen las propiedades de la solución de pulverización.

Numerosos estudios de absorción foliar y cuticular han demostrado la mejora de la eficacia de las formulaciones que contienen adyuvantes, los que actúan mediante la mejora de las propiedades de mojado, desparramado, retención, penetración y humectación de las pulverizaciones foliares, en comparación con soluciones de elementos minerales puros aplicados sin éstos adyuvantes. Por lo tanto, la formulación de soluciones de elementos minerales con adyuvantes puede tener un efecto significativo sobre la absorción y la bioactividad de los nutrientes suministrados al follaje, aunque éstos también pueden disminuir o aumentar el riesgo de fitotoxicidad asociado con los ingredientes activos de los nutrientes aplicados. Esto implica un ajuste fino de los ingredientes activos (nutrientes) y de los compuestos adyuvantes y su concentración relativa, necesarios para desarrollar una formulación para aplicación foliar que ofrezca respuestas reproducibles de absorción por las plantas y sin causar daños a éstas.

Un adyuvante puede definirse como una sustancia química incluida en una formulación, o que se añade al tanque de pulverización, y que modifica la actividad del ingrediente activo (los nutrientes en caso de los fertilizantes foliares) o las características de la solución de pulverización (Hazen, 2000). Por lo general, se clasifican como; (i) adyuvantes activadores (por ejemplo, agentes tensioactivos) que aumentan la actividad, la penetración, difusión y retención del ingrediente activo, o (ii), adyuvantes utilitarios (por ejemplo, acidificantes) que modifican las propiedades de la solución sin afectar directamente la eficacia de la formulación (Penner, 2000).

Aunque hay muchos adyuvantes o coadyuvantes comerciales en el mercado (Tabla 3.3), existe una considerable confusión con respecto a la clasificación de estos compuestos y su supuesto modo de acción (Green y Foy, 2000).

Los nombres de los adyuvantes suelen relacionarse con las propiedades principales que le confieren a las formulaciones de pulverización a la que se añaden. Sin embargo, la categorización y distinción entre activador y adyuvantes utilitarios es muy subjetiva, y en la actualidad carece de estandarización. Por ejemplo, los adyuvantes descritos como ‘penetradores’, ‘sinergizadores’ o ‘activadores’ puede aumentar la tasa de absorción foliar a través de diferentes mecanismos químicos o físicos aunque el principio general para mejorar la absorción de la pulverización es el mismo.

Los adyuvantes descritos como “agentes tampón” o “neutralizadores” son generalmente sistemas químicos que ajustan y estabilizan el pH de la solución pulverizadora; mientras que otros tensioactivos pueden denominarse como “detergentes”, “agentes mojantes”, o “esparcidores”; pero nuevamente, para ambos tipos, los principios generales son los mismos. Hay varios tipos de adyuvantes generalmente referenciados como “adherentes” que aumentan la retención de la solución y resistencia al lavado por la lluvia, y algunos de ellos también pueden prolongar o retardar el proceso de secado de la solución cuando se los incluye en las pulverizaciones foliares.

Los humectantes son compuestos con propiedades de retención de agua que puede ser orgánicos, tal como la carboxi-metil celulosa (Val y Fernández, 2011), o inorgánicos, tal

Tabla 3.3. Ejemplos de adyuvantes disponibles en el mercado clasificado de acuerdo a su supuesto modo de acción.

Nombre adyuvante en la etiqueta	Modo de acción propuesto
Surfactante o Tensioactivo	Disminuye la tensión superficial
Detergente	Equivalente a "tensioactivo" (o "surfactante")
Desparramante	Equivalente a "tensioactivo" (o "surfactante")
Adherente	Promotor de la retención de la solución; resistencia a la lluvia
Auxiliar de retención	Promotor de la retención de la solución; resistencia a la lluvia
Agente tampón o Regulador de pH	Regulación del pH
Neutralizante	Regulación del pH
Acidulante	Disminución del pH
Penetrante	Promotor del aumento de la tasa de penetración foliar (por ejemplo, solubilizante de componentes cuticulares)
Sinergizante	Promotor del aumento de la tasa de penetración foliar
Activador	Promotor del aumento de la tasa de penetración foliar
Agente de compatibilidad	Mejorador de la compatibilidad de la formulación
Humectante	Retardante del secado de la solución, mediante la disminución del punto de delicuescencia (POD) de la formulación sobre la hoja
Anti deriva	Mejorador de la localización del spray y deposición en el follaje
Anti rebote	Mejorador de la localización del spray y deposición en el follaje

como el CaCl_2 . Su presencia en la formulación reduce el punto de delicuescencia (POD) y prolonga el proceso de secado de la solución, que es especialmente importante para aumentar la eficacia de la aplicación foliar en las regiones de cultivo áridas y semiáridas. Algunos tipos de agentes "tensioactivos" o adyuvantes "utilitarios" tales como adherentes o humectantes también pueden actuar aumentando la tasa de retención y la resistencia a la lluvia de las formulaciones de aplicación foliar (Blanco *et al.*, 2010; Kraemer *et al.*, 2009b; Schmitz-Eiberger *et al.*, 2002) lo que puede ser particularmente importante en regiones de alta precipitación o cuando se emplea frecuentemente riego por aspersión. Los típicos ejemplos de adherentes y humectantes son el látex y la lecitina de soja, ambos pueden mejorar significativamente la retención de las pulverizaciones foliares en las hojas y con frecuencia se incluyen en las formulaciones comerciales de muchos productos fitosanitarios. No obstante aparentemente falta información adecuada sobre la eficacia de estos adyuvantes cuando se utilizan con fertilizantes foliares.

La razón subyacente a este tema es que se han hecho considerables esfuerzos de investigación en las últimas décadas para desarrollar adyuvantes para formulaciones de pulverización foliar que optimicen el rendimiento de pesticidas y herbicidas, mientras que se ha prestado menos atención al desarrollo de productos específicos para pulverizaciones de nutrientes foliares. Los adyuvantes se comercializan normalmente

por separado y pueden contener compuestos individuales (por ejemplo, solo agentes tensioactivos) o se venden como mezclas de tensioactivos, lecitina, látex sintético, aceites vegetales, aminas de sebo o ésteres de ácidos grasos que confieren un espectro de las propiedades deseadas esbozadas anteriormente cuando se incluyen en una solución de aplicación foliar.

Como consecuencia de ello, dado que la mayoría de los productos coadyuvantes comerciales se han ideado para aplicarse combinándolos con productos fitosanitarios para facilitar su rendimiento cuando se aplican al follaje, su idoneidad para la combinación con pulverizaciones de nutrientes foliares, que normalmente son solutos hidrofílicos, no pueden ser asumida a priori, debiendo por lo tanto siempre ser evaluada empíricamente. Para pulverizaciones foliares de nutrientes es fundamental que los tratamientos no sean fitotóxicos para las hojas u otros órganos de la plantas dado que su valor y comerciabilidad puede verse comprometida por daños a los cultivos causados por tales tratamientos. Lamentablemente no es posible por ahora predecir teóricamente la performance de ningún ingrediente activo, sea un herbicida, un pesticida o un elemento nutriente mineral en combinación con un adyuvante en particular (Fernández *et al.*, 2008a; Liu, 2004).

Surfactantes

Los agentes tensioactivos o surfactantes son el tipo más ampliamente utilizado de adyuvante en formulaciones de pulverización foliar. Uno de los primeros ejemplos de estos compuestos añadidos a las pulverizaciones foliares de nutrientes fue en la primera mitad del siglo 20 con el uso del tensioactivo iónico Vatsol en combinación con compuestos de Fe (Guest y Chapman, 1949).

Para evaluar el efecto de un agente tensioactivo la Figura 3.1 muestra algunos de los métodos usados para ese propósito: La medida del ángulo de contacto con un portaobjetos de microscopio parafinado, y la forma de la gota por el método de la gota colgante comparan la tensión superficial del agua pura (A y B) con una solución surfactante órgano-siliconado al 0.1% (C y D).

Estas mediciones se llevaron a cabo a 25°C y los ángulos de contacto (Figura 3.1 A y C) para el agua y la solución del tensioactivo órgano siliconado al 0.1% fueron de aproximadamente 95° y 45°, dando tensiones superficiales calculadas de aproximadamente 72 y 22 mN respectivamente.

Este sistema experimental demuestra cómo el agregado de un tensioactivo a una solución de agua pura disminuye su tensión superficial y aumenta dramáticamente el área de contacto entre el líquido y el sólido (en este caso una superficie parafinada) mediante la reducción del ángulo de contacto.

Los surfactantes son moléculas grandes que constan de una porción no polar, hidrófoba, unida a un grupo polar, hidrófilico (Cross, 1998; Tadros, 1995). Es importante que los extremos de las partes hidrófobas e hidrófilas de la molécula del tensioactivo están lejos una de la otra para que puedan reaccionar independientemente unas de otras, con superficies y moléculas del solvente (Cross, 1998). La parte hidrófoba del tensioactivo interactúa débilmente con las moléculas de agua mientras que el grupo

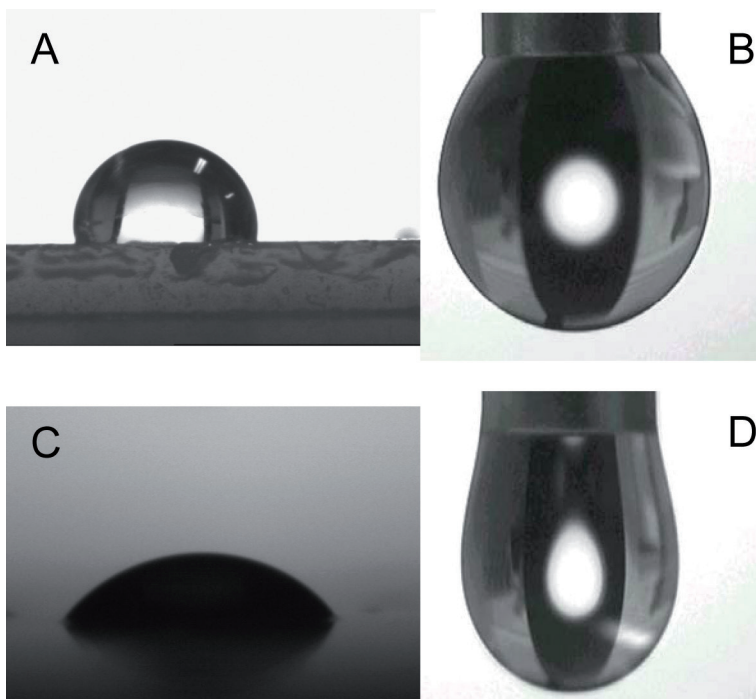


Figura 3.1. Ángulos de contacto (A y C), y gotas colgantes (B y D) usados para calcular la tensión superficial del agua destilada (A y B) y de una solución de surfactante órgano-siliconado al 0.1% (C y D) (V. Fernández, 2011).

de la cabeza polar o iónica, interactúa fuertemente con éstos para volver a la molécula del tensioactivo soluble en agua.

Los agentes tensioactivos se caracterizan por el cambio brusco que ocurre en sus propiedades físicas una vez que se ha alcanzado una cierta concentración. Estos cambios en la solubilidad, tensión superficial, conductividad equivalente o presión osmótica se deben a la asociación de iones o moléculas de tensioactivo en la solución para formar unidades más grandes. Estas unidades asociadas se llaman micelas y la concentración a la que esta asociación se lleva a cabo se la conoce como concentración micelar crítica. Cada molécula de un tensioactivo particular tiene un valor de concentración micelar crítica, característico para una temperatura y una concentración dada.

Los mecanismos de acción de los tensioactivos cuando se aplican al follaje son muy complejos y sólo se han comprendido parcialmente (Wang y Liu, 2007), aunque Stock y Holloway (1993) han sugerido posibles modos de la acción surfactante, e incluyen: el aumento del área de contacto efectiva de las deposiciones; disolución o disrupción de las ceras epicuticulares; solubilización de agroquímicos en las deposiciones; prevención o retraso de la formación de cristales en los depósitos; retención de la humedad de los depósitos; y la promoción de la infiltración por los estomas. Sin embargo, ahora se sabe

que los tensioactivos también pueden alterar la difusión de sustancias a través de la solubilización cuticular o la hidratación, y que también pueden afectar la permeabilidad de la membrana plasmática. Por lo tanto la composición y concentración de surfactante son factores clave que influyen en el rendimiento de las aplicaciones foliares (Stock y Holloway, 1993).

La parte hidrófila de un agente tensioactivo puede ser iónico, no iónico, o de ion híbrido, acompañado por iones contraparte en los dos últimos casos. Cuando un agente tensioactivo está presente en una pulverización foliar, la formulación de la polaridad de la parte hidrófila puede determinar interacciones entre el tensioactivo y los ingredientes activos, o las propiedades de contacto entre la solución de pulverización y cada superficie de la planta en particular. Aparte de reducir la tensión superficial y mejorar la mojabilidad y la difusión, la adición de agentes tensioactivos facilita la adhesión de las gotas de fertilizante, factor crucial al tratar superficies repelentes al agua como Fernández *et al.* (2014b) muestran para la aplicación foliar de un fertilizante de P suministrado a hojas de trigo.

Surfactantes no iónicos

Los tensioactivos no iónicos son ampliamente utilizados en aplicaciones foliares, ya que son teóricamente menos propensos a interactuar con otros componentes polares de la formulación. El grupo hidrófilo polar más común en tensioactivos no iónicos se basa en el óxido de etileno (Tadros, 1995) con los siguientes compuestos perteneciente a este grupo de tensioactivos: organosiliconas, etoxilatos de alquilo, alquil-poliglucósidos, etoxilatos de alcoholes grasos, ácidos grasos polietoxilados, aminas grasas etoxiladas, alcanolamidas o ésteres de sorbitán. Un ejemplo de una molécula de tensioactivo no iónico se muestra en la Figura 3.2.

Según Stock y Holloway (1993) la adición de agentes tensioactivos no iónicos con bajo contenido de óxido de etileno, que son buenos esparcidores con baja tensión superficial, favorecerá la absorción de plaguicidas lipófilos; mientras que por el contrario, la absorción de pesticidas hidrofílicos es mejorada por tensioactivos con unidades de óxido de etileno más altas y por lo tanto, de pobres propiedades de cobertura por desparramado o extensión. Sin embargo, pruebas contradictorias sobre el efecto de tensioactivos que contienen alto o bajo contenido de óxido de etileno sugieren que los tensioactivos etoxilados pueden aumentar la absorción de ambos compuestos hidrófilos y lipófilos por diferentes mecanismos que aún no están totalmente aclarados (Haefs *et al.*, 2002; Kirkwood, 1993; Ramsey *et al.*, 2005). Por ejemplo, se encontró que los tensioactivos de bajo contenido de óxido de etileno aumentan la absorción de compuestos lipofílicos y alteran las propiedades físicas de las cutículas y son más fitotóxicos. Por el contrario, los tensioactivos con contenidos más elevados de óxido de etileno parecen aumentar la hidratación cuticular y ser menos fitotóxicos (Coret y Chamel, 1993; Ramsey, 2005; Uhlig y Wissemeier, 2000). Surfactantes con grandes grupos hidrófobos o largas cadenas hidrofílicas, o ambas, han sido reportados ser menos fitotóxicos debido a su menor solubilidad en agua y, por lo tanto, determinan velocidades más lentas de absorción foliar (Parr, 1982). Estudios realizados con compuestos que contienen Ca (CaCl_2 y Acetato de Ca) en combinación con tensioactivos etoxilados de

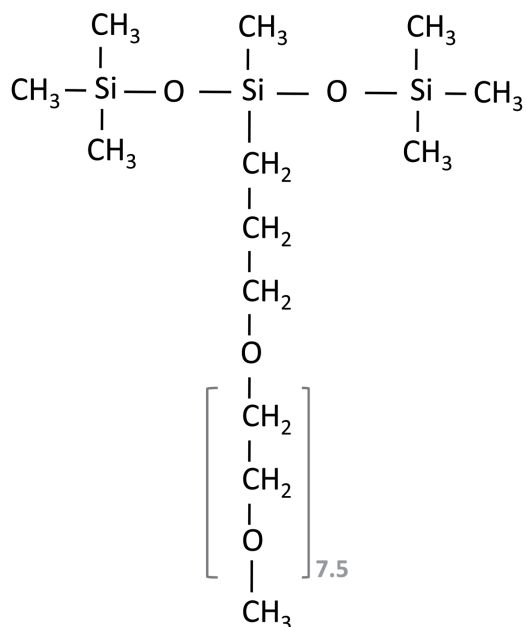


Figura 3.2. Estructura molecular del surfactante no iónico, Silwet® L-77.

aceite de colza con diferentes contenidos de óxido de etileno (Kraemer *et al.*, 2009a; Kraemer *et al.*, 2009b; Schmitz-Eiberger *et al.*, 2002) demostraron que puede afectarse la tasa de permeabilidad cuticular del Ca a través de la distribución del ingrediente activo en la gota, y la resistencia al lavado de las formulaciones por la lluvia.

Los tensioactivos no iónicos organo-siliconados, también conocidos como super desparramadores (super spreaders), son un grupo de sustancias químicas que contienen grupos alquil-siloxano como la fracción hidrófoba (Knoche, 1994). Debido a su baja tensión superficial (muy por debajo de 30 mN m^{-1} , y en general entre 20 a 25 mN m^{-1}) tales tensioactivos son conocidos como promotores de infiltración de los estomas (Knoche, 1994; Schönherr *et al.*, 2005; Stevens, 1993) y por aumentar la mojabilidad y la cobertura de la hoja, lo que reduce la retención de la solución por el follaje debido a la formación de una delgada película líquida y aumenta el escurrimiento de la solución de pulverización. El efecto de aplicaciones foliares de nutrientes que contienen tensioactivos organo-siliconados se ha evaluado en varios estudios de absorción foliar (Fernández *et al.*, 2008a; Horesh y Levy, 1981; Neumann y Prinz, 1975; Neumann y Prinz, 1974), observándose a menudo un alto riesgo de fitotoxicidad debido al aumento de la tasa de penetración, sugiriéndose que tales compuestos se deben utilizar con precaución (es decir, a concentraciones más bajas y/o mediante la reducción de la dosis de ingrediente activo) para evitar quemaduras en las hojas y la potencial defoliación.

A pesar de ser no iónicos, varias investigaciones mostraron que este tipo de tensioactivos (por ejemplo, conteniendo organo-siliconados, etoxilatos de alcoholes o etoxilatos de triglicéridos) pueden interactuar con los iones de los elementos minerales presentes en las soluciones de nutrientes foliares y alterar su rendimiento mediante disolución o cristalización y precipitación de las moléculas surfactantes, resultando en la formación de polímeros (Fernández y Eichert, 2009; Knoche, 1994; Uhlig y Wissemeier, 2000). La interacción de los compuestos de nutrientes minerales con tensioactivos puede conducir a la pérdida de la tensión superficial como se ha observado para el tensioactivo organo-siliconado Silwet® L-77 en presencia de citrato férrico (Knoche *et al.*, 1991; Neumann y Prinz, 1975). Por otro lado, la interacción entre los cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} (en forma de CaCl_2 y MgSO_4) y las moléculas del tensioactivo redujeron la fitotoxicidad de 0.1% Triton® X-100 y Genapol® C-80, cuando se aplicaron a las hojas y brácteas de *Euphorbia pulcherrima* (Uhlig y Wissemeier, 2000).

Surfactantes iónicos

Los agentes tensioactivos iónicos son ampliamente utilizados en formulaciones ideadas con propósitos de limpieza tales como detergentes, champús o polvos de lavado, pero son de limitada importancia en agricultura ya que la mayoría de los nutrientes se administran como compuestos ionizados (por ejemplo, sales nutrientes) que pueden interactuar y enlazar con el moléculas surfactantes iónicos y de ese modo alterar su desempeño tensioactivo.

La porción hidrofílica de un tensioactivo iónico puede ser aniónica o catiónica. Los tensioactivos aniónicos pueden poseer uno o más grupos funcionales que se ionizan en solución generando los iones orgánicos cargados negativamente responsables de la reducción de la tensión superficial. Este grupo de tensioactivos es probablemente el más ampliamente utilizado e incluye varios grupos de compuestos químicos, tales como alquil-sulfatos, alquil-fosfatos y sulfatos de alquil-poliéter y también sulfonatos de parafina, olefina y alquilbenceno y ésteres de sulfato. Los grupos éster sulfato (COS) adjuntos a la fracción hidrófila del tensioactivo se hidrolizan fácilmente en el correspondiente alcohol y el ion sulfato por ácidos diluidos mientras que la fuerte unión CS de los grupos sulfonato es mucho más estable y sólo se romperá bajo condiciones químicas extremas (Cruz, 1998).

Los tensioactivos catiónicos tienen uno o más grupos funcionales que se ionizan en solución para generar iones orgánicos cargados positivamente siendo por lo tanto incompatibles con tensioactivos aniónicos. Los tensioactivos catiónicos más representativos se basan en amonio cuaternario, alquil-etoxilato de amonio o alquil compuestos de piridinio que tienen propiedades anti-microbianas (Badawi *et al.*, 2007).

Tensioactivos de ambivalentes o anfóteros

Este tipo de agentes tensioactivos contiene en la fracción activa tanto grupos aniónicos como catiónicos y puede ser aniónicos, catiónicos o no iónicos, dependiendo del pH de la solución. Estos agentes tensioactivos son más leves en comparación con otros y se utilizan a menudo en cosméticos y productos químicos domésticos “blandos” en combinación con otros aditivos. Como ejemplo de tensioactivos anfóteros de uso

común se mencionan las alquil-betaínas y lecitina, además de una serie de mezclas de adyuvantes comercialmente disponibles que utilizan lecitina de soja como principal ingrediente.

- Los compuestos de elementos minerales pueden aplicarse solos o en combinación con una variedad de adyuvantes que pueden mejorar las propiedades de contacto, velocidad de absorción y distribución en la superficie del ingrediente activo(s) cuando se aplican al follaje.
- Los agentes tensioactivos son un grupo importante y ampliamente utilizado de adyuvantes que reducen la tensión superficial de soluciones de nutrientes, y mejoran las propiedades de contacto de las disoluciones tales como la retención o el área de contacto de las gotas de fertilizante con las superficies vegetales.
- Algunos coadyuvantes tales como los agentes tensioactivos, agentes sinergizadores, adherentes y humectantes pueden aumentar la tasa de absorción, retención y retardar la velocidad de secado de las pulverizaciones foliares de nutrientes.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se ha analizado el estado actual de conocimiento sobre las propiedades físico-químicas de las formulaciones de pulverización de nutrientes foliares, y de los factores que pueden afectar a dichas propiedades. Dado que las superficies de las plantas son hidrófobas y rugosas en mayor o menor grado dependiendo de la especie de planta, órgano y las condiciones de crecimiento, las soluciones de agua pura (sin formular) puede que se absorban de forma limitada por el follaje. Por lo tanto, es importante formular pulverizaciones foliares a partir de fuentes apropiadas de nutrientes y adyuvantes que tengan en cuenta estas propiedades físico-químicas y limitaciones, de modo que la eficacia general de los fertilizantes foliares pueda optimizarse.

Con esta base actual de conocimientos, se pueden abordar las siguientes certezas, incertidumbres y oportunidades para la aplicación de fertilizantes foliares.

Certezas

- Existe abundante evidencia empírica y científica que demuestra que en diversos grados, las hojas de las plantas pueden absorber agua pura y formulaciones de soluciones de nutrientes.
- El carácter hidrófobo y la rugosidad de la superficie de las plantas puede disminuir la tasa de absorción de soluciones de nutrientes con agua pura en comparación con formulaciones que contienen aditivos que reducen la tensión superficial, aumentan la retención y mejoran la tasa de mojado.
- Si bien pueden suministrarse soluciones de nutrientes de alta concentración sin coadyuvantes, su eficacia será menor comparada con tratamientos de pulverización foliar formulados con adyuvantes, pudiendo a su vez, ser también más fitotóxicos para las hojas.

- Los factores ambientales tales como la humedad relativa y/o la temperatura ambiente influyen sobre las propiedades físicas y el rendimiento de una formulación fertilizante foliar, y éstas deben ser tenidos en cuenta antes de aplicar tratamientos de pulverización en condiciones de campo.

Incertidumbres

- Los parámetros físico-químicos que regulan la absorción foliar son poco conocidos.
- Las interacciones que se producen entre nutrientes y adyuvantes no son completamente entendidas.
- Si bien la performance de una fuente de nutriente en particular puede mejorarse mediante la adición de tensioactivos y/u otros aditivos, actualmente no es posible determinar con precisión qué adyuvante o qué aditivo será más eficaz, ni determinar las dosis óptimas a agregar, sin realizar pruebas empíricas.

Oportunidades

- Una mayor comprensión de los mecanismos de penetración de los nutrientes a través de las superficies vegetales permitirá el desarrollo de formulaciones de fertilizantes foliares con mejor eficacia y seguridad.
- La mejor comprensión de las propiedades de los aditivos de las formulaciones foliares, sus interacciones con los nutrientes y sus efectos sobre la estructura y la química de la hoja también ayudará a mejorar la eficacia y reproducibilidad de la performances de las aplicaciones foliares.
- El agregado de humectantes a las formulaciones de fertilizantes foliares ayuda a prolongar el proceso de secado de la solución pudiéndose mejorar la eficacia de los tratamientos de pulverización en especial en regiones áridas y semiáridas.

4. Factores ambientales, fisiológicos y biológicos que afectan la respuesta de las plantas a la fertilización foliar

4.1. Introducción

La respuesta de las plantas a la aplicación foliar de nutrientes varía no sólo entre especies y cultivares, sino que también depende de la fenología de la planta, del estado fisiológico y del medio ambiente adonde crece la planta. La comprensión de estas respuestas es clave para optimizar la eficacia y reproducibilidad de los tratamientos de fertilizantes foliares (Kannan, 2010; Marschner, 2012; Weinbaum, 1988).

Las características físicas y fisiológicas de una planta pueden alterar la eficacia de la fertilización foliar de dos maneras; debido a diferencias en la estructura de la canopia y a causa de las características de las superficies de la parte aérea de la planta. La primera tienen un impacto cuantitativo en la cantidad de nutriente aplicado que atraviesa las barreras de la superficie; mientras que las diferencias en los procesos fisiológicos (absorción, almacenamiento y re translocación) alteran tanto la eficacia biológica inmediata como la de largo plazo de los nutrientes una vez que han entrado en la planta.

Las condiciones ambientales en el momento de aplicar los tratamientos también influyen en la eficacia de los fertilizantes foliares a través de efectos directos sobre las propiedades físico-químicas de la disolución de fertilizante aplicado sobre las superficies vegetales (Capítulo 3), y al afectar los procesos biológicos en la planta tanto los inmediatos como los de largo plazo. Las condiciones inmediatas de luz, temperatura y humedad al momento de la aplicación foliar afectan el estado metabólico de la planta y por lo tanto pueden influir directamente en los procesos de absorción a través de la superficie de la hoja y una vez dentro de sus espacios internos. Las condiciones ambientales después de la aplicación pueden determinar la persistencia de los tratamientos sobre la superficie de las hojas y afectar la redistribución de nutrientes dentro de la planta luego de absorberse. Durante un período de tiempo más largo, el entorno en el que una planta crece puede alterar la eficacia de los fertilizantes foliares a través de su efecto sobre las características de la superficie de la hoja, el tamaño y la composición de la canopia, y su efecto sobre el estado nutricional de la planta, su morfología y su fisiología. Estas interacciones se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. La estructura física y la fisiología de la hoja y la canopia de la planta interactúan con el medio ambiente local afectando la retención, la absorción y la utilización de fertilizantes de aplicación foliar.

Edad de las hojas, superficies foliares, ontogenia de las hojas, homogeneidad de las hojas y desarrollo de la canopia	La estructura física de la hoja (rugosidad) afecta la mojabilidad y retención de las gotas de fertilizante	pelos, tricomas, arquitectura de la superficie distribución y densidad de estomas presencia de discontinuidades (lenticelas, rajaduras ...)
	La composición química de la hoja afecta la penetración, distribución, absorción y 'disponibilidad' de nutrientes aplicados vía foliar	espesor de la cutícula, composición de la cutícula unión apoplástica y complejación
	El estado fisiológico de la hoja al momento de la pulverización afecta la asimilación y movilización de nutrientes	expansión de la hoja y estado fuente:destino senescencia de la hoja y desmovilización
Arquitectura de la planta y estado metabólico	La arquitectura de la canopia y la fenología tienen un efecto cuantitativo en la retención y la penetración de la pulverización	tamaño de la canopia y distribución de la edad de las hojas, nuevo crecimiento, presencia de brotes vegetativos o florales, presencia de estructuras reproductivas
	La actividad metabólica de la planta y fenología del cultivo afecta la absorción y las re movilizaciones	la actividad de crecimiento de brotes y raíces altera la demanda y la dinámica fuente: destino el estado metabólico de la planta afecta la disponibilidad del sustrato y la energía para la absorción y la asimilación
Interacciones ambientales de corto y largo plazo	Temperatura, luz, humedad	efecto inmediato en la energía y los metabolitos requeridos para la absorción, metabolismo y transporte de nutrientes efectos de largo plazo en las propiedades físicas y químicas de las hoja y de la planta
	El estado nutricional de la planta altera la estructura y fisiología de la hoja y puede alterar la asimilación por la hoja de los nutrientes aplicados por vía foliar	
	Estrés biótico y abiótico (plagas, temperatura, agua)	

La complejidad de las posibles interacciones entre el medio ambiente y la biología de la planta sobre la eficacia de las aplicaciones foliares complica en gran medida la realización e interpretación de la investigación de campo y por lo tanto su eficacia agronómica. Históricamente, han habido relativamente pocos estudios sobre aplicaciones foliares de nutrientes que hayan caracterizado directamente los determinantes ambientales de absorción integrados con la base fisiológica de las respuestas observadas de las plantas, y en consecuencia, esto ha limitado el desarrollo de guías de aplicación general, con base biológica para el uso de fertilizantes foliares en diversos cultivos.

El propósito de este capítulo es revisar la literatura existente sobre el papel del medio ambiente y la biología en la eficacia de la fertilización foliar y utilizar esta información para identificar los principios comunes y las lagunas de conocimiento.

4.2. Edad, superficie, ontogenia, homogeneidad de la hoja y desarrollo de la canopia

Existe considerable evidencia a partir de estudios de campo y de laboratorio que demuestra la hoja y la edad de la planta pueden tener un impacto significativo sobre la eficacia de la aplicación foliar de nutrientes. Estos efectos pueden reflejar diferencias en la ultra estructura, propiedades químicas y físicas y el estado metabólico de la hoja como se describió anteriormente, pero también pueden ser el resultado de diferencias en el estado fisiológico de la planta que actúa para alterar la disponibilidad de energía y de sustrato para la absorción y asimilación así como la velocidad a la que los nutrientes absorbidos son translocados fuera de la hoja (Weinbaum, 1988). Cuando se interpretan los estudios de campo que muestran el efecto de la edad de la hoja sobre la eficacia de la fertilización foliar, es fundamental tener en cuenta la posible confusión provocada por los efectos ambientales (por ejemplo, temperatura, luz y humedad) los que por lo general varían en coincidencia con el desarrollo de la planta y de la canopia, y en consecuencia actúan reduciendo el área de la superficie disponible para la retención del caldo de pulverización.

Un cierto número de estudios han demostrado que las tasas de absorción de sustancias químicas aplicadas sobre las hojas disminuyen con la edad de la hoja desde la iniciación hasta la plena expansión (Sargent y Blackman, 1962; Zhang y Brown, 1999b). Esto también puede continuar con un período de aumento de la permeabilidad a medida que las hojas maduras comienzan su senescencia. Por ejemplo, la absorción de ^{15}N de urea marcada y de KNO_3 por unidad de área foliar de *Citrus paradisi* L. cv. Redblush fue de 1.6 a 6 veces mayor para hojas de dos meses que hojas de seis meses de edad. En estudios utilizando cutículas aisladas de pomelo Marsh (*Citrus paradisi* Macfad), el movimiento trans-cuticular de la urea disminuye a medida que aumenta la edad de la hoja desde tres hasta siete semanas, pero la permeabilidad aumento en las cutículas de hojas de más de nueve semanas (Orbovic *et al.*, 2001). En estos estudios, el grosor de la cutícula, el peso por área y el ángulo de contacto de las gotas de solución de urea aumentaron a medida que las hojas envejecían.

Aunque la mayoría de los investigadores se concentraron en el N en estos estudios, el efecto de la edad de la hoja en la absorción foliar se ha observado para otros elementos. Walker (1955) informó de una mayor absorción de P en hojas jóvenes de manzano que en las de más edad; hojas inmaduras de pistacho y de nogal absorbieron 55 y 25% más de Zn que hojas totalmente expandidas (Zhang y Brown, 1999b). Plantas de olivo pulverizadas con tres concentraciones de KCl (0.2 y 4%) mostraron una respuesta lineal positiva con el aumento de las aplicaciones de hoja de K y que la absorción foliar de K fue mayor en las hojas jóvenes que en las maduras de olivo y de ciruelo para pasas (Restrepo-Díaz *et al.*, 2009; Southwick *et al.*, 1996).

Muchos investigadores en diversos cultivos y ambientes han observado que la cantidad total y composición de las ceras varían con el desarrollo de la hoja, y plantean la hipótesis de que esta variación con la edad influye en la absorción foliar (Hull *et al.*, 1975; Leece, 1976; Rhee *et al.*, 1998; Riederer y Friedmann, 2006; Swietlik y Faust, 1984; Zhang y Brown, 1999b). Si bien puede haber una correlación entre la absorción de fertilizantes foliares y los cambios químicos y estructurales en cutícula durante el desarrollo de órganos, la relación existente no está clara y sólo se ha examinado en unos pocos estudios. La dificultad en la interpretación del papel de las características cuticulares sobre la absorción foliar se ilustra por el contraste en la absorción foliar en diversas especies cuyas hojas con frecuencia muestran grandes diferencias en la estructura de la cutícula, los porcentajes de cera y su composición, pero estas diferencias son malas predictoras de la capacidad de absorción foliar.

Para entender mejor como afecta la edad de la hoja la relación entre la composición de la cutícula y la absorción foliar, Riederer (1995) analizó los cambios en ceras específicas en *Fagus sylvatica*. En esta especie, la distribución de los componentes de cera alifáticas¹⁰, dentro del rango máximo de C_{28} y C_{52} (moléculas con 28 y 52 átomos de carbono, respectivamente), cambió luego de 20 días después de la expansión del brote al predominio de cera C_{28} cuando la hoja alcanzó su tamaño final (Riederer y Friedmann, 2006). Desafortunadamente, no se determinó la relevancia fisiológica de estos cambios. Durante la expansión de la hoja de *Prunus laurocerasus*, la longitud promedio de cadena de alcoholes y ácidos grasos de ceras epicuticulares aumentó de C_{24} hasta aproximadamente C_{32} (Bringe *et al.*, 2006; Jetter y Schaffer, 2001) lo que alteró la mojabilidad de las superficies (Capítulo 2). En manzanos, esto coincidió con la disminución de la altura de las crestas cuticulares o “arrugas” (alrededor de 0,8-1,0 μm de altura en las hojas más jóvenes), en especial por encima del lumen de las células epidérmicas (Bringe *et al.*, 2006). En hojas y frutos de cítricos, se observó el mismo cambio en la composición de las ceras durante la expansión de la hoja y coincidió con una correspondiente disminución en la concentración de cera por unidad de área foliar (Freeman *et al.*, 1979). Durante la ontogénesis de las hojas de durazno, la masa individual de ceras, así como la composición de los componentes principales (triterpenos y alcanos), y el largo promedio de la cadena de alcoholes aumentaron,

¹⁰Compuestos orgánicos con estructura de cadena lineal, por ejemplo, n-alcanos.

mientras que las cantidades absolutas de alcoholes se mantuvieron prácticamente constantes o aumentado ligeramente (Bukovac *et al.*, 1979).

Se analizó la composición química, morfología y micro-hidrofobicidad de ceras cuticulares de la superficie adaxial de hojas de manzano en condiciones de crecimiento controlado, así como la de hojas desplegadas (Bringe *et al.*, 2006). La hidrofobicidad de la superficie de la hoja adaxial disminuyó significativamente con el aumento de la edad de la hoja. Los ángulos de contacto con la superficie de la hoja de soluciones también disminuyeron con la edad, lo que facilita la absorción de solutos. La cantidad de cera cuticular por unidad de área fue menor en las hojas de mayor edad que en las hojas más jóvenes. Un efecto similar se detectó en la fracción éster: la relación $C_{40}:C_{52}$ era aproximadamente 1:1.1 para las hojas más jóvenes, y cambió a 1:5 para las de más edad. Estos cambios disminuyeron la hidrofobicidad de la superficie adaxial de las hojas y se asociaron con una disminución en la cantidad total de ceras superficiales extraíbles así como las modificaciones en la composición de los compuestos cerosos. La acumulación de grupos funcionales OH- también parece jugar un importante papel en el aumento de la mojabilidad con la edad de la hoja. Este efecto puede explicarse por el aumento de la polaridad de las superficies más maduras debido a la acumulación de grupos hidroxilo (Fernández *et al.*, 2011). De acuerdo con Bringe *et al.* (2006), Hellmann y Stösser (1992) no observaron ningún efecto consistente de la edad de la hoja o de variedad de la masa total de ceras en manzano (*Malus domestica* Borkh), mientras que la proporción de alcanos y ésteres disminuyó durante la ontogénesis de la hoja y el aumento de alcoholes primarios.

Los resultados contradictorios del efecto de la edad de la hoja sobre la absorción foliar reportados por diferentes investigadores son sin duda consecuencia de las diferentes especies y del efecto ambiental en el que se llevaron a cabo los experimentos. Las diferencias entre las respuestas a campo y las investigaciones de laboratorio son sorprendentes. Bringe *et al.*, (2006) observaron que, en todas las etapas de desarrollo de las hojas de manzano cultivadas en el laboratorio, la masa de cera de la cutícula adaxial de las hojas se mantuvo baja (10-15 mg cm⁻²), en comparación con alrededor de 280 mg cm⁻² (masa total de cera) y 76 mg cm⁻² (ceras epicuticulares) para hojas de manzano cultivadas a campo (Hellmann y Stösser, 1992). Las conclusiones derivadas de investigaciones centradas en una superficie foliar o especies también deben considerarse con cautela; en *P. laurocerasus* el total de ceras cuticulares en la cara adaxial (280 g cm⁻²) eran mucho menores que en la cara abaxial (830 g cm⁻²) superficie de la hoja (Jetter y Schaffer, 2001), y significativamente mayor que para las cantidades detectadas en hojas cultivadas a campo de *Malus domestica* (Hellmann y Stösser, 1992), las que son 30 veces mayores que las ceras cuticulares totales de *Malus domestica* cultivadas en laboratorio. Las diferencias en las ceras cuticulares entre estas plantas cultivadas a campo y en el laboratorio son el resultado de las diferencias integradas de muchos factores, incluyendo temperatura, humedad, luz UV, polvo, tensión mecánica, fenología de la hoja y otros factores bióticos y abióticos.

- La composición cuticular de la hoja cambia con su edad y varía según la especie y el medio ambiente.
- Los cambios en la cutícula que se producen durante el desarrollo de los órganos pueden tener un efecto sobre la eficacia de los fertilizantes de aplicación foliar.
- Actualmente no es posible predecir cómo los cambios que se producen en la cutícula durante el desarrollo de un órgano pueden afectar en la eficacia de los fertilizantes de aplicación foliar.
- Con estas incertidumbres, es esencial la evaluación experimental de los fertilizantes foliares para asegurar la eficacia y la seguridad.

Está bien documentado para superficies hipoestomáticas (con estomas solo en el envés) que la superficie abaxial de la hoja absorbe nutrientes minerales más rápidamente que la superficie adaxial. Según Hull (1970), la mayor absorción de nutrientes por la superficie abaxial de la hoja resulta de la presencia de una membrana cuticular más delgada y de un gran número de estomas. Fernández *et al.* (2008) observaron en cutículas adaxiales aisladas de hojas de pera que eran más gruesas y contrastaban con los correspondientes abaxiales, aunque actualmente no es clara la importancia de las características de la cutícula abaxial en la absorción de fertilizantes de aplicación foliar y requiere por lo tanto investigación adicional. La teoría de que las cutículas abaxiales son más delgadas y por lo tanto la absorción sería más rápida ha sido adecuadamente validada ya que la mayoría de los estudios se han realizado con las cutículas adaxial para evitar las complejidades asociadas con la presencia de estomas. Schlegel y Schönherr (2002) examinaron cuatro especies de plantas y observaron que, durante las primeras 24 horas, la absorción de Ca^{2+} por la superficie abaxial de la hoja era mucho más alta que la del lado adaxial. En contraste, Boynton *et al.* (1954) concluyeron que ambas superficies de las hojas difieren sólo en la tasa de absorción de nutrientes y no en su capacidad total de absorción. Esta conclusión se basó en la observación de que la absorción de la urea por la superficie abaxial de la hoja fue rápida dentro de las primeras 24 horas y luego disminuyó rápidamente. La superficie adaxial de la hoja absorbió urea de manera constante durante siete días y luego de este periodo el ritmo de absorción fue similar a la de la superficie abaxial de la hoja (Boynton, 1954). La superficie de la hoja influyó en la adsorción de Zn pero no en la absorción de Zn en pistacho y no tuvo ningún efecto sobre la adsorción o la absorción de Zn en nogal (Zhang y Brown, 1999a).

Además de los cambios en la composición de la cutícula de la hoja, el número de tricomas y la composición de los exudados también cambian con el desarrollo de la hoja (Valkama *et al.*, 2004). Tanto la densidad de tricomas glandulares como no glandulares disminuyó drásticamente con la expansión de la hoja, aunque el número de éstos por hoja se mantuvo constante o disminuyeron a medida que se expandieron (Schönherr y Schreiber, 2004). Estos resultados sugieren que el número final de tricomas en una hoja madura se establece temprano en el desarrollo. Por lo tanto es probable que el papel funcional de los tricomas sea más importante en las primeras etapas del desarrollo de las hojas cuando la densidad es más alta. Sin embargo, ya que los cambios en el número de tricomas se producen simultáneamente con los cambios en las ceras cuticulares, es

difícil cuantificar directamente la contribución de la densidad de tricomas a la absorción foliar a medida que la hoja madura.

A nivel de toda la planta, las diferencias entre las especies en los patrones de desarrollo de las hojas, la expansión de la canopia y hábitos de carga frutal también afectan a la homogeneidad de la superficie de la hoja al alterar la canopia foliar a una edad determinada en cualquier momento. Por ejemplo, en melocotonero (*Prunus persica* L. lotes) la canopia la componen principalmente largos brotes con un continuo crecimiento de los brotes y expansión de las hojas a lo largo de la estación de crecimiento (Gordon y Dejong, 2007). Por otra parte, la canopia de los árboles de manzano (*Malus domestica* L.) y de almendro (*Prunus amygdalus* L.) se componen principalmente de brotes cortos y el desarrollo de la cobertura foliar esencialmente se completa en un mes (Lakso, 1980). También hay claras diferencias entre árboles de hojas perennes y árboles de hoja caduca, donde los árboles de hoja perenne (por ejemplo. *Citrus sp.*, *Olea europea*) mantienen sus hojas durante más de un año cuyo crecimiento ocurre en oleadas durante períodos discretos de tiempo. En muchas especies anuales, incluyendo los principales cultivos de cereales, el crecimiento de las plantas y la expansión de las hojas continúan desde la primera expansión de la hoja a lo largo de la floración y hasta el desarrollo de las semillas, momento en que la senescencia comienza en las hojas más maduras y progresa hacia las más jóvenes.

Árboles jóvenes cultivados con altos niveles de fertilidad y disponibilidad de agua muestran extensión de brotes y persistencia de la canopia por un período más largo (Ramos *et al.*, 1984) mientras que a la inversa el área total de la canopia y el tamaño de las hojas se ven afectados negativamente por las deficiencias de nutrientes o de agua (Chabot y Hicks, 1982). La variabilidad en la intensidad de la luz y la distribución espectral dentro de la copa también puede producir falta de uniformidad del follaje dentro de la copa. La distribución de la luz dentro de la copa puede estar influenciada por diversas prácticas culturales tales como el espaciamiento de árboles, poda y porta injertos (Jackson y Palmer, 1980). Además, la senescencia foliar se retrasa en las partes expuestas a la luz en comparación con las partes sombreadas de la copa.

La absorción y la redistribución de nutrientes aplicados al follaje varían con la heterogeneidad de las hojas (Weinbaum, 1988). Experimentos realizados tanto en almendros (Weinbaum, 1988) como en olivos con aplicaciones foliares de urea en junio/julio (Barranco *et al.*, 2010), o más tardíamente, tuvieron una respuesta mayor que en aplicaciones realizadas en abril. Fisher (1952) y Barranco *et al.* (2010) interpretan este efecto como el resultado de una mayor área foliar disponible para la absorción de urea. La exportación del N de la urea aplicada al follaje de hojas inmaduras se reduce cuando se aplica a principios de la temporada debido a una mayor incorporación del N en las proteínas de la hoja durante el desarrollo del follaje. En contraste, el N aplicado al final de la temporada no estimula la formación de proteínas y aparece con mayor movilidad a otras partes de la planta a medida que se produce la senescencia de la hoja (Klein y Weinbaum, 1984). El efecto de la edad de la hoja en la absorción y transporte de nutrientes de aplicación foliar puede atribuirse directamente al cambio de estadio ontogénico de la hoja, desde ser un 'destino' de fotosintatos producidos en tejidos

maduros para luego convertirse en la ‘fuente’ de fotosintatos para otros destinos de reciente desarrollo.

“La transición desde el estadio de ‘destino’ a ‘fuente’ es uno de los eventos clave en el desarrollo de una hoja. Cuando una hoja está a medio camino del desarrollo, interrumpe la importación de nutrientes móviles por el floema desde otras partes de la planta y comienza a exportar sus propios productos de fotosíntesis. Este cambio en la dirección de transporte, que en gran medida es irreversible, implica cambios importantes en la forma en que los metabolitos son transportados hacia y desde el mesófilo de la hoja a través de los plasmodesmos y a través de transportadores. La importación de nutrientes cesa cuando los plasmodesmos en los grandes vasos desaparecen o se estrechan tanto que previenen la descarga desde el floema. La exportación comienza cuando los vasos menores maduran y comienzan a descargar azúcares y otros compuestos en el floema. La naturaleza unidireccional de la carga es consecuencia de la orientación del transportador de sacarosa en la membrana plasmática de las células del floema, o de la captura de azúcares de la familia de la rafinosa en aquellas especies que cargan a través de los plasmodesmos”. (Turgeon, 2006)

En relación a la ontogenia de las hojas, éstas no son física o fisiológicamente capaces de exportar nutrientes hasta después de que hayan madurado y de la misma manera, las hojas maduras son incapaces de importar nutrientes después que maduraron. Esta opinión es consistente con la literatura más antigua en la que se aplicó ^{32}P radiactivo como tratamiento foliar a plantas de frijoles con hojas secuencialmente más jóvenes, monitoreándose el transporte del P marcado aplicado por 48 horas después mediante la colocación de las plantas sobre películas de rayos X (Figura 4.1). La aplicación del ^{32}P a hojas maduras (A y B) resultó en el rápido transporte de los productos conteniendo P marcado hacia las hojas más jóvenes en desarrollo y las raíces. Con la aplicación a hojas sucesivamente más jóvenes (C), el transporte desde la hoja tratada se reduce y restringida al tejido destino más cercano (meristemas apicales de los brotes) sin que hubiera ^{32}P transportado hacia las raíces; mientras que la aplicación a hojas inmaduras (D) resultó en el 100% de retención del P marcado en la hoja tratada. Si bien el tiempo de transición desde ‘destino’ a ‘fuente’ varía entre especies y ambientes, el efecto de esta

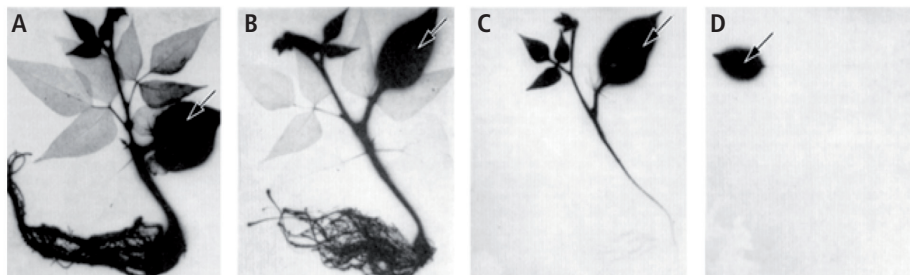


Figura 4.1. ^{32}P fue aplicado a la hoja indicada (flecha) por inmersión. 24 horas después de la exposición, las plantas fueron colocadas sobre un film de rayos X ilustrándose la distribución del P marcado (Koontz y Biddulph, 1957).

transición en la capacidad de las hojas para exportar nutrientes de aplicación foliar es un principio general que debe considerarse cuando se diseñan e interpretan las aplicaciones foliares.

En conjunto, estos resultados ilustran la dificultad en interpretar estudios sobre la edad de las hojas, estructura de la cutícula y fenología de las plantas en relación a la absorción foliar. En ausencia de factores bióticos y abióticos, es evidente que (a la escala de una única hoja) la proporción de ceras cuticulares por unidad de área foliar disminuye con el tiempo, ya que las hojas se expanden más rápidamente que lo que se sintetiza de nueva materia cuticular. En condiciones de campo, este patrón puede invertirse ya que la luz, temperatura, humedad, tensiones mecánicas y otros factores bióticos y abióticos estimulan la síntesis de cutícula mientras que restringe la expansión de las hojas. La complejidad de las interacciones entre la edad de la hoja y la absorción foliar se complica aún más por los cambios simultáneos en el metabolismo de la hoja y la exportación de nutrientes que se producen durante su desarrollo, así como los patrones de fenología del cultivo que determinan la distribución de hojas por edad, arquitectura de la copa y la competencia relativa entre órganos. También es muy difícil comparar los resultados de diversos experimentos dado que la edad fisiológica verdadera de la hoja es altamente dependiente de las condiciones de crecimiento y de los cambios simultáneos en la deposición de materiales cuticulares, expansión de las hojas y la acumulación de esfuerzos mecánicos y bióticos (patógenos y defoliación por insectos o animales masticadores), los que actúan todos para alterar la capacidad de absorción foliar. Cuando se da una rápida exportación de un nutriente móvil por el floema debe tenerse cuidado de asegurar cuantificar la tasa de absorción mediante la medición de la recuperación de nutrientes tanto en la zona tratada, así como en órganos 'destino'.

- La influencia de la edad de la hoja y del ambiente sobre la eficacia de las aplicaciones foliares es compleja y en la actualidad no hay principios universales pueden discernirse.
- Las hojas de diversas especies exhiben grandes diferencias en la estructura de la cutícula, porcentajes y composición de ceras, pero estas diferencias no son suficientes para predecir una determinada capacidad de absorción foliar.
- El efecto de la edad de la hoja en la absorción y transporte de nutrientes aplicados por vía foliar se puede atribuir directamente a la transición de la hoja desde un 'destino' de fotosintatos hacia una 'fuente' de fotosintatos para los 'destinos' de reciente desarrollo.
- A nivel de planta total, las diferencias en los patrones de desarrollo de las hojas, la expansión de la canopia y el hábito de fructificación afectan la homogeneidad de la canopia y por lo tanto alteran la población de hojas de una determinada edad en cualquier momento de tiempo.
- Las tasas de absorción de sustancias químicas aplicadas a las hojas disminuye con la edad de la hoja desde su iniciación hasta la plena expansión y puede aumentar nuevamente durante la senescencia.

4.3. Especies y variedades

Si bien se han reportado un gran número de informes que demuestran diferencias en la absorción foliar entre las especies, muy pocos de estos estudios han identificado el mecanismo que los explica. Klein y Weinbaum (1985) examinaron la absorción de urea por hojas de olivo (*Olea europea* L.) y de almendro (*Prunus dulcis* Mill. DA Webb) y encontraron que el olivo absorbe 15 veces más urea que el almendro por unidad de área foliar. Entre los árboles frutales, se han observado ejemplos de diferencias varietales en respuesta a la aplicación foliar de N por durazno, ciruelo, manzano y cítricos. Van Goor (1973) mostró diferencias significativas en la absorción de Ca^{2+} por manzanos de distintas variedades, con absorción de cinco veces más Ca^{2+} en 'Orange Pippin de Cox' que en la variedad 'James Grieve'. Wojcik *et al.* (2004) indicaron que el aumento de la concentración de Ca^{2+} en frutos de manzano como resultado de la aplicación foliar de Ca^{2+} dependía de la variedad. Por ejemplo, las manzanas de variedad 'Idared' absorbieron menos Ca^{2+} que las 'Jonagold' y 'Gloster'.

El mecanismo por el cual las especies difieren en sus respuesta a la pulverización foliar fue investigado por Picchioni *et al.* (1995) que mostró que la tasa de absorción de B por hojas de manzano fue dos a tres veces mayor que la del peral, ciruelo y cerezo. Se encontró que las diferencias genotípicas en las características de la superficie de las hojas de los brotes, entre las especies estudiadas, influía mucho en la cantidad de solución retenida por unidad de área foliar. La retención de solución en la hoja varía según las especies, con retención significativamente mayor de B por unidad de área foliar en manzano que las de hojas del peral, ciruelo y cerezo (Figura 4.2). En promedio, las hojas de brotes de manzano retuvieron, absorbieron y exportaron al menos el doble de B marcado por unidad de área foliar que las hojas de brotes de ciruelo y peral; y de tres a cuatro veces más que las hojas de brotes de cerezo. Estas diferencias en la cantidad de B absorbido por las hojas y la cantidad de B exportado desde las hojas (Figura 4.3) pueden ser atribuidas a la aparición de abundantes pelos epidérmicos en las hojas del manzano que ayudan a retener la solución aplicada (Picchioni y Weinbaum, 1995). Estas observaciones están de acuerdo con otros (Brewer *et al.*, 1991; Fernández *et al.*, 2011; Hesse y Griggs, 1950), quienes encontraron una influencia significativa de los tricomas en el grado de mojado de la superficie de las diferentes superficies de las plantas.

La velocidad a la que un nutriente se transporta desde la hoja al floema también influirá en los niveles de nutriente en los tejidos observados por varias horas o incluso días después de la aplicación foliar. Aplicaciones de B en manzano y almendros, en donde hay una re-movilización sustancial del B aplicado desde las hojas hacia los tejidos de fructificación (Picchioni y Weinbaum, 1995), generalmente terminan a largo plazo con bajas concentraciones de B en la hoja que aplicaciones en condiciones equivalentes a pistacho o nogal, adonde el B es inmóvil. Esta diferencia en la movilidad relativa de B es el resultado de la formación de compuestos específicos B-sorbitol en manzano y en almendro, pero no en nogal o pistacho (Brown y Shelp, 1997). Por lo tanto, bajo estas circunstancias, el análisis de tejidos foliares de los contenido de B a horas de realizadas e incluso días después del tratamiento foliar dará lugar a la falsa conclusión de que el nogal y el pistacho absorben más B que el manzano o el almendro.

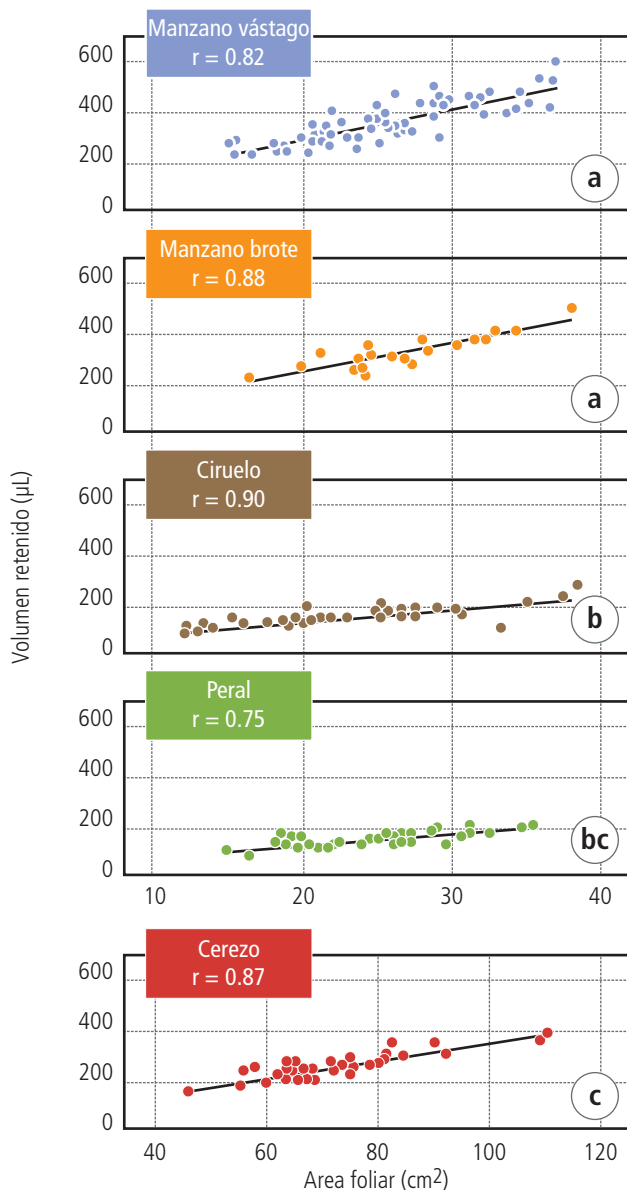


Figura 4.2. Relación entre el área foliar de una única hoja y el volumen total del tratamiento de solución de B (1000 mg B/litro + 0.05% Triton X-100) retenido por hoja. Los cultivares son de arriba a abajo: Manzano 'Red Delicious', Ciruelo 'Francés', Peral 'Bartlett' y Cerezo 'Bing'. Todos los datos corresponden a hojas en brotes a menos que se especifique lo contrario. Las líneas de regresión con la misma letra tienen pendientes que no son significativamente diferentes a $P = 0.05$. Cada coeficiente de correlación es significativo al nivel de $P = 0.01$ (Adaptado de Picchioni y Weinbaum, 1995).

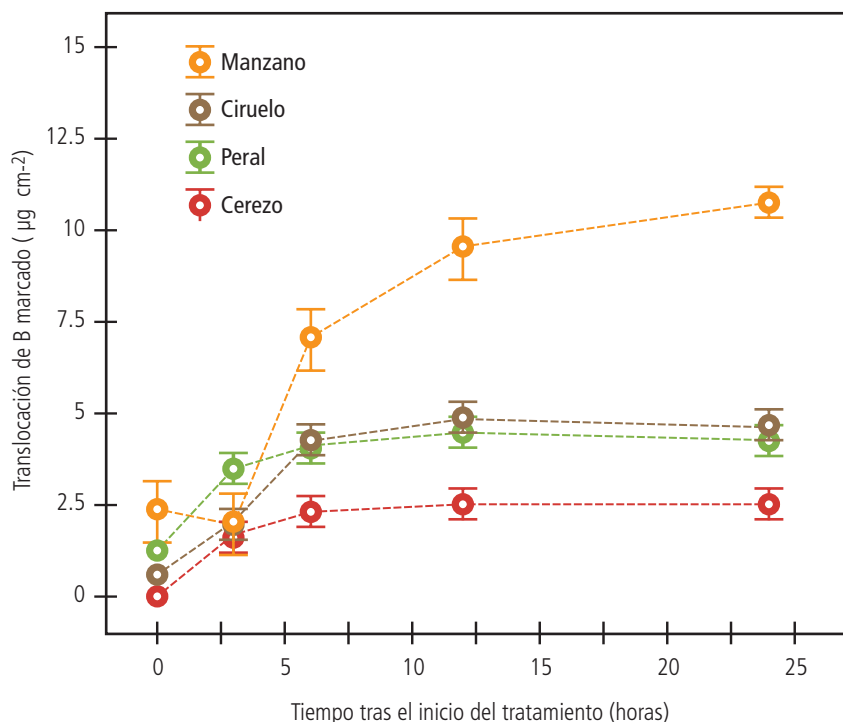


Figura 4.3. Exportación de B marcado aplicado por vía foliar, desde hojas en brotes expresados en cantidades absolutas. El momento 0 horas se refiere a 15-20 minutos después de la aplicación (cuando la hoja ya se había secado visiblemente). La exportación se calculó como la diferencia entre la cantidad de B marcado absorbido y la cantidad de B marcado medido en extractos de tejido foliar en cada período de tiempo ($\mu\text{g cm}^{-2}$). Los cultivos se muestran en la Figura 4.2. Cada valor es $\pm$ el error promedio estándar de cinco repeticiones de dos hojas con una sola aplicación (Adaptado de Picchioni y Weinbaum, 1995).

Las diferencias en la tasa de re-movilización de nutrientes absorbidos también pueden explicar la respuesta diferencial de las especies a los quelatos de Fe. Schlegel *et al.* (2006) reportaron que la penetración del quelato de Fe-IDHA en la superficie de hojas con muchos estomas difieren entre distintas especies vegetales. La disminución de las pendientes con el tiempo fue más visible en hojas de manzano y de vid. La penetración fue lineal con habas y jazmín de Madagascar, pero no con otras especies estudiadas.

Las diferencias entre especies en la utilización de los nutrientes foliares están, sin duda relacionadas con la composición física y química de la superficie de la hoja. Por ejemplo, la recuperación y la absorción de Zn aplicado en nogal fue menor que en pistacho (Zhang y Brown, 1999b). Esta menor eficacia se asocia con una capa altamente hidrofóbica de cera cuticular en la hoja del nogal, lo que limita la penetración de Zn, y

una alta capacidad de fijación del catión de Zn en los sitios de intercambio de la pared celular y de la cutícula (Zhang, 1999).

La longevidad de la hoja también puede estar relacionada con las diferencias entre especies en respuesta a los fertilizantes foliares. Los árboles de hoja perenne como los cítricos, banano, café y cacao son más eficientes en la utilización de nutrientes derivados del suelo y de aplicación foliar debido a sus hojas más longevas; y los ciclos de humedecimiento y secado de las hojas mejora el reciclado de los nutrientes a través del proceso de la caída de estas durante el otoño y posterior proceso de descomposición (Aerts y Chapin, 2000).

4.4. Efecto del ambiente en la eficacia de los nutrientes aplicados por vía foliar

Tanto la luz, como la humedad y la temperatura pueden afectar la absorción foliar de varias maneras: 1) A través de su efecto directo en la solución pulverizada antes de la absorción por la hoja (Capítulo 3.2.); 2) A través de su efecto en los procesos de desarrollo de la hoja discutidos antes (Capítulo 4.2); y 3) alterando la fotosíntesis, la apertura de los estomas, la respiración, expansión foliar y actividad de los destinos y consecuentemente cambiando la disponibilidad de energía y metabolitos para la absorción, asimilación y subsecuente transporte de los nutrientes foliares.

4.4.1. Luz

La absorción química de los iones por las hojas verse directamente afectada por la luz como resultado de cambios físicos y químicos en la cutícula y también debido a la influencia directa de la luz en la disponibilidad de energía y metabolitos en la absorción y asimilación de los nutrientes aplicados por vía foliar (Abadia, 1992; Álvarez-Fernández *et al.*, 2004; Hundt y Podlesak, 1990; Jacoby, 1975; Muhling y Lauchli, 2000; Nobel, 1969; Nobel, 1970; Rains, 1968; Raven, 1971; Swader *et al.*, 1975).

La cantidad y composición de las ceras sintetizadas y su arreglo en la superficie está directamente influenciado por la luz incluyendo radiación fotosintéticamente activa (Cape y Percy, 1993; Takeoka *et al.*, 1983), así también como la radiación UV-B (Barnes *et al.*, 1996; Bringe *et al.*, 2006). Se encontró que el espesor de la cutícula y la cantidad de ceras cuticulares en varias especies vegetales eran mayores en aquellas cultivadas con altas que con bajas intensidades de luz (Macey, 1970; Reed y Tukey, 1982) y que el desarrollo de las estructuras secundarias de ceras aumentaba con intensidades de luz más altas (Hull *et al.*, 1975). La influencia de la luz es acumulativa con la exposición y Leece (1978) demostró que la reconstrucción y el desarrollo estacional de las estructuras secundarias de ceras en la superficie abaxial de hojas de ciruelo (*Prunus domestica* L.) se correspondía positivamente con una creciente intensidad de luz. Las hojas de árboles de manzano cultivados a campo pueden sintetizar hasta tres veces más cera cuticular por unidad de área en comparación con la misma especie cultivada en invernáculo (Hunsche *et al.*, 2004) y hasta 30 veces mayor que aquellas cultivadas con bajas intensidad de luz y alta humedad de condiciones de cultivo (Bringe *et al.*, 2006).

Numerosos investigadores también han demostrado efectos estimulantes de la luz en la absorción de nutrientes en el corto plazo (Bowen, 1969; Christensen, 1980; Nobel, 1969; Rains, 1968; Fernández *et al.*, 2005) mientras otros han demostrado que la luz no afecta la absorción (Rathore *et al.*, 1970; Zhang y Brown, 1999b). Jyung *et al.* (1965) y Shim *et al.* (1972) mostraron relaciones positivas entre la intensidad de la luz y la capacidad de las hojas de manzano y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) para absorber urea, Rb y PO_4 . Rains (1968) demostró un aumento en la absorción de K^+ por hojas cortadas de maíz (*Zea mays* L.) en presencia de luz, un efecto de corto plazo que fue observado aun en condiciones de baja luminosidad y que podía revertirse con el agregado de inhibidores metabólicos. En el maíz, el nivel de luz necesario para maximizar la absorción de K era más bajo que el requerido para la fotosíntesis (Rains, 1968); mientras que en tomate se necesitaban intensidades de luz mucho mayores para maximizar la absorción de K, la que decrecía rápidamente en la oscuridad y por los inhibidores de la fotosíntesis y desacopladores metabólicos tal como se muestra en la Figura 4.4 (Nobel, 1969). Schlegel y Schönherr (2002) reportaron que las tasas de penetración de CaCl_2 desde las superficies de las hojas en manzanos y perales en condiciones de luz fueron más alta que en la oscuridad.

Si bien se ha informado con frecuencia acerca del efecto positivo de la luz sobre la absorción de nutrientes aplicados por vía foliar, existen muchos ejemplos donde la luz, inhibidores metabólicos o bajas temperaturas no tuvieron ningún efecto sobre la absorción o transporte de nutrientes (Rathore *et al.*, 1970; Zhang y Brown, 1999b). En pistacho y nogal la absorción de Zn a altas concentraciones (7,5 a 15 mM) no se vio

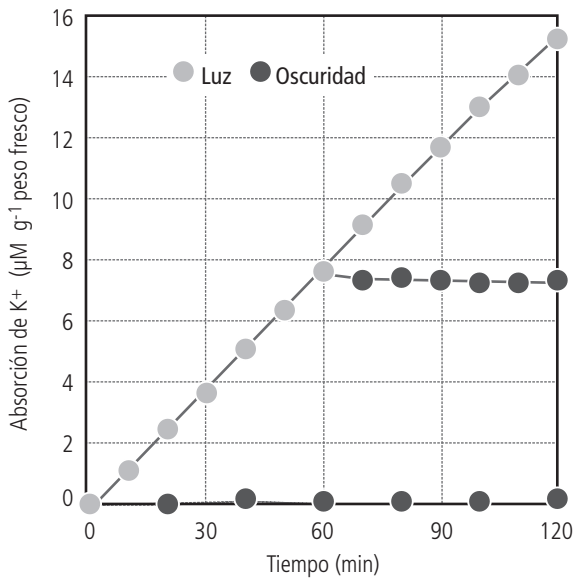


Figura 4.4. Efecto de periodos de luz y de oscuridad en la absorción de K por hojas aisladas de tomate (Adaptado de Noble, 1969).

afectada por la luz o inhibidores metabólicos (Zhang y Brown, 1999b), lo que confirma informes anteriores sobre absorción de Zn en frijoles (*Phaseolus vulgaris*) (Rathore *et al.*, 1970). Zhang y Brown (199b) interpretan estos resultados como evidencia de que la absorción de Zn fue el resultado de intercambio iónico y/o procesos de difusión en lugar de una tarea metabólicamente activa.

La luz puede tener un efecto directo también sobre la absorción foliar si el compuesto pulverizado es inestable a la luz. Varios autores han demostrado que los quelatos de Fe^{3+} son lábiles a la luz UV (Albano y Miller, 2001a; Albano y Miller, 2001b; Albano y Miller, 2001c) y, como consecuencia Schönherr *et al.* (2005) concluyeron que la penetración foliar de Fe quelatado ocurre preferentemente durante la noche, recomendando por lo tanto, que las aplicaciones foliares se realicen al final de la tarde. La potencial degradación fotoquímica o dependiente de la temperatura existe para pulverizaciones foliares de muchos productos comerciales y debería ser verificada antes de su adopción generalizada. Sin embargo, la aplicación de pulverizaciones en condiciones de oscuridad puede tener reducida la tasa de absorción ya que los procesos de absorción que implican la entrada por los estomas podrían no estar involucrado debido al cierre de éstos durante la noche.

Las diferencias reportadas sobre el efecto de la luz en la absorción a corto plazo de nutrientes aplicados por vía foliar probablemente sean el resultado de varios factores que interactúan. A nivel celular el transporte a través de las membranas, la regulación y la asimilación de la mayoría de los nutrientes están directamente o indirectamente influenciadas por el estado metabólico de la célula, de modo que sería de esperar que la oscuridad reduzca la absorción. La única excepción entre los elementos esenciales de las plantas puede ser el B, que no tiene carga a pH normal, y suficientemente permeable tanto a través de la cutícula de la hoja como de las membranas celulares para ser absorbido y asimilado espontáneamente en moléculas de importancia biológica y metabólica. Los resultados que indican que la absorción de Zn no responde a la presencia o ausencia de luz puede simplemente reflejar la falta de sensibilidad de la metodología empleada o bien podría ser una consecuencia de una demanda metabólica relativamente pequeña. De modo que la absorción pasiva de Zn tendría lugar en la energética de células enteras, lo que probablemente refleja una significativa unión del Zn a los materiales de la pared celular por procesos de difusión y de intercambio no metabólicos. Los resultados contrastantes obtenidos con los macronutrientes, N, P y K, probablemente reflejan una proporcionalmente menor unión a la pared celular y el predominio de procesos activos de absorción y transporte para estos elementos más móviles. También es probable que las aplicaciones de concentraciones relativamente bajas de micronutrientes no representan un coste metabólico sustancial, mientras que el suministro de concentraciones más elevadas de macronutrientes presenta un coste metabólico significativo para la absorción y asimilación, en especial en experimentos utilizando porciones cortadas de hoja.

4.4.2. Temperatura

La temperatura puede influir en la absorción foliar tanto a través de su efecto sobre la velocidad de secado de la pulverización aplicada, como sobre la físico-química de

la solución de nutrientes; así también como en su influencia sobre la cutícula de las hojas. También la temperatura influye en el metabolismo de la planta, la absorción y la asimilación de iones. El efecto más inmediato de temperaturas altas es el aumento de la velocidad de secado de las gotitas de pulverización, lo que va directamente a reducir la posibilidad de que haya absorción foliar a lo largo del tiempo. Sin embargo, se ha registrado en varias especies el aumento de la absorción foliar bajo altas y prolongadas temperaturas (Cook y Boynton, 1952). Las elevadas temperaturas podrían alterar la cantidad y la composición de las ceras que se sintetizan así como su disposición en la superficie durante el desarrollo de las hojas (Baker, 1974; Reed y Tukey, 1982) lo que luego influye en la absorción (Norris, 1974). Reed y Tukey (1982) afirmaron que bajo condiciones persistentes de altas temperaturas del aire los componentes cerosos de la superficie adoptan una configuración vertical y por lo tanto disminuye la cobertura de la superficie de la hoja, permitiendo por lo tanto, una mayor absorción de nutrientes. Lurie *et al.* (1996) informaron de que aun con ligeras alteraciones en la configuración molecular de las ceras de superficie se puede afectar significativamente la tasa de absorción de nutrientes. La temperatura también tiene un efecto directo en la velocidad de desarrollo de las hojas y por lo tanto influye en la absorción foliar a través de los efectos de la fenología y las relaciones fuente: sumidero de la hoja (Capítulo 4.1).

Durante un corto período de tiempo, la temperatura que predomina durante e inmediatamente después de la aplicación foliar tiene variados efectos dependiendo de la especie y el elemento mineral aplicado. En pistacho, la absorción de Zn después de una aplicación varió del 9 al 14% ya que la temperatura aumentó desde 8 hasta 31°C durante un período de 24 horas. Dentro del mismo rango de temperatura, la absorción de Zn en nogal sólo aumentó del 4 al 6% (Zhang y Brown, 1999b). El coeficiente de temperatura (Q10) es quizás el más clásico de todos los índices para separar los procesos de absorción activos de los pasivos por los tejidos vegetales (Zhang y Brown, 1999b). Según Wittwer y Teubner (1959) el Q10 para procesos de absorción activos de nutrientes en plantas es generalmente mayor de 2. El Q10 promedio, entre 1.2 a 1.4, para la absorción de Zn según lo observaron Zhang y Brown (1999b) es consistente con el Q10 de 1.2 informado por Rathore *et al.* (1970). La ausencia de una gran dependencia de la temperatura sugiere que la absorción foliar de Zn es en gran medida no metabólica, y dominada por el intercambio iónico y/o procesos de difusión. Además, la menor absorción foliar de Zn a temperaturas más bajas también se ha atribuido a un aumento de la viscosidad de la solución acuosa, lo que probablemente se traduce en una disminución de la tasa de difusión de los iones de Zn (Rathore *et al.*, 1970). La leve dependencia de la temperatura observada en estos experimentos contrasta con la fuerte dependencia de la temperatura reportada por Bowen (1969), quien encontró un Q10 de > 2,5 usando cortes de hoja de caña de azúcar. En pomelo Marsh (*Citrus paradisi* Macfad) la permeabilidad de la cutícula de hojas aisladas a la urea dentro de las primeras 4 a 6 horas después de la aplicación aumentó a medida que la temperatura se elevó desde 19 a 28°C, pero no hubo mayores aumentos a 38°C (Orbovic *et al.*, 2001).

Se han presentado otras evidencias de que los efectos de la temperatura en la penetración cuticular no se deben a cambios en el metabolismo (Schönherr, 2001; Schönherr *et al.*, 2005; Schönherr y Luber, 2001). Cuando la temperatura aumentó de

15 a 30°C las tasas de penetración de Ca y K no aumentaron (Schönherr, 2001); y en el rango de 15 a 35°C, las constantes de velocidad de penetración de Fe^{3+} quelatado no dependían de la temperatura (Schönherr *et al.*, 2005). En situaciones de campo la temperatura interactúa con la humedad relativa afectando las características físico-químicas y solubilidad de los materiales depositados.

4.4.3. Humedad

Así como con la luz y la temperatura, la humedad relativa puede afectar múltiples procesos que eventualmente influirán en la velocidad de la absorción foliar de los fertilizantes aplicados. Los principales procesos afectados por la humedad son 1) la reacción de la solución foliar aplicada durante el transporte aéreo y una vez depositada en la superficie de la planta 2) el efecto de la humedad en la estructura de la cutícula de la hoja y la función de los estomas y 3) el efecto de la humedad en el metabolismo de la hoja y los procesos de transporte. A corto plazo el efecto de la humedad en la absorción de nutrientes por las hojas se relaciona principalmente con la velocidad de secado de las gotitas durante el tránsito hasta la superficie de la planta y su persistencia una vez depositadas sobre la superficie de la planta (Gooding y Davies, 1992). Una alta humedad relativa favorece la absorción ya que demora el secado de la solución, lo que puede llevar a que se cristalice sobre la superficie de la hoja (Gooding y Davies, 1992). Además, la alta humedad del aire provoca que la membrana cuticular se hidrate favoreciendo la absorción de los compuestos hidrófilos (Schönherr y Schreiber, 2004) (Capítulo 3). Por lo tanto la humedad al momento de la aplicación foliar afecta la velocidad de la penetración por dos mecanismos independientes: a) mayor turgencia de la cutícula; y b) la disolución de la sal en relación con el punto de deliquesencia (POD), que se define como el valor de humedad relativa al que la sal se convierte en un soluto (Capítulo 3.1.4.). A más largo plazo (días o semanas) la humedad relativa influye en la cantidad y composición de las ceras sintetizadas y su disposición sobre la superficie, lo que en consecuencia, puede alterar la velocidad a la que penetran las aplicaciones foliares a través de las superficies de la planta (Baker, 1974). La humedad atmosférica luego de la absorción puede tener efectos generales sobre la respuesta de las plantas a los nutrientes foliares al afectar los procesos de transporte por el xilema y el floema. Eichert y Goldbach (2010) informaron que con una elevada humedad relativa del aire, el B aplicado a cotiledones de *Ricinus communis* L. fue transportado a los hipocótilos y raíces; mientras que con baja humedad no se detectó transporte alguno. Se concluye que la humedad ambiente del aire influye la movilidad del B por el floema a través de sus efectos en la tasa de flujo del xilema; si el flujo del xilema es bajo o se interrumpe, entonces el B aplicado por vía foliar se vuelve modestamente móvil.

Diversos estudios han demostrado el efecto de la humedad relativa en las propiedades físico-químicas de diferentes soluciones de pulverización de nutrientes y sus interacciones con la superficie de plantas (Schönherr y Schreiber, 2004) (Capítulo 3). En su clásico trabajo anterior, Wittwer y Bukovac (1959) demostró que la absorción de P por las hojas de frijol se duplicó cuando la superficie tratada se mantenía húmeda en comparación con tratamientos similares en los que se permitió que se sequen las superficies de las hojas. Cuando se aplican sobre las hojas sales con puntos

de deliquesencia (point of deliquescence; POD) mayores que la humedad relativa prevaleciente, “estas permanecen teóricamente como solutos y la penetración a través de la hoja se prolonga. Este principio ha sido claramente demostrado en estudios aislados de membranas cuticulares con compuestos de Ca, K y Fe con distintos regímenes de humedad, adonde la penetración de la membrana se comportó como reacciones cinéticas de primer orden. Cuando la humedad relativa está por encima del punto de deliquesencia (POD) del residuo salino en la cutícula éste se disuelve mientras que la penetración cesa cuando la humedad descende por debajo del POD. Con frecuencia cuando la humedad atmosférica ambiente está por encima del POD hay un aumento lineal en la penetración a medida que aumenta la humedad, aunque la naturaleza exacta de esta relación es específica entre la sal mineral y la especie vegetal (Schönherr, 2001; Schönherr y Lubert, 2001).

Tabla 4.2. Punto de deliquesencia (POD) de diversas sales (Schönherr, 2002).

Compuesto	POD (%)
CaCl ₂ · 6H ₂ O	33
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	56
MgCl ₂ · 6H ₂ O	33
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	56
MgSO ₄	90
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	42
ZnSO ₄	90
KCl	86
KNO ₃	95
K ₂ SO ₄	98
K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O	44
K ₂ HPO ₄	92
KH ₂ PO ₄	95
NH ₄ NO ₃	63
Ca-propionato · H ₂ O	95
Ca-lactato · 5H ₂ O	97
Ca-acetato	100
FeCl ₃ · 6H ₂ O	44
Fe(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	54
Mn(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	42
MnCl ₂ · 4H ₂ O	60

Las anomalías registradas en las relaciones entre la humedad relativa, el POD y la penetración, pueden ser el resultado de la existencia de capas inalteradas que aumentan la humedad efectiva en la superficie de la hoja. La alta humedad relativa también puede alterar la apertura de los estomas y tener efectos no lineales en la formación de poros acuosos (Schlegel *et al.*, 2005; Schlegel *et al.*, 2006; Schönherr, 2006). Van Goor (1973) demostró que un aumento de la penetración del Ca^{2+} a través de la membrana cuticular de las manzanas se correlacionó con la disminución de la humedad del aire justo en el momento después de la aplicación. Este fenómeno se explica por un aumento en la concentración del Ca^{2+} de las gotitas como resultante de su secado y el consiguiente aumento del gradiente de concentración para una mayor difusión. Sin embargo, a pesar de la dinámica de una mejor absorción inicial ante baja humedad del aire, las tasas de absorción finales de los nutrientes con sales de baja higroscopicidad se reducen debido a la rápida cristalización de las sales una vez humedad desciende por debajo del POD (Wojcik, 2004).

Si bien es evidente que tanto el POD de los productos químicos de aplicación foliar como la humedad durante el período de aplicación pueden tener un efecto importante en la penetración, el único conocimiento del POD es con frecuencia insuficiente para predecir la eficacia de una sal mineral como fertilizante foliar. Por ejemplo, la aparente facilidad de penetración del $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ o del CaCl_2 (Figura 4.5) demostrados por Schönherr (2001) y Schönherr y Luber (2001) no explican la gran dificultad que muchos agricultores han encontrado en la corrección de las deficiencias de Ca observadas a campo; además hay muchos reportes de formulaciones con supuesta eficacia que sólo un análisis del POD no lo sustentaría. Mientras que un POD menor que la humedad ambiente facilitará la absorción, esto no siempre es una garantía, ya que hay muchos otros factores (por ejemplo, asociados con la fisiología de las plantas o de las condiciones ambientales prevalecientes) que puede dificultar el proceso de absorción en condiciones de campo. La eficacia de sales con alto POD se puede mejorar mediante el uso de adyuvantes con propiedades humectantes (Capítulo 3). Además, y según lo sugerido por Burkhardt (2010) para soluciones de pulverización higroscópicas depositadas sobre las superficies de las plantas, las sales con POD bajo pueden o bien actuar como desecantes o simplemente aumentar las tasas de absorción de nutrientes. En consecuencia, las sales con bajo POD pueden ser más eficaces, pero también pueden ser más propensas a causar fitotoxicidad. (Wojcik, 2004).

En resumen, la humedad relativa influye en la absorción foliar primariamente a través de su efecto en el tamaño de la gotita y su persistencia en la superficie de la hoja en estado líquido. La humedad también altera la cutícula de la hoja, sus características físicas y químicas y tiene un efecto directo en la fisiología de la hoja y procesos de transporte.

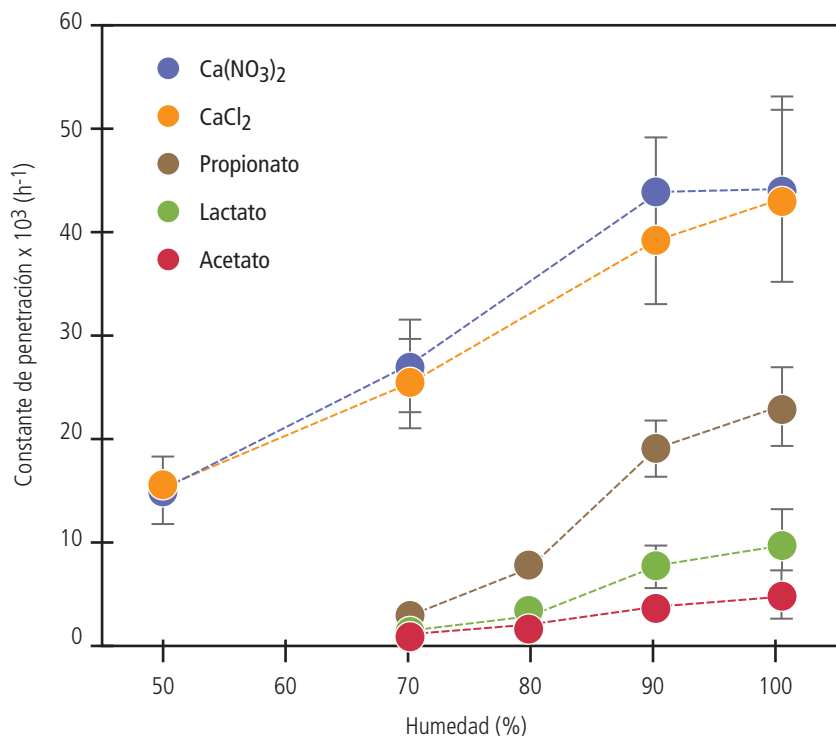


Figure 4.5. Influencia de la humedad y aniones acompañantes en la penetración de sales de Ca a través de cutículas aisladas de manzanas (Adaptado de Schönherr, 2001).

La luz, la humedad y la temperatura pueden afectar la absorción foliar: 1) a través de efectos directos sobre la solución de pulverización antes de la absorción por la hoja; 2) a través de efectos sobre los procesos de desarrollo de las hojas; y 3) alterar la fotosíntesis, la apertura de estomas, la respiración, la expansión de la hoja y la actividad 'destino', procesos que en consecuencia, cambian la energía y la disponibilidad de metabolitos implicados en la absorción, la asimilación y el transporte subsiguiente a la aplicación foliar de nutrientes.

- Los efectos directos de la luz y de la temperatura en el metabolismo la hoja que influyen en la eficacia del fertilizante foliar no están bien caracterizados pero pueden ser muy significativos.
- La humedad relativa puede afectar la estructura de las hojas y sobre todo tiene un importante efecto en cuanto a la velocidad a la que las soluciones de fertilizantes foliares se secan en la superficie de las hojas.
- La luz y la temperatura influyen en la absorción foliar principalmente a través de sus efectos sobre las características físicas y químicas de la solución foliar, así como en la apertura estomática y en el desarrollo de la cutícula.

4.5. Resumen de los efectos del ambiente sobre la respuesta de las plantas a la fertilización foliar

Durante períodos más bien largos (semanas) el ambiente en que se desarrolla una planta puede alterar la cutícula y otras características físicas de las hojas, así como la fenología del cultivo y el metabolismo de las plantas. El estrés ambiental se ha observado que influye en la absorción foliar, tanto para mejorarla a través de la interrupción de la integridad de la cutícula de la hoja, como para reducirla, al alterar la expansión foliar, la actividad de 'destino' y metabolismo de la planta. A plazos más cortos (horas o días) las condiciones ambientales óptimas maximizan la actividad fotosintética, la apertura de estomas y el rendimiento metabólico de los cultivos y por lo tanto mejoran el potencial de absorción, de transporte y en general la respuesta de la planta a los nutrientes aplicados por vía foliar. Este efecto es mayor para nutrientes que son fácilmente permeables; se aplican en cantidades metabólicamente significativas; y son asimilados rápidamente por la planta. Para estos nutrientes, las condiciones ambientales desfavorables (especialmente con poca luz o con temperaturas sub-óptimas) pueden limitar la disponibilidad de suficiente energía y de sustratos metabólicos como para llevar a cabo los procesos de absorción, transporte y asimilación. Entre los ejemplos de fuentes de nutrientes fertilizantes que pueden ser afectados por las condiciones ambientales sub-óptimas son la urea y otras formulaciones de macronutrientes solubles y permeables de N, P, K, S y Mg. Para elementos que interactúan fuertemente con los componentes de la cutícula y la pared celular, y se aplican en concentraciones tales que no se espera que representen un coste energético o metabólico sustancial (predominantemente los micronutrientes) para su absorción, un efecto directo de la temperatura en los procesos metabólicos (por ejemplo absorción) es poco probable. En cualquier caso, el efecto del ambiente es probable que sea resultado de influencias físicas y no biológicas.

Además de sus efectos directos sobre la absorción metabólica y los procesos de transporte, la temperatura determina el patrón de secado de la gotita y distribución a lo largo de la superficie de la hoja, lo que también tiene un efecto directo sobre la eficacia de las aplicaciones foliares (Capítulos 2 y 3). En última instancia, es la combinación de los efectos del medio ambiente en la planta antes de la aplicación foliar y en la biología de la planta durante y después de la absorción, las que determinan el impacto del ambiente en la eficacia de la fertilización foliar.

4.6. Movilidad y transporte de nutrientes

La eficacia de las pulverizaciones foliares no sólo dependen de la absorción de los nutrientes, sino también del transporte de estos nutrientes a otras partes de la planta como frutos, granos, hojas jóvenes, etc. (Bukovac y Wittwer, 1957). El conocimiento de la capacidad de un elemento para ser transportado desde el lugar de aplicación puede dar una idea de la longevidad y el impacto potencial nutricional de la aplicación foliar en tejidos no pulverizados. Los tejidos no pulverizados incluyen a las raíces, el crecimiento de nuevos brotes que se desarrollan después de la aplicación foliar, y

tejidos que no estaban en contacto directo con la solución de pulverización. También se incluyen los tejidos internos del fruto, yemas latentes, tejidos reproductivos cerrados (tales como espigas de trigo dentro de la vaina de la hoja), así como tejidos vasculares y almacenamiento. Si bien la capacidad de un elemento para ser transportado desde el lugar de aplicación a otras partes de la planta (raíces, tejidos de almacenamiento, los órganos reproductores) aumenta el potencial beneficio de toda la planta, debe enfatizarse en que el transporte desde el lugar de aplicación no es indispensable para probar la eficacia foliar. De hecho, es probable que la mayoría de las pulverizaciones de Zn, Mn, Ca y Fe sean de efecto local, con transporte muy limitado fuera de los tejidos pulverizados.

Sin embargo, estas pulverizaciones aún pueden tener un significativo beneficio local e incluso un transporte relativamente pequeño desde hojas y tejidos tratados puede tener a corto plazo un beneficio fundamental para la planta. El desarrollo de los fertilizantes foliares y técnicas de aplicación que optimicen el transporte de los nutrientes desde el sitio de aplicación siguen siendo uno de los retos más importantes para la industria. Actualmente, sólo se dispone de información limitada que sugiere que los nutrientes de aplicación foliar son transportados de manera diferente, o tienen un impacto fisiológico diferente de los nutrientes derivados del suelo. De la misma manera, así como se ha demostrado que la forma química como se aplica un nutriente puede influir en su velocidad de absorción, no se ha confirmado si el nutriente provisto, puede influir en el transporte de este mismo nutriente absorbidos desde el sitio de aplicación. Estas son cuestiones de gran importancia para la aplicación de la ciencia y la práctica a campo de los fertilizantes foliares.

Marschner (1995) clasifica los nutrientes en tres grupos en cuanto a su movilidad en el floema: gran movilidad (N, P, K, Mg, S, Cl, Ni); intermedia o condicionalmente móvil (Fe, Zn, Cu, B, Mo); y baja movilidad (Ca, Mn). Además, Epstein y Bloom (2005) también clasifican a los nutrientes con referencia a su movilidad en el floema (Tabla 4.3). Los primeros autores clasifican al B como de alta o baja movilidad dependiendo de la especie, tal como lo describen Brown y Hu, (1998).

La especie y el estado fenológico tienen efectos críticos en la movilidad de todos los elementos pero estos son particularmente importantes para aquellos de movilidad intermedia o condicional.

En particular la movilidad de los micronutrientes dentro de la planta es una importante característica que determina el crecimiento de las plantas y la supervivencia bajo condiciones de limitada disponibilidad de nutrientes. Los siguientes tres factores se combinan para determinar la movilidad de un nutriente en el floema: a) la capacidad de un nutriente para entrar en el floema; b) la capacidad de un nutriente para moverse dentro del floema; y c) la capacidad de un nutriente para salir del floema hacia los tejidos de 'destino'.

El grado de movilidad de un elemento en particular varía significativamente a lo largo del ciclo de la planta y esto puede variar significativamente entre las especies. Las etapas de desarrollo que afectan a la movilización de micronutrientes incluyen la germinación de semillas, crecimiento vegetativo y reproductivo, senescencia de las hojas y el inicio de un nuevo crecimiento en las especies perennes. La movilización

Tabla 4.3. Clasificación de nutrientes con respecto a su movilidad en el floema (Epstein y Bloom, 2005).

Móvil	Intermedio o de movilidad condicional	Baja movilidad
Potasio	Sodio	Calcio
Nitrógeno	Hierro	Sílice
Azufre	Zinc	Manganeso
Magnesio	Cobre	Boro (depende de la especie)
Fosforo	Molibdeno	
Boro (depende de la especie)		
Cloro		

de nutrientes durante la flor y la formación de las semillas, así como después de la germinación de semillas son las fases más críticas. De hecho movilización de nutrientes almacenados durante la germinación de semillas, especialmente en suelos infértiles y áridos, es importante para el suministro de micronutrientes a las plantas jóvenes antes de su desarrollo de un sistema radicular suficiente para permitir la captación significativa del suelo. Durante la senescencia foliar, la re-movilización de nutrientes de las hojas a los tejidos reproductivos representa una importante fuente de nutrientes para los frutos y semillas. La evidencia reciente sugiere que el contenido de nutrientes de las semillas puede mejorarse con el uso de aplicaciones foliares apropiadas y bien sincronizadas apropiados con beneficios posteriores para el consumo humano de cereales ('tratado') y posterior a la germinación de las semillas (luego de la siembra) (Cakmak *et al.*, 2010; Dordas, 2006; Ozturk *et al.*, 2006).

En general, existe un bajo potencial de re-movilización de nutrientes foliares absorbidos hasta que los potenciales sitios de unión para ese elemento dentro de la hoja están saturados, por lo que la deficiencia de nutrientes puede reducir la movilidad de nutrientes ya que habrá muchos sitios de unión insaturados para llenar (saturar). La movilidad de los nutrientes también puede ser limitada hasta que la integridad estructural de la hoja comienza a disminuir durante la senescencia liberando así los nutrientes fuertemente unidos previamente. Este efecto es particularmente importante para los nutrientes que se encuentran en estructuras permanentes tales como la pared celular, los que exhiben bajas tasas de rotación, incluyendo algunos micronutrientes por ejemplo, Zn, B y Cu. Cuando las plantas se cultivan con niveles deficientes o marginalmente adecuados para el suministro de nutrientes, más del 90% de los micronutrientes Cu, Zn y B, están presentes en estructuras permanentes y en particular en la pared celular (Brown y Bassil, 2011; Brown *et al.*, 2002; Zhang y Brown, 1999a). En especies con movilidad limitada de B (Brown y Hu, 1998) las aplicaciones foliares de B son más efectivas mejorando la translocación del B cuando éste está en niveles suficientes en los tejidos al momento de la aplicación (Hanson, 1991; Leite *et al.*, 2007; Will *et al.*, 2011). Para el Zn se hipotetizó una respuesta similar (Erenoglu *et al.*, 2002; Zhang y Brown, 1999a) observándose una óptima re-translocación al grano cuando

se utilizó una combinación de Zn aplicado al suelo y por vía foliar. Más aun, durante el llenado de grano en plantas de trigo que tenían niveles suficientes de Cu en la hoja bandera, éstas perdieron más de 70% del Cu en comparación con sólo 20% en las plantas que presentaban niveles deficientes de Cu (Hill *et al.*, 1979a; Hill *et al.*, 1979b). Esta relación entre el estado nutricional y la re-movilización no se produce con los elementos más móviles N, P, K, S, Mg, B (en las especies productoras de polioles), Cl, y Ni dado que una pequeña porción del contenido celular de estos elementos se asocia con estructuras permanentes y cada uno de estos elementos es móvil también en el floema. En general, la deficiencia de N, P, K, Mg y S aumenta y acelera la senescencia con la re-movilización de nutrientes.

La movilidad de los micronutrientes tiene un impacto significativo sobre la incidencia, la expresión y la corrección de las deficiencias de éstos. Los elementos móviles en el floema pueden moverse desde órganos con relativa abundancia hacia los tejidos en crecimiento de modo que las plantas no muestran inmediatamente síntomas de deficiencia de nutrientes o depresión del crecimiento cuando la demanda de un nutriente en particular es superior a su tasa de absorción. Comprender el mecanismo preciso de la movilidad en el floema es importante ya que puede servir de base para la selección o ingeniería genética de plantas con mejor movilidad en el floema. Mejorar la tolerancia a deficiencias de corto plazo de micronutrientes ha sido demostrado recientemente para el B (Brown *et al.*, 1999). El conocimiento de la forma química en la que los nutrientes son transportados en el floema es importante para el desarrollo de formulaciones de fertilizantes foliares que imiten el proceso natural de la planta. El desarrollo de fertilizantes a base de polioles para el transporte de B, así como aquellos basados en aminoácidos se fundamentan en este razonamiento, aunque aún no están disponibles pruebas científicas del transporte de elementos en su forma esterificada.

Las discusiones sobre el transporte por el floema deben reconocer que éste es fuertemente influido por el genotipo de la planta y por diversos factores externos e internos, si bien se pueden realizar algunas generalizaciones. Se piensa que el N, P, K, Ni, Mg, S, Cl y B en las especies que los transportan como polioles (Brown y Bassil, 2011) son móviles en el floema en todas las especies, con tasas de transporte determinados por el estado nutricional de la hoja y relaciones 'fuente': 'destino'. Los elementos Ca, B (en especies que no las transportan como polioles) y Mn, son inmóviles en la gran mayoría de las plantas excepto en unas pocas especies (Ca y Mn son móviles en lupino) y en algunas especies durante la senescencia (Brown y Shelp, 1997; Graham *et al.*, 1988; Jeschke *et al.*, 1987). Los elementos intermedios o condicionalmente móviles (Zn, Fe, Cu y Mo) pueden ser inmóviles o relativamente móviles en función de la fenología y del suministro, lo que se discutirá más adelante.

Los intervalos típicos para los componentes de la savia en el xilema y en el floema en plantas superiores se muestran en la Tabla 4.4.

Debido a la alta movilidad en general del N, P, K, Ni, Mg, S y Cl se presentan aquí escasas discusiones acerca de las variaciones específicas de las especies o de las relaciones entre re-movilización y fenología. El N, K, P, S, Mg, Ni, Cl y B (en las especies productoras de polioles) son muy móviles en el floema con el transporte impulsado principalmente por relaciones 'fuente': 'destino' y por la senescencia de los tejidos. Los

Tabla 4.4. Comparación entre las concentraciones de solutos orgánicos e inorgánicos en el floema (incisión en tallo, pH 7,9-8,0) y en el xilema (traqueal, pH 5.6 a 5.9) en exudados de *Nicotiana glauca* (Marschner, 2012).

	Floema	Xilema (mg L ⁻¹)	Relación floema/xilema
Materia seca	170-196	1.1-1.2	155-163
Sucrosa	155-168	nd	
(μg mL ⁻¹)			
Amino compuestos	10,808	283	38.2
Nitrato	nd ¹	na ²	
Ammonio	45.3	9.7	4.7
K	3,673.0	204.3	18.0
P	434.6	68.1	6.4
Cl	486.4	63.8	7.6
S	138.9	43.3	3.2
Ca	83.3	189.2	0.44
Mg	104.3	33.8	3.1
Na	116.3	46.2	2.5
Fe	9.4	0.60	15.7
Zn	15.9	1.47	10.8
Mn	0.87	0.23	3.8
Cu	1.20	0.11	10.9

De Hocking, 1980b.

¹nd: no detectable²na: no disponible

nutrientes móviles en el floema frecuentemente siguen un camino tortuoso a través de las hojas (Figura 4.6) y son movilizados preferentemente desde las hojas hacia los frutos a través del floema en lugar de proceder directamente a los tejidos y frutas de ‘destino’ por la corriente de transpiración (Jeschke y Hartung, 2000).

La movilidad en el floema puede llegar a ser particularmente alta durante el llenado de granos en las plantas anuales ya que la mayoría de los nutrientes se mueven por re-translocación desde las hojas hacia las semillas (Neumann, 1982). El alcance de la re-movilización es altamente específico del elemento considerado (Tabla 4.5) con un gran porcentaje del contenido final del nutrientes en el grano derivado de los nutrientes re-movilizados desde las hojas y no de “nueva” absorción (Marschner, 2012). En muchas especies las necesidades de N de los granos durante el llenado exceden la capacidad de suministro desde las raíces y resulta un déficit de N que desencadena el catabolismo

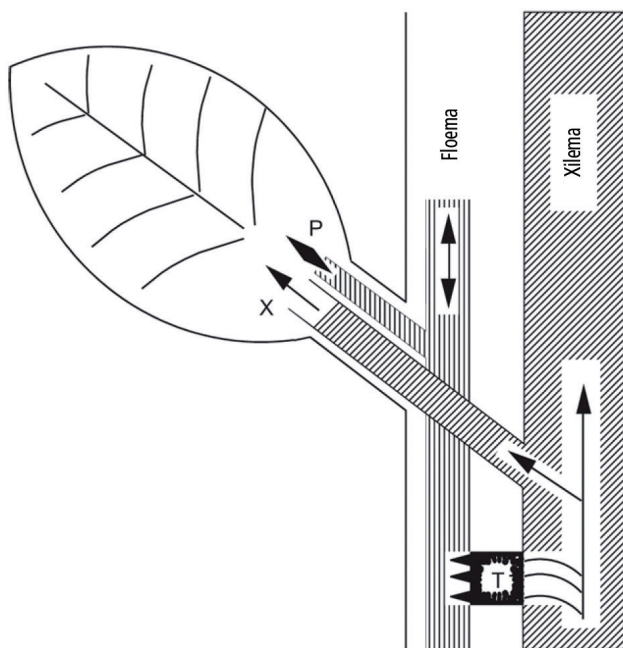


Figura 4.6. Diagrama esquemático del transporte de larga distancia en el xilema (X) y en el floema (P) en un tallo conectado a una hoja; y la transferencia de xilema al floema mediada por una célula de transferencia (T) (Marschner, 2012).

(descomposición de proteínas de las hojas) y la transferencia del N resultante y otros nutrientes a las semillas. El catabolismo de las proteínas foliares también tiene un efecto positivo en la disponibilidad de Cu y de Zn para re-movilizarlos a los tejidos reproductivos (Hill *et al.*, 1979b; Kutman *et al.*, 2011).

Los factores que influyen en la relativa re-movilización de los elementos poco móviles en el floema tienen gran importancia en los estudios de eficacia de aplicaciones foliares.

Calcio. Es generalmente inmóvil en el floema como consecuencia de su baja concentración en el citoplasma y en el floema, entre 0.1 a 10 μM (White y Broadley, 2003), así como el impacto negativo del Ca en la formación de callosa en los vasos del floema y posterior taponado (Marschner, 2012). El fosfato es el principal anión en la savia del floema y la translocación de cationes tales como el Ca^{2+} , que forman fosfatos de baja solubilidad, están limitados en los vasos cribosos por el producto de solubilidad de las sales de fosfato. Muchos trastornos fisiológicos de frutos están asociados con los bajos niveles de Ca y debido a su inmovilidad en el floema, el Ca aplicado al follaje no vuelve a redistribuirse desde las hojas pulverizadas hacia los frutos (Swietlik y Faust, 1984). Debido a la importancia del Ca en la calidad de almacenamiento de frutas y vegetales, y como consecuencia de la prevalencia de los trastornos de deficiencia de Ca, ha habido un considerable esfuerzo de investigación en métodos para mejorar el contenido de Ca

Tabla 4.5. Re-mobilización de nutrientes en un cultivo de guisantes entre la floración y la madurez (Marschner, 2012).

	N	P	K	Mg	Ca
Contenido en tallos y hojas (kg ha ⁻¹)					
Cosecha					
8 de Junio (floración)	64	7	53	5	31
22 de Junio	87	10	66	8	60
1 de Julio	60	7	61	8	69
12 de Julio (madurez)	32	3	46	9	76
Aumento o disminución después del 22 de Junio (%)					
	-63	-73	-30	+10	+21
En las semillas (granos) (% del contenido total en parte aérea)					
	76	82	29	26	4

Basado en Garz, 1966.

en los frutos (White *et al.*, 2010; Koutinas *et al.*, 2010; Kraemer *et al.*, 2009b; Lotze *et al.*, 2008; Neilsen *et al.*, 2005a; Peryea *et al.*, 2007; Val y Fernández, 2011). Las evidencias del muy bajo grado en que se re moviliza el Ca desde hojas pulverizadas hacia los frutos están proporcionadas en numerosas publicaciones y en general se acepta que se requieren múltiples pulverizaciones, así como aplicaciones simultáneas de Ca a las hojas, tallos y frutos. Las pulverizaciones de principio de la estación parecen ser más efectivos que realizada a fines de temporada (Lotze *et al.*, 2008; Peryea *et al.*, 2007), probablemente como consecuencia de las diferentes características de las hojas, o los beneficios de la aplicación por pulverización directa a los frutos jóvenes, o porque proporciona tiempo disponible para múltiples aplicaciones. Aunque las evidencias sugieren que la elección de la formulación Ca puede afectar la cantidad de Ca en el fruto, no está claro si esto es el resultado de una mayor absorción de un mejor transporte (Lotze *et al.*, 2008; Rosen *et al.*, 2006).

Hierro. En general al hierro se lo considera un nutriente intermedio por su movilidad en plantas superiores y puede volverse a translocar en pequeñas cantidades desde hojas maduras hacia las más jóvenes (Abadia *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2006; Fernández *et al.*, 2009). Una concentración típica de Fe en el floema es de 9.4 mg ml⁻¹, que es demasiado baja para abastecer la demanda de la planta (Hocking, 1980); el pH de la floema es aproximadamente 7.8-8.0 lo que favorece la insolubilidad del Fe³⁺ (Mass *et al.*, 1988). Esto sugiere que deben existir mecanismos para cargar activamente el floema y que el Fe debe estar presentes en una forma compleja (Palmer y Guerinot, 2009; Waters y Sankaran, 2011; White y Broadley, 2009). El grado de movilidad del Fe varía claramente con las especies, la etapa de crecimiento de la planta y el suministro de Fe, entre otros factores (Garnett y Graham, 2005; Shi *et al.*, 2011). Garnett y Graham (2005) observaron

niveles muy altos de re-movilización de Fe y de Cu, y niveles moderados de Mn y de Zn, durante la senescencia de plantas y llenado de granos en trigo. Estos resultados contrastan con estudios de campo en donde se observó muy poca re-movilización de Fe o de Mn (Hocking, 1994; Pearson y Rengel, 1994). Ejemplos de movilidad limitada de aplicación foliar de Fe hacia nuevas hojas en expansión, tanto en plantas herbáceas como en cítricos, es función de varios factores, pero el más importante es la fuente específica de Fe (Abadia, 1992; Abadia *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2009). En este sentido, algunos estudios han sugerido una mejor translocación en la planta de quelatos comparado con sales inorgánicas de Fe (Basiouny y Biggs, 1976; Basiouny *et al.*, 1970; Fernández y Ebert, 2005; Fernández *et al.*, 2009).

Zinc. El zinc es con frecuencia más móvil que el Mn o el Fe en la mayoría de las especies (Nowack *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010) y Swietlik (2002). Longnecker y Robson (1993) sugirieron que el movimiento de Zn desde las hojas maduras coincide con su senescencia. También se ha confirmado la re-movilización del Zn desde la hoja bandera al grano de trigo (Herren y Feller, 1994). En trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*) el Zn total de hojas y pecíolos disminuyó a medida que las estructuras reproductoras acumulaban Zn (Riceman y Jones, 1958; Riceman y Jones, 1960). Aplicaciones de fertilizantes con ^{65}Zn marcado a naranjo 'Pera' demostraron que luego de 120 días el 14% del total de Zn absorbido se transloca desde las hojas adonde se aplicó hacia otras partes de la planta (Sartori *et al.*, 2008). En cambio, en otros estudios que utilizaron especies de cítricos (Swietlik y Laduke, 1991) e isótopos de ^{65}Zn , se encontró evidencia limitada o nula del movimiento de Zn desde hojas pulverizadas.

Estos resultados sugieren que la re-movilización significativa de Zn puede ocurrir en algunas especies durante el crecimiento normal y en muchas especies durante la senescencia. El rango de concentraciones de zinc en la savia del floema es de 3-170 μM (White y Broadley, 2009) y bajo condiciones de suministro normal sólo una pequeña porción del Zn pueden suministrarse por el floema. Si bien la re-movilización de Zn en el floema parece ser posible, la cantidad parece estar limitada a aproximadamente entre el 5 y el 20% según los experimentos reportados. La muy escasa re-translocación de Zn observada luego de las aplicaciones foliares puede atribuirse tanto a la escasa penetración o a la alta capacidad de unión del Zn a los tejidos foliares (Zhang y Brown, 1999a), pero ello no implica que la movilidad en el floema fuera limitada (Figura 4.7).

Manganeso. Se lo considera que tiene baja movilidad en general en la mayoría de las especies, pero puede estar influido por la disponibilidad en el medio de crecimiento (Brown y Bassil, 2011). Los primeros estudios concluyeron que el Mn tiene movilidad intermedia, con menor movilidad que el P pero más movilidad que el Ca. La evidencia experimental aportada por Romney y Toth (1954) mostró que ^{54}Mn radiactivo puede ser parcialmente translocado desde las hojas cuando se aplica por vía foliar. Además, Nable y Loneragan (1984) utilizando el isótopo ^{54}Mn , demostraron que éste se mantuvo en los cotiledones con escaso o nada de Mn exportado desde éstos hacia las hojas maduras además de limitada re-movilización o re-translocación de Mn desde las hojas maduras. Pulverizaciones foliares de MnSO_4 aplicados por Swietlik y Laduke (1991)



Figura 4.7. El Zinc es altamente inmóvil en arboles de pistacho. El lado derecho de este árbol recibió fertilizante foliar a razón de 10 kg ZnSO_4 por cada 500 litros aplicados hasta gotear en septiembre (al finalizar la cosecha) con un pulverizador manual cada año durante cinco años. La mitad izquierda del árbol no recibió aplicaciones foliares. Las aplicaciones repetidas de Zn corrigieron efectivamente (pero de forma ineficiente) la deficiencia en el lado derecho pulverizado. Sin embargo, no hubo ningún beneficio significativo de las aplicaciones de Zn notado en el lado izquierdo sin pulverizar (Cortesía de Kiyoto Uriu).

durante cuatro años en naranja ‘Valencia’ (*Citrus sinensis* Osbeck) y pomelo ‘Ruby Red’ (*Citrus paradisi* Macf.) resultaron en un muy pequeño pero medible aumento de 2 a 5 ppm de Mn en las hojas nuevas. Hocking *et al.* (1977) informaron de la variable acumulación de Mn entre distintas especies de lupino, con concentraciones en *Lupinus albus* L. consistentemente mayores a las de *Lupinus angustifolium* L., y además que las diferencias se expresaron en relación a la cual la especie moviliza el Mn desde las vainas hacia las semillas. Los contenidos de Mn en trigo aumentaron a lo largo de la vida total de la hoja, ni siquiera disminuyendo durante la senescencia (CF y Graham, 1995; Pearson y Rengel, 1994; Pearson *et al.*, 1995). Everett y Thrane (1992) también informaron que la movilización de Mn a partir de las hojas es limitada, y se evidencia por el aumento con el tiempo de la cantidad de Mn en las agujas de piñón (*Pinus monophylla*). Sin embargo, hay pruebas que sugieren que el Mn es móvil en el floema de *Ricinus communis* (Van Goor y Wiersma, 1976).

Molibdeno. Presenta una alta movilidad en el floema en soja, arroz y frijol (Brown y Bassil, 2011; Kannan, 1986), pero menor movilidad en muchas otras especies (Masi y Boselli, 2011; Williams *et al.*, 2004). Bukovac y Wittwer (1957) informó de que el Mo tiene movilidad intermedia y observó que en plantas con suficiente Mo no había re-movilización desde las hojas durante la floración y llenado de vainas; mientras que

en plantas carentes de Mo, su contenido aumentaba o permanecía constante en las hojas, sugiriendo que hubo poca o ninguna re-movilización (Jongruaysup *et al.*, 1994; Jongruaysup *et al.*, 1997).

Boro. Es un elemento único en el que la movilidad del B en el floema es fuertemente dependiente de la especie vegetal (Brown y Bassil, 2011; Brown y Shelp, 1997). En la mayoría de las especies, en gran medida el B se transporta por el xilema y muestra una marcada inmovilidad una vez que se deposita en la hoja. Se sugiere que esta inmovilidad es ya sea la consecuencia de la incompatibilidad del B con el floema o por quedar atrapado por un poluto, en donde la alta movilidad trans-membrana del B favorece el movimiento reverso del B desde el floema a la corriente del xilema con menos concentración de B (para la discusión véase Brown y Bassil, 2011; Brown *et al.*, 2002; Brown y Shelp, 1997). La limitada movilidad en el floema puede ocurrir en ciertas especies bajo condiciones de bajo suministro de B (Huang *et al.*, 2008; Shelp *et al.*, 1996; Stangoulis *et al.*, 2001; Stangoulis *et al.*, 2010), sugiriendo quizás que la deficiencia inducida de los transportadores están reguladas.

En contraste con la mayoría de las plantas, la re-movilización del B desde hojas maduras puede ocurrir fácilmente en especies que transportan principalmente polioles (alcoholes de azúcar). Desde hace tiempo se sabe que las aplicaciones foliares de B son un medio eficaz para mejorar la concentración de B en yemas y flores resultando en una mayor cuaje de frutos consecuentemente un mayor producción y rendimiento en especies de *Malus*, *Prunus*, *Olea*, *Coffea* y *Pyrus*. Usando ^{10}B , Brown y Hu (1996) demostró que la re-movilización de B puede ocurrir cuando el B forma ésteres con un alcohol de azúcar (por ejemplo sorbitol, manitol o dulcitol) que son estables cuando la relación entre el alcohol de azúcar y el B excede 100:1. Las plantas donde el B es móvil son mucho menos susceptibles a la escasez transitoria de B dado que cuando éste se aplica vía pulverización foliar puede ser re-movilizado y pasar a los tejidos no tratados. El principio de que la movilidad en el floema afecta la susceptibilidad a la deficiencia y mejora la respuesta de la planta a los fertilizantes foliares es igualmente relevante para todos los elementos.

La inmovilidad en el floema aumenta la susceptibilidad al retiro de los nutrientes en el corto plazo, pero puede corregirse con la fertilización foliar. Un tipo de tabaco rústico, donde el B es inmóvil, y una variedad transgénica de esta especie que tiene un gen que induce la movilidad del B en el floema, fueron cultivados en soluciones nutritivas que contenían adecuado nivel de B durante 38 días (Figura 4.8). El B en el medio de enraizamiento se eliminó el día 39^{avo} y se suministró diariamente 250 ppm de B con pulverizaciones foliares a la hoja madura más antigua de ambos cultivares. Dentro de las 24 horas desde la remoción de B del medio de cultivo las plantas de tabaco de tipo salvaje exhibieron rápidamente síntomas de deficiencia de B incluyendo aborto de flores, inhibición de la elongación de los brotes y clorosis (Figura 4.8a). En tanto la variedad de tabaco transgénico, en el que el B es móvil, no presentó deficiencia de B, debido a la mayor capacidad de translocar B desde los tejidos más antiguos a los más jóvenes (Figura 4.8b) (Brown *et al.*, 1999a).

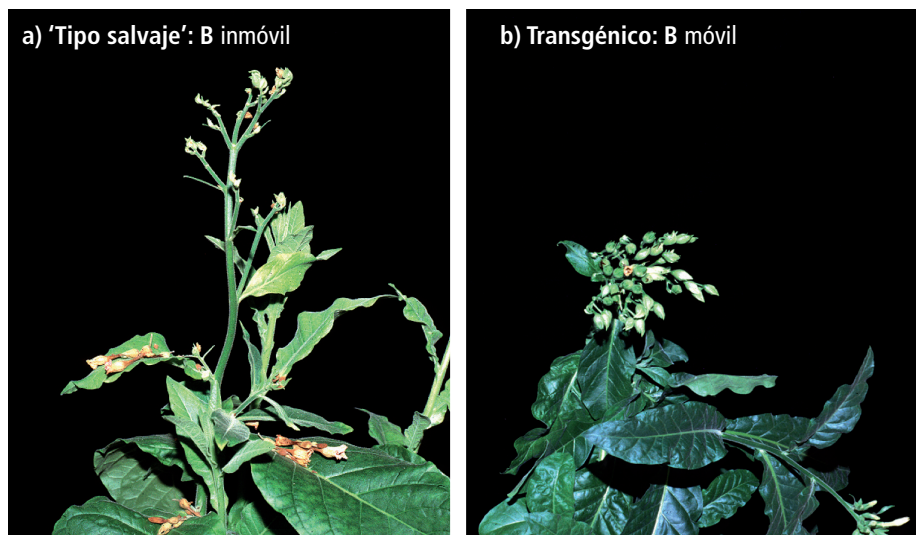


Figura 4.8. El boro es inmóvil en el cultivar natural de tabaco 'Tipo salvaje' (a) y altamente móvil en el cultivar transgénico (b) que tiene un gen insertado para la producción de sorbitol (Brown *et al.*, 1999). Las plantas se cultivaron por 45 días con boro suficiente y luego transferidos a un medio libre de boro por 72 horas. Luego de 72 horas, se observaron significativos síntomas de deficiencia de boro, incluyendo abscisión de flores en los cultivares de tipo salvaje pero no los transgénicos. La movilidad del boro en el floema de la especie transgénica previno la ocurrencia de la deficiencia al permitir la re-utilización del B previamente adquirido.

A valores normales de pH el B está presente como una molécula de borato (H_3BO_3) sin carga de bajo peso molecular, con una permeabilidad relativamente alta de la cutícula y de la membrana que se absorbe fácilmente por las hojas (Picchioni y Weinbaum, 1995). Por lo tanto todas las especies muestran una rápida absorción de B en el órgano pulverizado. Sin embargo, en especies que transportan polioles, las aplicaciones foliares de B también se transportan rápidamente fuera de la hoja en la corriente del floema y se mueven hacia los tejidos 'destino' incluyendo las raíces, hojas jóvenes en expansión, órganos reproductivos y frutos, demostrando así la relevancia de la movilidad en el floema en la respuesta del cultivo a la fertilización foliar.

La movilidad en el floema tiene un efecto muy importante sobre la capacidad de las plantas para absorber, trasladar y beneficiarse de los fertilizantes foliares y por lo tanto tiene un papel importante en la determinación de su eficacia.

Nutrientes inmóviles por el floema:

- La aplicación foliar de nutrientes inmóviles por el floema sólo benefician a los tejidos que reciben directamente la aplicación foliar.
- La evaluación del estado nutricional en hojas pulverizadas puede ser problemática debido a la presencia de residuos de nutrientes no absorbidos por la superficie de las hojas.
- Si bien el desarrollo de formulaciones de nutrientes foliares con mayor movilidad es un esfuerzo que vale la pena, maximizar la eficacia de estos materiales en los tejidos pulverizados es una necesidad más inmediata.

Nutrientes móviles por el floema:

- La aplicación foliar de nutrientes móviles tiene el potencial de un beneficio sistémico y de largo plazo.
- Las limitaciones a la cantidad de nutrientes que se pueden aplicar y la rápida dilución de los nutrientes aplicados desde su movilización dentro de la planta reducen el beneficio potencial de aplicaciones foliares de nutrientes móviles en el floema.
- Por lo tanto, la medición del impacto y beneficio de los nutrientes móviles por el floema aplicados por vía foliar, es complicado por su movilidad y la dilución dentro de la planta.

Para ambos nutrientes, móviles e inmóviles, el papel más relevante de las pulverizaciones foliares es prevenir las deficiencias inmediatas y transitorias que no se pueden solucionar con rapidez con las aplicaciones al suelo.

4.7. Conclusiones

Este capítulo ha puesto de relieve las complejas interacciones entre el medio ambiente, las especies vegetales, sus etapa de crecimiento y las condiciones y el momento de aplicación en la eficacia de los fertilizantes foliares. Aunque hay muy pocas “reglas” específicas que se pueden aplicar a cada situación específica, una comprensión de los principios generales que afectan a la fertilización foliar ayudará a tomar decisiones más informadas.

Certezas

- Las especies difieren notablemente en sus características de las superficies de las hojas, y actualmente es imposible predecir la respuesta del cultivo a una formulación determinada.
- El medio ambiente afecta todos los aspectos de la fertilización foliar; desde las reacciones físicas y químicas de los materiales pulverizados; la arquitectura de la

planta; la composición cuticular de la hoja; y el destino de los nutrientes una vez que entran a la planta.

- La fenología de la planta también tiene un gran efecto sobre la composición cuticular de la hoja y por lo tanto la eficacia de la fertilización foliar.
- La movilidad en el floema tiene un profundo efecto en la manera en que los nutrientes foliares son utilizados por las plantas tratadas.

Incertidumbres

- El conocimiento actual de los factores que determinan la composición cuticular de la planta y la respuesta a la aplicación foliar es insuficiente para predecir o manipular la respuesta de la planta a una aplicación foliar.
- Es una incógnita si los nutrientes aplicados por vía foliar, una vez que entran al espacio celular, están más o menos “disponibles” o móviles, que los adquiridos desde el suelo.

Oportunidades

- El mejor entendimiento de los principios que gobiernan el movimiento de los nutrientes aplicados por vía foliar a través de la cutícula a los espacios celulares de la hoja viviente es esencial para el desarrollo de formulaciones de fertilizantes foliares y su práctica.

5. Años de práctica – aprendiendo del campo

La experiencia adquirida en muchos años de aplicaciones realizadas por productores agrícolas, así como la investigación y muchos ensayos bajo ambiente controlado y de campo han producido una gran cantidad de valiosos pero muchas veces confusos datos e informaciones sobre el comportamiento y eficacia de los fertilizantes foliares. Este capítulo no pretende ser una revisión exhaustiva de los ensayos de campo de los fertilizantes foliares ya que la mayoría de estos ensayos, no intentan explicar sus resultados en término de principios, sean físicos, químicos o biológico, ni pueden ser extrapolados fácilmente más allá del contexto específico del cultivo, ubicación y metodología utilizados en un ensayo en particular. El aprovechamiento de la información de los ensayos de campo exige una buena comprensión de los principios subyacentes como se describieron en los capítulos anteriores. Este capítulo se basa en experiencias de campo e integrará los principios conocidos y establecidos para resaltar la complejidad y las brechas de conocimiento sobre el uso de fertilizantes foliares en la agricultura moderna.

5.1. Tecnología de aplicación por pulverización

Gran parte de nuestra comprensión actual acerca de las técnicas de aplicación de pulverizaciones está basada en la experiencia adquirida con productos fitosanitarios, tales como herbicidas, insecticidas o fungicidas, y hay más bien escasa información específica disponible sobre las pulverizaciones de nutrientes por vía foliar. La información proporcionada a continuación ha sido obtenida a partir de estudios de tecnologías de aplicaciones por pulverización que pueden aplicarse en general a la realización de aplicaciones de fertilizantes foliares.

La técnica de aplicación por pulverización es un proceso clave que influyen en la eficacia de un fertilizante foliar. El proceso de aplicación es complejo e implica: la formulación de un ingrediente activo; la atomización de la solución de pulverización; el transporte de la pulverización a la superficie de la planta de destino y el impacto de la gotita; el desparramado y la retención sobre la superficie de la hoja; la formación de residuos y la penetración dentro de la hoja (Brazee *et al.*, 2004). La aplicación de un tratamiento foliar implica que el líquido pase a través de un sistema de pulverización para producir gotitas, de las que comúnmente hay diferentes tipos de boquillas de presión (Butler Ellis *et al.*, 1997). La pulverización es inherentemente ineficiente ya que no todas las gotas del líquido llegan a la planta destino debido a pérdidas relacionadas con los siguientes factores, entre otros, el rebote de las gotitas, el escurrimiento, la

deriva de la pulverización y la evaporación en el aire (Leaper y Holloway, 2002; Shaw *et al.*, 1997, Wang y Liu, 2007).

- La técnica de la pulverización en la agricultura influye mucho en la eficiencia de la aplicación foliar de nutrientes.
- La deriva de la niebla de aplicación es un problema común asociado con la aplicación foliar.

Las características de las boquillas de pulverización son criterios importantes para las fertilizaciones foliares debido a su efecto final sobre la eficiencia del proceso de aplicación. El tamaño y la velocidad de las gotas afectan la estructura de la solución depositada por la pulverización, así como la deriva de las gotitas (Nuyttens *et al.*, 2009; Taylor *et al.*, 2004). Por otra parte, el tamaño de las gotitas puede influir en la eficacia biológica de la formulación aplicada así como también los riesgos ambientales asociados con el tratamiento. Por lo tanto, la combinación ideal de tipo de boquilla y presión de aplicación maximizará la eficiencia de la fertilización depositando la solución a la dosis adecuada en la planta de destino, reduciendo al mínimo las pérdidas por fuera del objetivo debido a la deriva, e igualmente importante, evitando también la exposición del usuario a la pulverización de deriva (Nuyttens *et al.*, 2007).

Las boquillas de pulverización pueden dispensar gotas de diferentes tamaños dependiendo del tamaño del orificio, la forma de la boquilla y la presión utilizada (van de Zande *et al.*, 2008a). En los últimos años se han introducido sistemas de clasificación de la calidad de pulverización distinguiendo la distribución de tamaño de las gotas como finas, medianas o gruesas, como medio para predecir el potencial de deriva de una pulverización, la que es materia de creciente preocupación ambiental, en particular para el caso de agroquímicos fitosanitarios (Hewitt, 2008; van de Zande *et al.*, 2008b). Esta clasificación de los aerosoles basados en el tamaño de gota ha permitido la identificación de las boquillas en relación con su eficacia y la posibilidad de deriva (van de Zande *et al.*, 2008a; Van de Zande *et al.*, 2008b).

La deriva de una pulverización se define como la cantidad de niebla de aplicación foliar que se desvía por fuera de la zona tratada por corrientes de aire al momento de la aplicación. La deriva de la pulverización está afectada por cuatro factores principales: las condiciones climáticas; la técnica de aplicación; las características del ambiente circundante; y las propiedades físico-químicas del líquido de pulverización (De Schamphelre *et al.*, 2008). El tamaño de gota está determinado por la interacción entre la técnica de pulverización (presión de pulverización y selección de la boquilla) y las propiedades físico-químicas del líquido de pulverización (De Schamphelre *et al.*, 2008).

Se han implementado métodos para limitar la deriva de la pulverización utilizando equipos que reducen la deriva de las gotitas muy finas o cambiando la distribución del tamaño de las gotitas de pulverización (Jensen *et al.*, 2001). Hoy en día, hay un creciente interés en la estandarización de los protocolos para evaluar la eficacia de las tecnologías de reducción de deriva de las pulverizaciones como un medio de minimizar

la posibilidad de contaminación ambiental por agroquímicos (Donkersley y Nuyttens 2011; Khan *et al.*, 2011).

Además de las propiedades de las boquillas y de la solución, las características de la canopia de la planta, como se describe en el capítulo 4, también afectará las tasas de retención, de difusión, de humectación y de absorción de las pulverizaciones de nutrientes foliares. Si las hojas están mojadas por la lluvia o el rocío, antes de la aplicación de nutrientes foliares, la tasa de retención puede disminuir (Zabkiewicz, 2002). La eficacia de la pulverización con frecuencia depende de un tamaño de gota que logre una mejor cobertura, la que se consigue por gotitas pequeñas que son más probables de ser retenidas por la superficie de las hojas, pero que a la vez son igualmente más propensas a la deriva (Butler Ellis *et al.*, 1997; Tuck *et al.*, 1997).

Es difícil el desarrollo de modelos que predicen el tamaño de las gotas y el rendimiento de una pulverización en condiciones de campo debido a los numerosos factores involucrados y por la compleja naturaleza de las mezclas de agroquímicos empleados en las pulverizaciones (Liu, 2004; Miller y Butler Ellis, 2000; Steiner *et al.*, 2006).

En las últimas décadas se han desarrollado tecnologías de pulverización electrostática para aplicaciones agrícolas (Law, 2001), las que tienen un gran potencial para mejorar el rendimiento de los productos fitosanitarios de aplicación foliar, pero aún no han sido totalmente probados en aplicaciones foliares de nutrientes. El tamaño de gota es muy reducido con esta tecnología lo que si bien da a éste una mejor cobertura vegetal también aumenta el riesgo de deriva de la pulverización, así como la evaporación de gotitas finas de la superficie de la planta, en especial en climas áridos y semiáridos. Además, para asegurar que la superficie de la planta se humedezca apropiadamente, una necesidad para la absorción de los nutrientes aplicados por vía foliar, se requiere que el tiempo de aplicación sea más largo. Esto contrasta con los dispositivos convencionales de pulverización que entregan una pulverización con gotas más grandes, representando un mayor volumen de líquido que se deposita mojando la superficie de la planta.

5.2. Formulaciones foliares tecnología de aplicación

Las pulverizadores de nutrientes foliares con frecuencia se aplican mezclándolos en el tanque del pulverizador con adyuvantes y/o agroquímicos compatibles según las recomendaciones y especificaciones de fabricantes de productos relevantes. El comportamiento de los fertilizantes foliares en combinación con algunos adyuvantes y/o productos fitosanitarios puede diferir cuando los nutrientes se aplican pulverizados solos. Actualmente, no hay forma de predecir teóricamente la eficacia relativa de las mezclas de nutrientes/adyuvante/agroquímicos de aplicación foliar. La importancia de las formulaciones de nutrientes foliares con adyuvantes ha sido descrita en detalle en el capítulo 3.

Las propiedades físico-químicas de la formulación de pulverización también puede influir en el proceso de aplicación y en el riesgo de deriva (De Schamphelaire *et al.*, 2008). Por lo tanto cambiar las propiedades de la solución de pulverización mediante el agregado de adyuvantes pueden influir en los mecanismos de formación

de la pulverización y en el comportamiento de las gotitas sobre la superficie de la hoja (Miller y Butler Ellis, 2000). Ciertos aditivos en la formulación pueden inducir cambios significativos en la calidad de la pulverización con efectos sobre el tamaño de las gotitas, su estructura y velocidad (Butler Ellis *et al.*, 1997). El aumento de la viscosidad del líquido disminuye la deriva de la pulverización a través de la formación de gotas más grandes (De Schamphelre *et al.*, 2008). Por otra parte no está totalmente comprendida la relación entre formulaciones que tienen menor tensión superficial, tamaño de las gotas e intensidad de la deriva (De Schamphelre *et al.*, 2008).

5.3. Justificación biológica del uso de fertilizantes foliares

El uso de fertilizantes foliares para superar limitantes físicas y químicas del suelo, o de accesibilidad, se conoce y hay muchos ejemplos de su aplicación. Sin embargo, ha recibido poca atención el uso de fertilizantes foliares para apuntar a demandas específicas para prevenir o evitar las deficiencias que se producen como resultado de desajustes fenológico dependientes entre la demanda de la planta y la oferta de minerales del suelo, las que en adelante referiremos como ‘deficiencia transitoria’. En general es verdad que los fertilizantes foliares son más caros por unidad de nutriente en comparación con cantidades equivalentes de fertilizantes aplicados al suelo, ya que los nutrientes de aplicación foliar proporcionan una respuesta de calidad, especificidad y rapidez que no puede ser equivalente a la que se obtiene con aplicaciones al suelo. Aunque hay muy pocos trabajos de investigación publicados que hayan identificado claramente el desarrollo de una deficiencia crítica pero transitoria de nutrientes que pueda corregirse mejor a través de la fertilización foliar, hay una clara justificación científica así como experiencia considerable de campo a nivel mundial como para sugerir que este fenómeno es de importancia agronómica. A continuación, se abordará la relación entre la etapa de crecimiento de las plantas y respuestas de éstas a las aplicaciones de fertilizantes foliares a través de un análisis integrado de la experiencia de investigación de campo y de los principios biológicos ya establecidos.

5.3.1. Rol de la fenología de los cultivos y del ambiente en la respuesta de las plantas

Una significativa justificación comercial del uso de fertilizantes foliares se basa en la premisa que ofrecen ventajas específicas sobre los fertilizantes de suelo en determinadas etapas fenológicas de ciertos cultivos, cuando la demanda de nutrientes es alta y coincide con una inadecuada oferta desde el suelo o pobre transporte de nutrientes esenciales dentro de la planta. Entre los buenos ejemplos se incluyen los períodos de rápido crecimiento de los frutos o de llenado de grano; el crecimiento inicial de primavera en especies de hoja caduca cuando el crecimiento de los brotes se produce antes de la adecuada absorción de nutrientes por las raíces; o bien durante el rápido crecimiento de las plántulas cuando la temperatura ambiente es favorable para el crecimiento, pero la baja temperatura del suelo limita la absorción de nutrientes. La inmovilidad de

nutrientes también puede resultar en deficiencias inducidas, que se producen incluso en suelos fértiles, cuando la demanda localizada de los tejidos de la planta supera la capacidad de re-distribución de nutrientes dentro de la planta.

El efecto de la fenología del cultivo en respuesta a la fertilización foliar es complejo y relacionado con efectos tanto físicos como biológicos. Los efectos físicos incluyen cambios en la estructura y la composición de la hoja que puede alterar la penetración y la posterior utilización de los nutrientes foliares; así como cambios en el tamaño y arquitectura de la canopia que influyen directamente en la superficie disponible para interceptar la pulverización foliar.

Los efectos biológicos son:

- Durante la floración y la fructificación en especies de hoja caduca con aumentos en la demanda de elementos específicos que participan en las funciones críticas de la planta, por ejemplo, B o Cu para el desarrollo y crecimiento del polen;
- Restricción en la absorción o el transporte de nutrientes del suelo debido a la senescencia, por ejemplo disminución en la absorción de N luego del cuaje de granos en los cereales;
- La demanda de las partes aéreas que ocurre antes del desarrollo radicular, por ejemplo, la floración y desarrollo de frutos en especies de hoja caduca o bajo condiciones desfavorables para las raíces, como ser, suelos fríos o saturados durante la primavera;
- Disminución en el crecimiento y actividad de las raíces debido a la competencia por los carbohidratos y metabolitos entre brotes y raíces, por ejemplo, durante el crecimiento de los frutos;
- Limitaciones de distribución o de transporte dentro de la planta de nutrientes esenciales hacia órganos críticos de plantas frutales por ejemplo, entrega de Ca a frutos de manzano.

En los siguientes párrafos se mostrarán ejemplos elegidos donde determinados factores ambientales y fenológicos contribuyen a la eficacia de fertilizantes foliares.

5.3.2. Influencia del ambiente en la eficacia de las aplicaciones foliares durante la primavera

Con frecuencia el clima y el ambiente edáfico limitan la disponibilidad y la absorción de nutrientes desde el suelo. Si estas limitaciones coinciden con los períodos críticos de demanda de nutrientes la aplicación de fertilizantes foliares puede ser beneficioso y así la fenología de la planta al momento de la limitación ambiental es fundamental para determinar la necesidad de una fertilización foliar. Por ejemplo, condiciones climáticas desfavorables durante el desarrollo reproductivo puede ser económicamente devastador, mientras que las mismas condiciones desfavorables durante las etapas vegetativas pueden tener poco efecto en la productividad, especialmente si con posterioridad un clima cálido más favorable permite a las plantas reponerse y compensarse.

Los ejemplos mejor documentados de este fenómeno provienen de frutales de hojas caducas donde la fertilización foliar en primavera es una práctica generalizada. En los

Tabla 5.1. Interacciones entre fenología de cultivos y el ambiente que pueden determinar la utilidad de la fertilización foliar a través de los procesos siguientes.

La capacidad de absorción de nutrientes desde el suelo por las raíces se limita como consecuencia del ambiente o de la senescencia.	Durante principios de la primavera cuando muchas especies de flores de hojas caducas y florecen y fructifican y temperaturas o regímenes de humedad del suelo son desfavorables para la absorción de nutrientes del suelo. Como consecuencia de la senescencia de la planta se limita la actividad de las raíces.
Los picos del período de crecimiento de los cultivos inducen una demanda superior a la oferta de nutrientes, incluso en suelos bien fertilizados.	La demanda de nutrientes para el rápido crecimiento de los frutos o llenado de grano puede exceder la capacidad de absorción incluso en suelos adecuadamente fertilizados. La competencia entre las raíces y los brotes durante los períodos de alta demanda puede reducir la entrega de carbohidratos a las raíces y restringir el crecimiento y metabolismo de éstas, reduciendo por lo tanto la adquisición de nutrientes.
La arquitectura de la planta y el desarrollo de órganos crean demanda local de nutrientes que excede la capacidad de transporte de nutrientes dentro de la planta.	Las limitaciones en el transporte de los elementos inmóviles en el floema a órganos carnosos con inadecuada conectividad vascular o con baja transpiración por ejemplo, deficiencias de B o Ca en frutas y órganos carnosos y deficiencias de B, Cu, Fe y n en las estructuras reproductivas. Agotamiento de nutrientes debido al rápido retiro de elementos móviles en hojas adyacentes a los grandes órganos reproductivos de rápido crecimiento.

climas mediterráneos y más fríos, una primavera inusualmente fría y lluviosa puede provocar anegamiento y anoxia radicular (bajo nivel de oxígeno del suelo) que reducirán la absorción de nutrientes (Drew, 1988; Leyshon y Sheard, 1974; Robertson *et al.*, 2009) que puede ser parcialmente mitigada por pulverización de nutrientes foliares (Pang *et al.*, 2007). Dong *et al.* (2001) y Hogue y Neilsen (1986) observaron que translocación de nutrientes desde las raíces de manzanos era restringido por las bajas temperaturas en la zona radicular durante la antesis. La ocurrencia de primaveras frías y húmedas antes de la aparición de condiciones cálidas que favorecen el crecimiento de rápido de los brotes y la floración, puede resultar en una condición descrita como “fiebre de primavera”, que en general se cree que es causada por deficiencias transitorias de los elementos inmóviles como, B, Cu y Zn, que son críticos para la brotación, el desarrollo del tubo polínico, la floración y la expansión vegetativa. Se observa normalmente que las plantas ‘salen’ de la deficiencia una vez que las condiciones mejoran, aunque es posible que ocurran pérdidas considerables de rendimiento, sobre todo en especies en floración que hayan reducido su cuaje de frutos al inicio de la temporada de crecimiento.

Si bien se requieren todos los nutrientes para el nuevo crecimiento, las deficiencias de B y Zn son especialmente críticas, a causa de su baja movilidad en la mayoría de las especies y sus funciones esenciales en el crecimiento vegetativo y reproductivo (Marschner, 2012).

El **boro** juega un papel importante en la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico (Chen *et al.*, 1998; De Wet *et al.*, 1989; Jackson, 1989; Nyomora *et al.*, 2000; Perica *et al.*, 2001 Rerkasem y Jamjod, 2004; Robbertse *et al.*, 1990; Schmucker, 1934) y las aplicaciones foliares de B aumentar la germinación del tubo polínico y cuajado en un número de especies de árboles frutales incluyendo almendros (*Prunus amygdalus* L.) (Nyomora *et al.*, 1999), perales (*Pyrus communis* L.) (Lee *et al.*, 2009), olivos (*Olea europaea* L.) (Perica *et al.* 2001), cerezos (*Prunus avium* L.) (Wojcik y Wojcik, 2006) y manzanos (*Malus domestica* Borkh) (Peryea *et al.* 2003).

La importancia de la fenología del cultivo en la respuesta al B se ilustra en una serie de experimentos reportados por Brown (2001) que demostraron que la aplicación foliar de B puede corregir deficiencias que no pudieron corregirse por aplicaciones al suelo (Tabla 5.2). Aplicaciones foliares de B a árboles adultos de pistacho (Tabla 5.3) y nogales (Figura 5.1) resultaron en un aumento significativo del cuaje y producción de frutos sólo cuando la aplicaciones se hicieron durante la última fase de dormancia (pistacho) o durante la fase temprana de expansión de las hojas (nogal) inmediatamente antes que se abran las flores (Brown, 2001). Las aplicaciones hechas en cualquier otro momento

Tabla 5.2. Influencia de la aplicación B en el rendimiento y en los contenidos de B en los brotes y las hojas de Julio en pistacho. Se aplicó B foliar en 1998 en las concentraciones especificadas; las aplicaciones al suelo se realizaron a mano durante un ciclo de riego en julio de 1997. El rendimiento y contenido de nutriente en los tejidos se determinó en 1998.

Aplicación Foliar (Feb 1998) (mg B L ⁻¹)	Rendimiento (kg pepitas arbol ⁻¹)	Brotes (mg B kg ⁻¹)	Hojas (Julio)
0	8.6	35	170
490	10.0 ¹	37	185
1225	11.8 ²	39	171
2450	9.5	41	210
Aplicación al Suelo (Agosto 1997) (g B arbol ⁻¹)			
12	8.6	35	172
23	8.6	38	189
35	9.1	44	201
47	9.5	50	219

¹ y ² indica diferencia significativamente mayor que el control al nivel de 0.05 y 0.01% respectivamente.

Tabla 5.3. Efecto de la fecha de aplicación de B foliar (1225 mg B L^{-1}) en el rendimiento y concentración de B en hojas de pistacho.

Fecha de aplicación	Fecha de aplicación	Rendimiento ¹ (kg)	B foliar en Julio (mg kg ⁻¹)
28-Febrero	Latencia tardía	64 ²	188
19-Marzo	Hinchazón brotes florales	52	188
3-Abril	Floración	54	187
17-Abril	Expansión de hojas	51	256 ²
8-Mayo	Follaje totalmente expandido	52	468 ²

¹Todos los rendimientos son en peso fresco de frutos por árbol.

² denota significativamente mayor que el control al nivel del 0.01%.

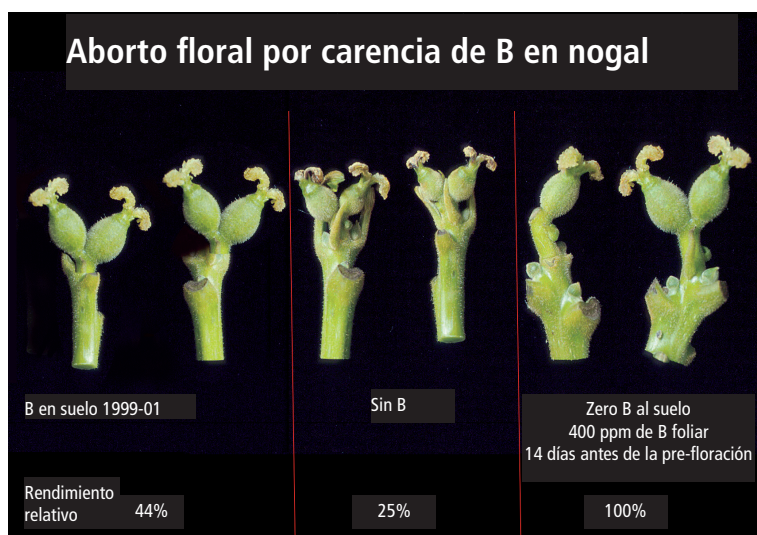


Figura 5.1. Efecto de la deficiencia de B en la reproducción del nogal (*Juglans regia*). Árboles de nogal fueron tratados con aplicaciones de B al suelo B (2 kg B ha^{-1}) a mediados del verano de 1999, 2000 y 2001. En un sub-conjunto de árboles, se realizaron aplicaciones foliares aplicando 400 ppm de B en la solución de pulverización final aplicada 14 días previos a la floración de los pistilos. Los árboles de control no recibieron aplicaciones de B foliares ni al suelo. Los rendimientos fueron: Control: 1280 kg ha^{-1} ; Aplicaciones de suelo: 2060 kg ha^{-1} ; Aplicación foliar: 4592 kg ha^{-1} (Brown *et al.*, 1999c).

del año, incluyendo las aplicaciones al suelo, no fueron eficaces para el aumento de rendimientos. El beneficio de la aplicación foliar se observó aún con valores altos de B foliar ($> 150 \text{ ppm B}$ en pistacho y $> 35 \text{ ppm}$ en nogal) y con independencia de la aplicación de B al suelo. Esto indica que un adecuado nivel de B en la estación anterior no

asegura que habrá un nivel óptimo de B en la floración y que la productividad del árbol puede verse afectada por deficiencias transitorias localizadas que responden muy bien a aplicaciones foliares en el momento adecuado. En la región donde estos experimentos se llevaron a cabo, con elevadas precipitaciones invernales y persistente nieblas húmeda el B puede haberse lixiviado de los botones florales facilitando la respuesta del cultivo a las aplicaciones foliares de pre-floración. No obstante las aplicaciones foliares de B tienen un papel único al mejorar el cuajado del racimo de frutas de pistacho muy probablemente por proporcionar B directamente a las estructuras reproductivas emergentes.

Respuestas similares a aplicaciones foliares B, inmediatamente antes de la floración, se observaron en olivo (Perica *et al.*, 2001), nogal (Brown *et al.*, 1999c; Keshavarz *et al.*, 2011) y almendro (Nyomora *et al.*, 1999). En almendro, sin embargo, el rendimiento se maximizó al aplicar B foliar ya sea en septiembre (post cosecha) o en febrero (floración inmediatamente anterior). La eficacia de las aplicaciones de B en post-cosecha en almendro, pero no pistacho ni en nogal, son la consecuencia de la diferencia en la movilidad del B entre estas dos especies (Brown y Hu, 1996). El boro es móvil en el floema en el almendro y las aplicaciones hechas en agosto se transloca rápidamente desde las hojas hacia los brotes en desarrollo para su utilización en la primavera. En contraste, el B es inmóvil en pistacho y las aplicaciones foliares realizadas en agosto proveyeron poco o nada de B hacia las yemas florales en desarrollo.

El **Zinc** es un cofactor de más de 300 enzimas y proteínas y tiene un efecto temprano y específico en la división celular, el metabolismo del ácido nucleico y la síntesis de proteínas (Marschner, 2012). Como consecuencia, tanto de la demanda de Zn en los tejidos en crecimiento como de las condiciones climáticas de la primavera, muchas especies exhiben deficiencias de Zn al principio de la estación de crecimiento. La capacidad de respuesta de muchas especies (incluyendo nogales, pistachos, manzanos, aguacate, pecanes, macadamia) a las aplicaciones foliares de Zn también son mayores en la primavera (Huett y Vimpany, 2006; Keshavarz *et al.*, 2011; Peryea, 2007; Zhang y Brown, 1999a; Zhang y Brown, 1999b), en parte debido a que las superficies de las hojas jóvenes son más fácilmente penetrables antes de la expansión completa (Zhang y Brown, 1999b). En muchas especies de hojas caducas la deficiencia de Zn puede tener un marcado efecto sobre la producción de polen, la fisiología y anatomía floral, y el rendimiento (Christensen, 1980; Pandey *et al.*, 2006; Pandey *et al.*, 2009; Sharma *et al.*, 1990; Swietlik, 2002).

El Zn aplicado por vía foliar generalmente exhibe un bajo grado de penetración por la hoja (1 a 5%) así como limitada movilidad por el floema. El efecto resultante adonde las aplicaciones foliares de Zn tienen mayor eficacia es en los tejidos que reciben directamente la pulverización foliar (Christensen, 1980; Faber y Manthey, 1996; Huett y Vimpany, 2006; Keshavarz *et al.*, 2011; Peryea, 2007; Zhang y Brown, 1999a). La extensión en que el Zn es móvil por el floema varía con la fenología del cultivo. Se ha observado un bajo pero medible transporte de Zn en los tejidos que no recibieron la pulverización (incluyendo las raíces) en muchas especies de árboles (Faber y Manthey, 1996; Neilsen *et al.*, 2005b; Sánchez *et al.*, 2006; Zhang y Brown, 1999a). Mientras que

por otra parte hay evidencia en aumento que sugiere que aplicaciones foliar de Zn inmediatamente antes de la senescencia foliar en cultivos de cereales pueden mejorar significativamente las concentraciones de Zn en los granos (Cakmak, 2008; Cakmak *et al.*, 2010; Ebrahim y Aly, 2004; Erenoglu *et al.*, 2002; Fang *et al.*, 2008; Haslett *et al.*, 2001; Kinaci y Gulmezoglu, 2007; Ozturk *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010)

Varios investigadores han sugerido un efecto sinérgico de las aplicaciones que contienen tanto B como Zn. Pulverizaciones combinadas de B y de Zn aplicadas durante la etapa previa a la floración mejoró los rendimientos de manzanos entre un 22 y 35% (Steve *et al.*, 1999). En nogal (Keshavarz *et al.*, 2011) tres concentraciones de B y de Zn (0,174 y 348 mg L⁻¹ de B y 0.105 y 1.750 mg L⁻¹ de Zn) se aplicaron de forma independiente o en combinación, mostrando que todas las aplicaciones de Zn y de B, solos y en combinaciones, tuvieron un efecto significativo sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo. La germinación de polen, cuajado, crecimiento vegetativo, peso de nueces, porcentaje de llenado, longitud de la semilla y del carozo, e índice de clorofila fueron todos más altos cuando el B y Zn se aplicaron simultáneamente a las concentraciones de 174 y 1050 mg L⁻¹ respectivamente.

La mayor eficacia relativa de las aplicaciones de Zn en la primavera refleja probablemente la necesidad específica de Zn durante la rápida expansión vegetativa y floral, el alto grado de inmovilidad por el floema y la mayor penetración relativa del Zn en hojas más jóvenes antes que en hojas maduras. El alto grado de movilidad del Zn observado en hojas senescentes de trigo y su transporte eficaz hacia el grano también sugiere que las plantas tienen una capacidad inherente para el transporte de Zn y qué las limitaciones a la movilidad son probablemente de naturaleza física y no biológica.

Hay una necesidad significativa de desarrollar fertilizantes de Zn y seleccionar los mejores momentos para incrementar la movilidad y mejorar la eficacia de las aplicaciones foliares de Zn.

La aplicación foliar de **Nitrógeno** en primavera muestra resultados variables dependiendo de las especies, el medio ambiente o el estado nutricional de las plantas al momento de aplicación, así como la formulación utilizada. En cítricos la respuesta a la aplicación foliar de urea es beneficiosa en general. Un ensayo de siete años con naranja de ombligo (cv. Navel) demostró que la aplicación de urea como fuente de N foliar, inmediatamente antes, y durante la floración y expansión foliar, a razón de 0.23 kg de urea-N árbol⁻¹ dividiéndola en dos aplicaciones foliares, una en febrero y la segunda entre finales de abril y principios de mayo, fueron estadísticamente similares a los rendimientos obtenidos con 0.45 o 0.91 kg N árbol⁻¹ aplicado como nitrato de amonio al suelo (Hilgeman y Sharples, 1972). La importancia del adecuado suministro de N durante las etapas críticas desde el comienzo del cuaje y el desarrollo de la fructificación para el rendimiento y la buena calidad de los cítricos ha sido demostrado por varios investigadores externos (Alva *et al.*, 2006a; Alva *et al.*, 2006b). Los árboles que recibieron urea foliar aplicado a mediados de enero o mediados de febrero, independientes de tratamiento de N al suelo, tuvieron significativamente mayor rendimiento y número de

frutos por árbol en cada año, en comparación con árboles de control que solo recibieron N al suelo durante tres años consecutivos (Ali y Lovatt, 1994).

La investigación en cítricos ha demostrado beneficios en los rendimientos por las aplicaciones foliares en la floración y después de la floración, presumiblemente por aumentar la retención de la fruta durante los dos períodos de caída fisiológica de la primavera (Rabe, 1994; Sanz *et al.*, 1987). Varios autores demostraron que las aplicaciones de urea foliar durante la iniciación-diferenciación floral pueden alterar los rendimientos (Ali y Lovatt, 1994; Chermahini *et al.*, 2011; Rabe, 1994). Aplicaciones únicas durante el cuajado y la “caída fisiológica de junio” también fueron eficientes para el aumento de rendimientos. En estos ensayos, la urea foliar incrementó el contenido foliar de N durante las primeras 48 horas después del tratamiento en árboles de mandarina clementina ‘Cadoux’ (*Citrus reticulada* Blanco), pero este efecto desapareció a los 30 días después del tratamiento. La mejora en el rendimiento fue debido al aumento de número de frutos dado que el tamaño de los frutos no fue afectado por las pulverizaciones de urea. De acuerdo con estos resultados, la urea aplicada en pre-floración aumentó la iniciación y la intensidad de la floración de mandarina clementina, así como reducción de la alternancia (El-Otmani *et al.*, 2000). En la mayoría de estos ensayos, el N aplicado por vía foliar no da lugar a aumentos de los niveles de N de largo plazo en los tejidos, actuando principalmente al alterar la iniciación/diferenciación floral, el cuajado y la retención. Estos resultados pueden sugerir que la urea proporciona un beneficio fisiológico que es más que simplemente la consecuencia de la adición de N en esta forma.

La fertilización foliar con **Fósforo** se ha demostrado beneficiosa para una serie de cultivos frutales. Se han reportado aumentos de cuaje de frutos (Albrigo, 1999), de rendimiento de frutos (Lovatt *et al.*, 1988) y de calidad del fruto (Albrigo, 1999) en árboles frutales en respuesta a las aplicaciones foliares de P hechas cerca del período de floración o durante la temporada de crecimiento.

Asegurarse que las plantas están bien abastecidas con todos los elementos esenciales durante la primavera es esencial para una óptima productividad:

- Predecir la ocurrencia de deficiencias de nutrientes durante la primavera es difícil.
- Las condiciones ambientales pueden inducir deficiencias de nutrientes en un modo impredecible.
- En cultivos de alto valor la aplicación preventiva de nutrientes foliares es frecuentemente aconsejable.
- Algunas respuestas de los cultivos a los fertilizantes foliares son inexplicables y pueden sugerir un efecto no nutricional.

5.3.3. Eficacia de las aplicaciones foliares para la floración y cuajado de granos en cultivos de campo

La aplicación foliar de nutrientes a los cultivos de cereales está siendo crecientemente utilizada si bien aún no es una práctica ampliamente adoptada. Numerosos experimentos de fertilización foliar han sido desarrollados con una amplia variedad de cultivos y condiciones de crecimiento. Los resultados han sido altamente variables, a veces demostrando sustanciales beneficios de las aplicaciones foliares mientras que en otras ocasiones no mostraron efecto (Barraclough y Haynes, 1996; Freeborn *et al.*, 2001; Haq y Mallarino, 2005; Ma *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 1998; Mallarino *et al.*, 2001; Schreiner, 2010; Seymour y Brennan, 1995; Tomar *et al.*, 1988) y a veces efectos negativos. Los efectos negativos descritos pueden ser en gran parte explicados por los efectos directos de las sales de los Fertilizantes foliares que causaron quemaduras en las hojas y por ello redujeron el área foliar efectiva y producción de fotosintatos (Barel y Black, 1979a; Bremner, 1995; Fageria *et al.*, 2009; Gooding y Davies, 1992; Haq y Mallarino, 1998; Kaya y Higgs, 2002; Krogmeier *et al.*, 1989; Parker y Boswell, 1980; Phillips y Mullins, 2004). También han sido reportados efectos negativos de aplicaciones foliares de B a flores abiertas (Brown, 2001; Nelson y Meinhardt, 2011); estos pueden ser una consecuencia de que el B aplicado quiebra la direccionalidad del crecimiento del tubo polínico reduciendo así la fertilización efectiva (Dickinson, 1978; Robbertse *et al.*, 1990).

La investigación realizada con formulaciones foliares de P es ilustrativa de los desafíos para interpretar el rol de la fenología de los cultivos y los protocolos experimentales para evaluar la eficacia de las aplicaciones foliares. Las aplicaciones Foliar de P han sido usadas en varios cultivos tales como soja (Haq y Mallarino, 2005; Mallarino *et al.*, 2001; Syverud *et al.*, 1980), trigo (Batten *et al.*, 1986; McBeath *et al.*, 2011; Mosali *et al.*, 2006; Noack *et al.*, 2011), trébol (Bouma, 1969; Bouma, 1975), maíz (Girma *et al.*, 2007; Ling y Silberbush, 2002) y cereales (McBeath *et al.*, 2011; Noack *et al.*, 2011).

Syverud *et al.* (1980) encontró incrementos significativos en el rendimiento de maíz y soja con pulverizaciones semanales de polifosfatos. Dosis bajas de P aplicado por vía foliar corrigieron deficiencias de P de media estación en trigo de invierno resultando una mayor eficiencia de uso del P (Mosali *et al.*, 2006). Aplicaciones foliares de P en los estadios iniciales del crecimiento de trigo incrementó el número de macollos (brotes secundarios) fértiles (Grant *et al.*, 2001) pero no ha sido bien establecido que este suministro inicial de P aumentara también los rendimientos de grano. Mosali *et al.* (2006) identificó el estadio de crecimiento ‘Zadoks 32’ como el óptimo para el agregado de P foliar dado que aumentó tanto la absorción de P como el rendimiento de grano. Otros estudios (Batten *et al.*, 1986; Hocking, 1994) mostraron que la acumulación de P en plantas de trigo fueron las más altas cuando se aplicó antes de la antesis observándose un cese de la absorción de P en trigo luego de la antesis en trigo (Rose *et al.*, 2007). Aplicaciones foliares de 0, 2.2, 4.4 y 6.6 kg P ha⁻¹ como KH₂PO₄ al final de la antesis en trigo (Benbella y Paulsen, 1998) sugirieron una dosis optima de aplicación de 2.2 kg P ha⁻¹. Similarmente, KH₂PO₄ aplicado por vía foliar en varios estadios de crecimiento vegetativo y reproductivo en trigo fue más efectivo cuando se aplicaba durante la floración (Zadoks 65) a la dosis de 2 kg P ha⁻¹ (Mosali *et al.*, 2006), mientras que en

maíz la respuesta del rendimiento de grano a aplicaciones foliares de 2 kg P ha⁻¹ fue la mayor cuanto se aplicaban desde el estadio de octava hoja hasta la floración masculina, emergencia de la panoja (Girma *et al.*, 2007). En general, el momento más apropiado para una aplicación foliar de P es en el estado inicial de desarrollo de las vainas en soja (Gray y Akin, 1984); desde el cierre de la canopia hasta la antesis en cereales (Mosali *et al.* 2006; Girma *et al.* 2007); y comienzo de la emergencia de la panoja en maíz (Girma *et al.*, 2007; Giskin y Efron, 1986).

La respuesta de varios cultivares de soja a aportes foliares de N, P, K, S han sido prometedores (Boote *et al.*, 1978) cuando se aplicaron durante el periodo de llenado de granos (entre los estadios de crecimiento R5 y R7). Se ha encontrado que el suministro de nitrógeno foliar a la soja es un medio efectivo para reponer el N en las hojas, resultando así en mayores rendimientos contrastando con la sola fertilización al suelo (García y Hanway, 1976). Aplicaciones foliares de N en combinación con P, K y S mostraron los mejores resultados cuando se realizaron entre los estadios de desarrollo de R4 a R7 (Haq y Mallarino, 1998; Poole *et al.*, 1983a; Poole *et al.*, 1983b). Sin embargo, otros estudios no reprodujeron estos resultados (Boote *et al.*, 1978; Parker y Boswell, 1980) quizás debido a daños en las hojas y pérdidas de área fotosintética por la fertilización foliar y por el estado nutricional de las plantas. Se ha demostrado que pulverizaciones foliares aumentan las concentraciones de N, P, K y S en los tejidos sin efecto en los rendimientos (Boote *et al.*, 1978). Algunos nutrientes, cuando se aplican como fertilizantes foliares, pueden interactuar positivamente con otros nutrientes y pueden mejorar los rendimientos. Por ejemplo, el S aplicado solo como fertilizante foliar a la soja no incrementó los rendimientos de grano pero cuando se aplicaron en combinación con N, P y K, la respuesta fue positiva (García y Hanway, 1976).

Se han reportado rendimientos crecientes logrados con pulverizaciones foliares con N, P, K, S durante el periodo de llenado de granos en plantas de frijoles (Neumann y Giskin, 1979). Sin embargo, las respuesta de *Vicia faba* L. y *Phaseolus vulgaris* L. a pulverizaciones foliares de N, P, K, S resultaron en efectos inconsistentes y aun negativos (Day *et al.*, 1979; Witty *et al.*, 1980) y Lauer (1982), mientras que mayor crecimiento vegetativo y calidad debida a aplicaciones de Zn y N, P, K han sido reportados para melones y unas pocas otras cucurbitáceas (Lester *et al.*, 2010; Lester *et al.*, 2006).

En conclusión, el momento más apropiado para las aplicaciones foliares de macronutrientes es al momento inicial del desarrollo de las vainas en soja. Desde el cierre de la canopia hasta la antesis en cereales; a la emergencia de la panoja en maíz; y al comienzo de la floración en algodón. Sin embargo, si bien hay muchos casos de respuestas positivas de los cultivos a aplicaciones foliares de N, P, K y S hay muchas pruebas bien conducidas en las que no fueron detectadas beneficios sustanciales por aplicaciones foliares de P o de mezclas de fertilizantes (Haq y Mallarino, 2005; Leach y Hameleers, 2001; Mallarino *et al.*, 2001; Seymour y Brennan, 1995).

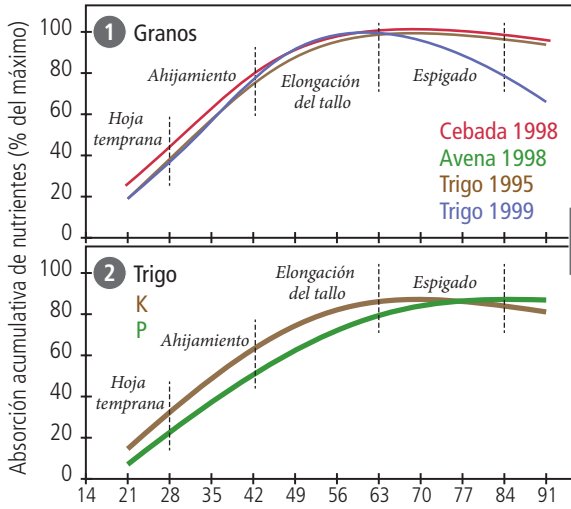
La diversidad de respuestas de cultivos de campo a la fertilización foliar sugiere que hay una influencia substancial del ambiente (clima, condiciones del suelo, estado nutricional, estadio de crecimiento, condiciones durante la aplicación), especies y formulación en la respuesta del cultivo. La comprensión de las condiciones que conducen a una respuesta positiva del cultivo sigue siendo un gran desafío.

5.3.4. La fertilización foliar durante los picos de demanda de nutrientes

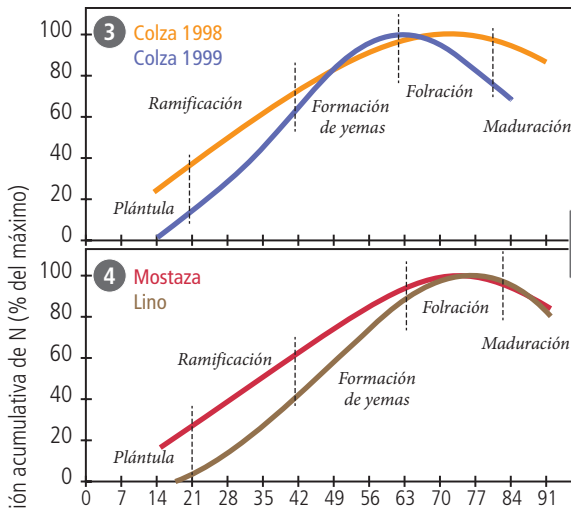
En la mayoría de los cultivos, la demanda de nutrientes tiene su pico durante la fase máxima de desarrollo vegetativo en los cultivos anuales y durante el desarrollo de los frutos y semillas en los arbóreos. Durante estas fases tanto como el 40% de la acumulación total anual de nutrientes puede ser adquirida en un período de 10 días (Figura 5.2) (Jones *et al.*, 2009). En almendros, la demanda de N es particularmente alta durante los primeros 60 días de crecimiento y puede superar las 180 lbs N acre⁻¹ mientras que la demanda de K se maximiza más tarde en la estación y tiende a superponerse con los periodos de mayor demanda de carbono (C) y durante los periodos de producción limitada de nuevas raíces.

En muchos cultivos perennes de alto valor, los fertilizantes foliares deberían aplicarse durante los periodos de mayor demanda de nutrientes considerando que el suministro desde el suelo y que la absorción de las raíces podría ser inadecuada para satisfacer la demanda aún con suficiente fertilizante aplicado al suelo. Hay evidencia de estos fenómenos para varias especies. El ciruelo tiene una demanda singularmente alta de K (hasta 280 kg K ha⁻¹ año⁻¹) con gran parte de esta demanda ocurriendo durante la mitad y parte del final del verano a medida que los frutos acumulan azúcares. En un ensayo comparativo en ciruelo de aplicaciones foliares de K versus fertilización al suelo Southwick *et al.* (1996) reportó que pulverizaciones foliares con KNO₃ aplicadas cuatro veces a lo largo de la estación de crecimiento corrigieron la deficiencia de K y rindieron similares o mas altas producciones que las aplicaciones al suelo. La rápida re-movilización del K desde las hojas hacia los frutos redujeron las concentraciones foliares de K, las que resultaron en quemado de la hoja (síntomas de deficiencia de K) y la muerte de brotes terminales en arboles de ciruelos (Southwick *et al.*, 1996) y pecanes (Sparks, 1986). Este efecto ocurrió aún en suelos con abundante K disponible sugiriendo que la demanda en hojas inmediatamente adyacentes al fruto excede la capacidad para la reposición desde el reservorio del suelo. Las pulverizaciones foliares pueden proveer una reposición más rápida particularmente en suelos fijadores de K y de P adonde las tasas de difusión pueden no ser adecuadas para satisfacer la demanda, la que es además exacerbada por la menor producción de nuevas raíces que ocurren durante el verano en muchas especies arbóreas. Con frecuencia durante el verano la absorción de nutrientes por las raíces también disminuye en plantas con estrés hídrico, y las aplicaciones foliares de nutrientes ofrecen un camino alternativo para la entrada de éstos en la planta.

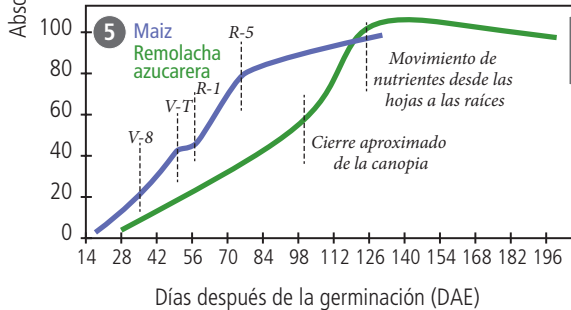
En pistacho, los periodos primarios de acumulación de N coinciden con la brotación de primavera y con el estadio de llenado de las semillas. La acumulación de K sigue



Absorción acumulativa como porcentaje de la máxima acumulación de cultivos de grano de primavera en Saskatchewan ① trigo avena y ② cebada y N en trigo en 1999 y P y K en trigo 1998.



Absorción acumulativa como porcentaje de la máxima acumulación por ③ colza en 1998 y 1999 ④ mostaza y lino en 1998 en Saskatchewan.



Absorción acumulativa como porcentaje de la máxima acumulación de maíz en Manitoba (V-8 = 8 hojas; V-T = emergencia de panojas, R-1 = emisión de barbas; R-5 = grano dentado) y remolacha azucarera en Francia.

Figura 5.2. Patrones de acumulación de nutrientes como porcentaje del total de acumulación estacional a lo largo de la estación de crecimiento para seis cultivos de campo (Adaptados de Jones *et al.*, 2009).

el mismo patrón de acumulación que el N. La demanda de nutrientes puede ser suministrada desde la re-distribución o desde la absorción. La alta demanda de K y N durante los años más fructíferos, en particular durante el crecimiento inicial de la primavera y el llenado de semillas, sugieren que cualquier reducción de la absorción de nutrientes por las raíces durante estos periodos podría resultar en una disminución del crecimiento de los frutos y del rendimiento (Rosecrance *et al.*, 1996; Rosecrance *et al.*, 1998b). La demanda de nutrientes por plantaciones grandes (heavy fruiting) en pistacho puede resultar en una deficiencia de nutrientes altamente localizada pero pronunciada en hojas inmediatamente adyacentes a los racimos de frutos aún en suelos bien fertilizados (Figura 5.3). Un patrón similar de deficiencias pueden ser observados en las hojas de los brotes inmediatamente adyacentes a los frutos en almendros (Figure 5.4).

El melón (*Cucumis melo* L.) responde muy bien a las pulverizaciones foliares de K (Jifon y Lester, 2009; Lester *et al.*, 2010; Lester *et al.*, 2006) ya que los contenidos de azúcares del fruto están directamente relacionados con el transporte de sacarosa por el floema ayudada por el K hacia el fruto, en particular durante el rápido crecimiento del fruto de melón, cuando la fertilización del suelo puede ser inadecuada por la limitada capacidad de absorción por las raíces. Bajo tales condiciones la suplementación de K a través de pulverizaciones foliares es muy efectiva para mejorar la calidad del fruto. El algodón tiene una demanda muy alta por K y es muy sensible a condiciones que limitan la disponibilidad de K tales como durante periodos críticos de alta demanda. El pico



Figura 5.3. Deficiencia severa de K y N en hojas inmediatamente adyacentes a grandes racimos de frutos en pistacho (*Pistacia vera*). Las deficiencias pueden ocurrir aún en plantaciones bien fertilizadas y aplicaciones foliares dirigidas de KNO_3 corrigen efectivamente estos síntomas foliares (Brown, resultados sin publicar).



Figura 5.4. Deficiencias multi-elementos en hojas inmediatamente adyacentes a brotes dobles de frutos en (F2) almendros. Nótese la aparente falta de deficiencia en las hojas más verdes de brotes vecinos sin frutos (NF) del mismo árbol (Brown, resultados sin publicar).

Tabla 5.4. Influencia del K aplicado por vía foliar al momento de llenado de cápsulas en la carga de cápsulas, N foliar y rendimiento de algodón (Oosterhuis y Bondada, 2001).

Fertilizante (kg N ha ⁻¹)	Carga de Cápsulas	Nitrógeno foliar (kg N ha ⁻¹)	Rendimiento (kg algodón semilla ha ⁻¹)
50	Baja carga de cápsulas	0	783 cd ^a
50	Baja carga de cápsulas	50	970 bc
50	Alta carga de cápsulas	0	1035 b
50	Alta carga de cápsulas	50	1258 a
100	Baja carga de cápsulas	0	776 d
100	Baja carga de cápsulas	10	782 bcd
100	Alta carga de cápsulas	0	884 b
100	Alta carga de cápsulas	20	1170 a

^aMedias dentro de una columna seguidas por la misma letra no son significativamente diferentes al nivel de $P \leq 0.05$.

de la demanda de K es en el periodo de llenado de cápsulas cuando una alta carga de cápsulas y rendimiento potencial resultan en una demanda mayor (Gwathmey *et al.*, 2009; Mullins y Burmester, 1990). La aplicación foliar de N hacia el fin del ciclo también es una práctica estándar en gran parte de las regiones productoras de algodón del mundo (Gerik *et al.*, 1998) y muchos estudios demuestran los beneficios de las aplicaciones foliares de N aún cuando hay altas dosis de N aplicado al suelo (Bondada *et al.*, 1999; Oosterhuis y Bondada, 2001). Igual que con el K, los beneficios de aplicaciones foliares de N al fin de ciclo son fuertemente dependientes de la fuerza de la demanda de los tejidos y la fenología del cultivo (Oosterhuis y Bondada, 2001).

5.3.5. Pulverizaciones postcosecha y de final de estación

Las aplicaciones foliares de nutrientes de fin de ciclo (post-cosecha) son una práctica común en muchas especies de árboles de hoja caduca que se basa en la creencia que el estado nutricional puede ser mejorado para el próximo periodo de floración primaveral. Sin embargo hay considerables diferencias en la sanidad y longevidad de las hojas durante el periodo de postcosecha el cual depende de las especies y el cultivar. Así, las hojas de especies precoces de cerezos, uvas, damascos y duraznos pueden experimentar un sustancial periodo de pleno funcionamiento postcosecha, mientras que especies tardías tales como almendros, pistachos, nogales, manzanos y perales tiene una funcionalidad foliar muy escasa en postcosecha. En general, la evidencia sugiere que las ventajas asociadas con aplicación de nutrientes al follaje durante el periodo postcosecha son mayores con los nutrientes móviles por el floema (N, K así como B en especies que transportan fácilmente B) aunque el potencial beneficio de todas las pulverizaciones de nutrientes disminuye a medida que las hojas de las plantas y árboles se aproximan a la abscisión. Para los nutrientes inmóviles por el floema, particularmente Ca, Fe, Mn y Zn, no hay ventaja de aportar a los árboles con estos elementos durante el periodo final de post cosecha (Faber y Manthey, 1996; Huett y Vimpany, 2006; Neilsen *et al.*, 2005b; Peryea, 2006; Peryea, 2007; Sanchez *et al.*, 2006).

La aplicación foliar de urea se usa comúnmente para proveer N a los árboles cuando están entrando en la dormancia (Dong *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2005a; Sanchez y Righetti, 2005; Sanchez *et al.*, 1990; Shim *et al.*, 1972). Las aplicaciones foliares de urea de otoño aumentaron el N total de los brotes florales dormidos y el cuaje de frutos de árboles de manzano en la estación subsiguiente (Guak *et al.*, 2004). Las aplicaciones de urea tardías son mejor toleradas que las realizadas durante la estación de crecimiento dado que la preocupación por la fitotoxicidad es menor en hojas senescentes. En duraznero, el límite de fitotoxicidad para la mayor parte de la estación de crecimiento se alcanza con concentraciones foliares de urea aplicadas entre 0.5 a 1.0%, consecuentemente, se requieren múltiples pulverizaciones para satisfacer la demanda de los árboles. La preocupación acerca de la fitotoxicidad disminuye al llegar el momento de la caída natural de las hojas en el otoño, cuando pueden usarse concentraciones de urea mayores (5 a 10%) (Johnson *et al.*, 2001). Tagliavini *et al.* (1998) y Toselli *et al.* (2004) también reportaron que las hojas de duraznero eran capaces de absorber una proporción significativa del N interceptado por la canopia de pulverizaciones foliares y Scagel *et al.* (2008) reportaron que las aplicaciones de urea de otoño mejoraron el crecimiento

de primavera, dando como resultado que las prácticas de fertilización de primavera podían necesitar ser modificadas aumentándolas para considerar la mayor absorción o demanda de algunos nutrientes.

5.3.6. Fertilización foliar y calidad de los cultivos

Los fertilizantes foliares pueden ser usados para mejorar la calidad tanto en términos de proteína del grano como de contenido de Zn (Cakmak, 2008; Cakmak *et al.*, 2010; Erenoglu *et al.*, 2002). En trigo (*Triticum* sp.), varios estudios han mostrado que las pulverizaciones foliares de N aumentaron la proteína del grano. Respecto al momento óptimo para la pulverización de N en trigo, se mostró que la post-polinización foliar de N dio el más alto nivel de proteína en el grano (Blandino y Reyneri, 2009; Bly y Woodard, 2003; Gholami *et al.*, 2011; Pushman y Bingham, 1976; Varga y Svecnjak, 2006; Woolfolk *et al.*, 2002). Los beneficios de una aplicación foliar tardía se pueden ver influidos tanto por el cultivar como el estado de N de la planta (Varga y Svecnjak, 2006).

Los resultados de Dong *et al.* (2009) mostraron que las aplicaciones en pre-cosecha de Ca y B a naranjos de ombligo 'Cara cara' (*Citrus sinensis* L. Osbeck) tuvieron un efecto significativo en la red polimérica cruzada de la membrana de los segmentos del fruto y los niveles de expresión de la enzima poligalacturonasa, pectinesterasa y b-galactosidasa fueron significativamente reducidos por las aplicaciones pre-cosecha de Ca y B solos, o en combinación. Tales tratamientos aumentaron los contenidos de fibra dietaria total, fibra dietaria insoluble, proto-pectina y celulosa pero disminuyó la fibra dietaria soluble y pectina soluble en agua. Frutos de mandarina 'Fortune' mostraron efectos positivos de pulverizaciones de Ca para reducir la incidencia de desórdenes de la cascara (Zaragoza *et al.*, 1996).

Las pulverizaciones pre-cosecha de Ca y K aumentaron el contenido mineral en la cáscara del frutos de mandarina 'Fortune' a la cosecha (El-Hilali *et al.*, 2004). Las pulverizaciones foliares a árboles con fertilizantes de N, Ca y K, aplicados cuatro semanas antes de la cosecha redujeron significativamente la aparición de desórdenes de la cáscara luego del almacenarlos a 4 y 8°C, y una pulverización pre-cosecha con $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y KNO_3 mejoró el contenido mineral de la cáscara del frutos a la cosecha.

5.4. Impacto del estado nutricional de la planta en la eficacia de los fertilizantes foliares

El estado nutricional de una planta puede tener un significativo efecto en la respuesta a las aplicaciones foliares de fertilizantes. Éstas pueden variar con la especie vegetal, el elemento nutriente y la duración de la condición deficiente de dicho nutriente. Una deficiencia nutricional persistente puede reducir la absorción foliar al alterar la composición física y química de la hoja; al reducir el tamaño de la canopia; o al alterar la fenología del cultivo. Deficiencias de corto plazo también pueden resultar en una mejor absorción a través del aumento en la actividad de los mecanismos de respuesta a la deficiencia ('activadores' de absorción) o como consecuencia de la abundancia relativa de sitios de unión sin saturar por los nutrientes deficientes. El transporte de nutrientes

desde el sitio de aplicación puede también mejorar bajo condiciones de deficiencia como una consecuencia de gradientes químicos potenciales que favorecen el movimiento de nutrientes desde el sitio de absorción. En contraste, la suficiencia de un determinado nutriente puede favorecer la absorción foliar al aumentar el crecimiento de nuevos brotes y el tamaño de la canopia mejorando por esta vía la absorción de nutrientes como se describió antes (Capítulo 4.1.). De acuerdo con la Ley del Mínimo de Liebig, la respuesta del cultivo al mejor suministro de un determinado nutriente es maximizada cuando todos los demás elementos esenciales están presentes en cantidades adecuadas. El siguiente texto provee ejemplos de cada uno de estos procesos.

Marschner (2012) concluyó que si la cantidad de un determinado nutriente mineral en las hojas es extremadamente bajo, entonces su habilidad para absorber este nutriente está limitada a causa de cambios irreversibles en sus tejidos. Este principio ha sido demostrado recientemente en estudios de deficiencia de Fe donde se había mostrado que cambios significativos ocurren a nivel de la cutícula y la epidermis como resultado de la clorosis férrica (Fernandez *et al.*, 2008b). En hojas de melocotoneros deficientes en Fe se observaron alteraciones la morfología y propiedades mecánicas en la epidermis, la pared celular y los haces vasculares. Las hojas fueron caracterizadas por la ocurrencia de problemas hidráulicos (Eichert *et al.*, 2010; Fernandez *et al.*, 2008b) como resultado de irregularidades en la formación de cutícula causado por la producción limitada de material lipídico, como también se ha observado en la membrana tilacoide de los cloroplastos de peral y melocotonero en condiciones de deficiencia de Fe (Abadia *et al.*, 1988; Abadia, 1992; Abadia *et al.*, 2011; Monge *et al.*, 1993).

En hojas de citrus, la deficiencia de N indujo un aumento en la concentración de cera epicuticular (Bondada *et al.*, 2006; Bondada *et al.*, 2001) y una respuesta análoga fue observada en acículas de *Pinus palustris* con bajo contenido de N, las que mostraban una mayor concentración de cera epicuticular que las acículas bien provistas de N (Prior *et al.*, 1997). Un aumento de cera epicuticular redujo la absorción foliar al reducir el proceso de transporte transcuticular y al aumentar la proporción de alcanos de cadena largas que altera la morfología de las ceras epicuticulares como se observó en abeto ‘Douglas’ (Chiu *et al.*, 1992). La deficiencia de N también puede afectar la absorción al reducir la expansión de las hojas y el crecimiento de los brotes que resultan en hojas más pequeñas y tallos con cutículas más gruesas y más cera epicuticular en base al área foliar.

Sin embargo una disminución en la absorción de N bajo condiciones de deficiencia de N no se ha observado siempre y por ejemplo, en estudios empleando urea enriquecida con ^{15}N llevados a cabo por Klein y Weinbaum (1984) no se pudo establecer una relación entre el estado nutricional de N del árbol y la absorción de la urea por el follaje. Estos autores reportaron una absorción comparable de urea aplicada por vía foliar por plantas de olivo ‘Manzanillo’ suficientes y deficientes de N, y demostraron una retención de N-urea 17% mayor por las plantas deficientes en N que aquellas plantas con un estado adecuado de N. En olivo, las plantas deficientes de N absorbieron mas N por las hojas que aquellas con contenidos óptimos de N (Fernández-Escobar *et al.*, 2011). En citrus, la absorción de N de urea foliar disminuyó al aumentar el contenido total de N en los brotes (Leacox y Syvertsen, 1995). La respuesta de la planta a las pulverizaciones

foliares también se ve afectada por el estado nutricional de K como se demostró por la menor absorción de Rb (un análogo del K) por hojas de olivo en plantas con bajo suministro de K y con estrés hídrico comparadas con aquellas cultivadas en un medio rico en K (Restrepo-Díaz *et al.*, 2008a). El contenido de K en plantas de olivo aumentó significativamente a medida que la concentración de KCl foliar se incrementó pero sólo en las plantas cultivadas en una solución nutritiva con bajo nivel de K (0.05 mM KCl) (Restrepo-Díaz *et al.*, 2008a). Esto puede ocurrir como resultado de cambios en la epidermis de la hoja como se describió antes. La absorción reducida de Rb aplicado por vía foliar (un análogo del K) por las hojas de olivo bajo stress hídrico puede explicar la respuesta irregular de árboles de olivo de secano a aplicaciones foliares de K y podrían estar relacionadas al efecto del estrés hídrico en la expansión de las hojas y de la canopia (Arquero *et al.*, 2006; Restrepo-Díaz *et al.*, 2008a; Restrepo-Díaz *et al.*, 2009; Restrepo-Díaz *et al.*, 2008b), o a una reducida apertura de estomas (Fischer y Hsiao, 1968). En un estudio reciente realizado en Australia (Fernández *et al.*, 2014b) se observó que las plantas de trigo con carencia de fósforo tenían hojas más mojables pero sin embargo esto no repercutía en una mayor absorción foliar de P posiblemente debido a una disfunción en la apertura estomática asociada a la deficiencia de P.

Se encontró que hojas deficientes en Boro tenían tasas de absorción de ^{10}B significativamente más bajas que las hojas con contenidos suficientes de B (9.7% de la dosis aplicada vs. 26 a 32%) (Will *et al.*, 2011). Plantas sin aporte de B por las raíces mostraron sólo un 30% de la absorción foliar de B en comparación con plantas cultivadas con 10, 30 y 100 μM B. Las cantidades absolutas de B aplicado por vía foliar que se transportaron fuera de la zona de aplicación fueron más reducidas en plantas sin suministro de B a las raíces (1.1% de la dosis aplicada) siendo las más altas en aquellas cultivadas en 100 μM B (2.8%). La limitada absorción foliar de B por hojas deficientes en B fue probablemente causada por una reducida permeabilidad de la superficie de la hoja (Will *et al.*, 2011). En hojas de plantas cultivadas sin aporte de B, los estomas estaban encogidos y cerrados, lo cual posiblemente redujo la absorción de solutos aplicados a las hojas por la vía estomática (Eichert y Burkhardt, 2001; Eichert y Goldbach, 2008). Posiblemente, la deficiencia de B también induce alteraciones en la estructura de la epidermis como se ha reportado para la deficiencia de Fe en durazneros y perales (Fernandez *et al.*, 2008b). Varios autores han cuantificado una movilidad proporcionalmente mayor de B aplicado foliar y al suelo durante los estadios reproductivos de las plantas bajo condiciones de deficiencia de B (Huang *et al.*, 2008; Liakopoulos *et al.*, 2009; Marentes *et al.*, 1997; Shelp, 1988; Shelp *et al.*, 1996). Este efecto puede ser una consecuencia de la mejor actividad de los canales de transporte de B bajo deficiencia de B (Miwa *et al.*, 2010); como resultado de un mejor transporte de B por el floema desde la hoja hacia los tejidos reproductivo bajo deficiencia (Huang *et al.*, 2008; Will *et al.*, 2011); o una estimulación de la producción de poliol que facilita el transporte de B (Liakopoulos *et al.*, 2009).

Si bien hay escasos trabajos identificando una interacción entre la deficiencia de nutrientes, fenología del cultivo, expansión de la canopia de la cultivo y absorción foliar, puede hipotetizarse que las condiciones de crecimiento que optimicen la expansión foliar, el desarrollo de la canopia, reproducción, crecimiento del fruto y

senescencia aumentarán la absorción y re-movilización de los nutrientes foliares. Klein y Weinbaum (1984) observaron que la eficacia del N aplicado por vía foliar parece estar ligada indirectamente con el estado nutricional de N del árbol y el transporte fuera de las hojas fue mayor en los árboles mayores y que crecían más vigorosamente. Más aun, los autores concluyeron que, dependiendo del estado nutricional de N del árbol, podría haber desacoples entre los efectos del estado nutricional de N del árbol en la absorción de urea por la hoja y la movilidad del N-urea aplicado por vía foliar dentro de la planta. Otros (Sanchez y Righetti, 1990; Sanchez *et al.*, 1990; Tagliavini *et al.*, 1998) han mostrado que la re-movilización del N foliar antes de la abscisión natural de las hojas no fue afectada por el estado nutricional de N del árbol.

En manzanos, hojas con contenido de N absorbieron más N de pulverizaciones (Cook y Boynton, 1952) y respondieron mejor a las pulverizaciones de Mg (Forshey, 1963) así como aplicaciones foliares en general (Swietlik y Faust, 1984). Mientras que la cantidad de ^{65}Zn absorbida por hojas de trigo no fue afectada por el estado nutricional de Zn de las plantas (Erenoglu *et al.*, 2002), el aporte de N suplementario a plantas de trigo resultó en un mejor contenido de N en el grano y en una significativa mejora del transporte del ^{65}Zn foliar hacia el grano y por lo tanto en un aumento de las concentraciones de Zn en el grano (Cakmak *et al.*, 2010). La mejor absorción foliar de elementos esenciales en árboles bien suministrados con todos los demás nutrientes, probablemente ocurre debido al mejor estado fisiológico general de los árboles, así también como una mejor disponibilidad de una superficie absorbente (mayor canopia) y una mayor demanda de los órganos en desarrollo.

El estado nutricional de la planta tiene efectos predecibles pero no necesariamente predictivos en la respuesta de los cultivos a los fertilizantes foliares.

- Plantas con un buen estado nutricional absorberán mejor a los fertilizantes foliares.
- El estado nutricional puede alterar las plantas y por lo tanto tiene efectos complejos en la respuesta del cultivo a los tratamientos foliares.

5.5. Fuentes y formulaciones de nutrientes para pulverización foliar

A partir de una revisión de la literatura disponible, es claro que la fuente y la formulación de las pulverizaciones de nutrientes foliares afectan la absorción por las hojas y las diferencias encontradas en las respuestas de los nutrientes y de las especies vegetales. Las diferencias en las respuestas pueden ser adscriptas a la forma química del nutriente; sus propiedades fisicoquímicas (tamaño molecular, solubilidad, volatilidad, partición de carga, higroscopicidad, y punto de delicuescencia); los iones acompañantes; y la presencia de varios aditivos y adyuvantes. La siguiente revisión se limita a brindar ejemplos donde pueden destacarse los principios generales antes que a los resultados de un producto específico.

Las aplicaciones foliares de urea, nitrato de calcio y sulfato de amonio tuvieron efectos similares en el aumento de las concentraciones de N en hojas de manzano (*Malus*

domestica Borkh) (Boynton, 1954; Rodney, 1952). La urea se usa frecuentemente en pulverizaciones foliares en agricultura ya que ésta es asimilada rápida y eficientemente por las plantas y árboles (Bi y Scagel, 2008; Bondada *et al.*, 2001; Cheng *et al.*, 2002; Chermahini *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2005a; Gooding y Davies, 1992; Guvenc *et al.*, 2006; Johnson *et al.*, 2001; Laywisadkul *et al.*, 2010; Rosecrance *et al.*, 1998a; Shim *et al.*, 1972; Xia y Cheng, 2004; Yildirim *et al.*, 2007). Las limitaciones principales en el uso de urea están asociadas con la ocurrencia de toxicidad foliar y daños a los frutos cuando las dosis exceden la tolerancia de la planta. Más aun, la toxicidad y el daño pueden también asociarse con el alto contenido de biuret de algunas ureas (Fisher, 1952; Gooding y Davies, 1992; Johnson *et al.*, 2001; Krogmeier *et al.*, 1989; Strik *et al.*, 2004; Witte, 2011).

Bowman y Paul (1992) mostraron tasas comparables de absorción de N por hojas de centeno (*Lolium perenne* L.) a partir de aplicaciones foliares de urea, y fuentes de N de amonio y de nitrato. Esto contrasta con la mayoría de los resultados que demuestran una tasa de absorción más alta de N por las hojas tratadas con urea comparadas con aquellas tratadas con formas de nitrato o amonio (Reickenberg y Pritts, 1996; Swietlik y Faust, 1984; Wittwer *et al.*, 1967). Este fenómeno está relacionado con el hecho de que la membrana cuticular es 10 a 20 veces más permeable a la urea que a los iones inorgánicos (Yamada *et al.*, 1964a; Yamada *et al.*, 1964b) lo que es una consecuencia de la naturaleza de la molécula de urea. Las soluciones Urea-nitrato de amonio también ha sido muy efectivas como fuente de N aplicado por vía foliar a la cebada (Turley y Ching, 1986), mientras que en soja no hubo diferencias en la tasa de absorción de N aplicado por vía foliar de las formas urea, amonio o nitrato (Morris, 1983). La tasa de absorción de iones de amonio en las hojas puede ser más rápida que la de los iones nitrato a causa de un aumento del gradiente de penetración de los cationes a lo largo de los sitios cargados negativamente de la cutícula. Esto ha sido verificado en viñedos (Porro *et al.*, 2006) donde la absorción de tratamientos conteniendo NH_4 fue más alta que en los tratamientos que contenían NO_3 .

El rol del punto de delicuescencia (POD) para determinar la eficacia de los fertilizantes foliares ha sido descrito en el Capítulo 4, en el cual se explicó que las sales usadas para nutrición foliar a menudo tienen bajos puntos de delicuescencia (POD) (Schönherr, 2001). Así, el CaCl_2 (33%), K_2CO_3 (44%), y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (56%) deberían ser más efectivos que el K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , KNO_3 , Acetato de Ca, Lactato de Ca, y propionato de Ca, dado que los últimos son solubles solo a humedades cercanas al 100% (Schönherr, 2001). Sin embargo el mayor riesgo de fitotoxicidad de las sales de bajo punto de delicuescencia (POD) no debería subestimarse.

Se acepta comúnmente que, para la mayor parte de las especies vegetales, el Mg aplicado por vía foliar es rápidamente absorbido cuando está presente como sales de cloruro y de nitrato (Allen, 1959; Neilsen y Hoyt, 1984). Fisher y Walker (1955) reportaron que las concentraciones foliares de Mg en hojas de manzano como resultado de aplicaciones foliares de Mg en forma de nitrato, cloruro, acetato y sulfato aumentaron 71, 66, 32 y 8% respectivamente. Cuando el Mg se aplicó como MgCl_2 , 90% de éste fue absorbido por hojas de manzano, aún a humedades relativas bajas de 30%, mientras que el MgSO_4 requirió una humedad relativa del 80% para mostrar un aumento en

la absorción (Neilsen y Hoyt, 1984). La respuesta probablemente refleja la mayor delicuescencia del MgCl_2 comparado con el MgSO_4 .

Estudios previos en fertilización foliar de Zn de varias especies habían mostrado una translocación relativamente pequeña del Zn aplicado por vía foliar como ZnSO_4 o después de la quelatación con un ligando sintético como el EDTA (Chatzistathis *et al.*, 2009; Neilsen *et al.*, 2005b; Peryea, 2007; Swietlik y Laduke, 1991; Zhang y Brown, 1999a; Zhang y Brown, 1999b). En guisantes (arvejas) (*Pisum sativum* L.) solo 25% y 75% del Zn aplicado como Zn-EDTA o ZnSO_4 respectivamente fue recuperado luego de remover las ceras epicuticulares, y 8 al 10% fue translocados desde los tejidos tratados (Ferrandon y Chamel, 1988). En uno de los únicos estudios disponibles en paltos (aguacates,) (Kadman y Cohen, 1977) no hubo translocación de $^{65}\text{ZnCl}_2$ desde los puntos aplicados en hojas intactas al tejido parenquimático adyacente. Se ha reportado que los quelatos amino ácidos (metalosatos) fueron más efectivamente absorbidos y translocados que las sales metálicas inorgánicas o que el quelato sintético EDTA en una variedad de especies y cultivares (Hsu, 1986; Shazly, 1986). Las siguientes fuentes aplicadas por vía foliar ZnSO_4 , ZnO, y metalosato de Zn a dosis de 5.4, 0.8 y 0.9 g L⁻¹ respectivamente resultaron en un aumento de la concentración foliar de Zn en paltos (Crowley *et al.*, 1996). Sin embargo, experimentos con ^{65}Zn aplicado a las hojas de plantines de paltos (*Persea americana* Mill.) cultivados en invernadero mostraron que <1% del Zn aplicado como ZnSO_4 o metalosato de Zn fue absorbido por el tejido foliar y que hubo escasa translocación de Zn dentro del tejido parenquimático adyacente a los sitios de aplicación o dentro de las hojas por encima o por debajo de aquellas tratadas.

La deficiencia de Zn en arroz puede ser corregida por la aplicación de ZnSO_4 pero la aplicación en formas quelatadas, tales como Zn-EDTA, se encontró mas eficiente (Correia *et al.*, 2008; Karak *et al.*, 2006). En plantas de citrus, Sartori *et al.*, (2008) reportaron que el ZnCl_2 fue más eficiente que el ZnSO_4 en aportar Zn a las hojas aunque la primera puede haber causado síntomas de toxicidad en las hojas. La magnitud de la absorción foliar de Zn parece ser dependiente de la fuente del micronutriente. Cuando la fuente de Zn fue ZnSO_4 para arboles de naranjo, la absorción de Zn por las hojas fue tan escasa como el 6% del total aplicado (más de 120 días). Sin embargo, cuando la fuente de Zn fue cloruro, la absorción de Zn alcanzó el 92% del total aplicado. Cuando productos comercialmente disponibles de quelato de Zn fueron usados como fuentes en árboles de naranjo, las tasas de absorción y translocación no fueron mayores que las sales inorgánicas de sulfato y cloruro de Zn (Caetano, 1982; Santos *et al.*, 1999). Cuando las aplicaciones foliares de sulfato y cloruro de Zn, o compuestos quelatos de EDTA o lignosulfonatos, marcados con ^{65}Zn fueron comparados en hojas de guisantes o frijoles menos del 7% del Zn aplicado fue translocado desde las hojas tratadas a las otras partes de la planta independientemente de la fuente de Zn (Ferrandon y Chamel, 1988; Sartori *et al.*, 2008). En pecan y citrus, el $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ solo, o en combinación con urea y nitrato de amonio, levantaron los niveles de Zn foliar más que el ZnSO_4 (Smith y Storey, 1979). No hubo diferencias en efectividad de compuestos de Zn para la pulverización foliar aplicadas a manzanos (Neilsen y Neilsen, 1994).

La eficacia de 11 productos comercialmente disponibles de Zn aplicados al follaje de árboles de manzanos durante el estadio de post floración demostraron que todos

los productos de Zn incrementaron las concentraciones foliares de Zn hasta los niveles deseables (Peryea, 2006; Peryea, 2007). Las concentraciones de Zn en la hoja aumentaron en el siguiente orden: fosfato de Zn < óxido de Zn = oxisulfato de Zn < Zn quelato/ orgánicamente acomplejado < nitrato de Zn. A causa de que los productos de base inorgánica son normalmente menos costosos por unidad de Zn, puede ser menos costoso y tan efectivo utilizar dosis altas que el uso de una dosis alta de un producto inorgánico de Zn, que usar una dosis más baja de un producto más caro pero orgánicamente acomplejado. Por otra parte, el uso de un producto orgánicamente acomplejado de Zn a bajas dosis puede minimizar la liberación del metal hacia el ambiente. Pulverizaciones de post floración de Zn aplicadas a dosis bajas y con estas formulaciones más seguras reemplazan las pulverizaciones realizadas durante la dormancia y de postcosecha de producto basados en sales inorgánicas de Zn (Peryea, 2007; Sanchez *et al.*, 2006). La relativa efectividad de fuentes de quelatos de Zn, Zn-PHP, Zn-HEDTA, Zn-EDDHSA, Zn-EDTA, Zn-S, Zn-EDDS y Zn-EDTA-HEDTA aplicada a frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) fue mayor con Zn-EDTA, Zn-EDTA-HEDTA, Zn-HEDTA y Zn-EDDHSA (Gonzalez *et al.*, 2007).

La mayoría de las formas de B disponibles para su uso en fertilizantes foliares son altamente solubles y generalmente efectivas. En manzano los siguientes productos a base de B mostraron pocas diferencias sustantivas Mor-Bor 17, Solubor, Solubor DF, Spraybor, Borosol, Liquibor, N-boro, y Solubor más Coron (Peryea *et al.*, 2003). Por otra parte, la forma química del B en el producto, su estado físico y la presencia de aditivos no tuvieron efectos diferenciales consistentes y sustantivos en la absorción de B. En un estudio de invernadero, hubo diferencias en la concentración de B en los tejidos de algodón que recibieron aplicaciones foliares de diferentes fuentes de B, incluyendo ácido bórico y borato de sodio, pero no hubieron efectos sobre la concentración de B en los tejidos en soja (Guertal *et al.*, 1996). El efecto relativamente pequeño de la fuente o de la formulación de B en los fertilizantes foliares es probablemente el resultado del tamaño pequeño y su naturaleza no disociada y sin carga del ácido bórico, que es el estado químico predominante del B a valores de pH inferiores a 8.2. El ácido bórico sin disociar, similar a la urea y al glicerol, debería pasar fácilmente a través de las membranas cuticulares.

La identificación de fuentes superiores y efectivas de fertilizantes foliares a base de Fe ha sido un desafío importante para los profesionales de la fertilización foliar (Abadía *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2009). Mientras que algunos autores reportan ventajas de la utilización de quelatos de Fe sobre sales inorgánicas de Fe (Basiouny *et al.*, 1970), otros no observaron beneficios de los primeros sobre los segundos que son más baratos (Álvarez-Fernández *et al.*, 2004; Rombola *et al.*, 2000). En (maní) cacahuete, el sulfato de Fe(II) fue tan eficaz como el Fe(III)- EDTA y el citrato de Fe(III) (Singh y Dayal, 1992) y en frutales de kiwi el sulfato Fe(II) fue tan eficaz como el Fe(III)-DTPA (Tagliavini *et al.*, 2000), mientras que el sulfato de Fe(II) sólo (9 mM Fe), o en combinación con ácidos ascórbico, cítrico y sulfúrico, fue capaz de inducir el reverdecimiento en hojas cloróticas de perales (García-Lavina *et al.*, 2002). En uvas el sulfato de Fe fue algo efectivo (Reed *et al.*, 1988), pero no en melocotones. Del mismo modo, varias investigaciones observaron respuestas fisiológicas variables de las plantas deficientes en Fe a aplicaciones de

ácidos diluidos y quelantes tales como el ácido cítrico (Alvarez-Fernandez *et al.*, 2004; Tagliavini *et al.*, 1998). Fernández y Ebert (2005) concluyeron que debido a la química del Fe(II) y del Fe(III) en solución, así como su inestabilidad en presencia de oxígeno y dependencia del pH, es mejor aplicar las pulverizaciones foliares como quelatos de Fe antes que como sales. Sin embargo, al evaluar el efecto de varios compuestos de Fe, incluyendo sulfato de Fe y cuatro quelatos de Fe (Fernández *et al.*, 2006; Fernández *et al.*, 2008a) se mostró que todos los compuestos pudieron reverdecer hojas cloróticas y aumentar las concentraciones foliares de Fe siempre y cuando se añadan coadyuvantes adecuados a las formulaciones. La concentración juega un papel importante en la absorción de Fe por las hojas, aumentando proporcionalmente la absorción a partir de concentraciones más bajas en la solución de tratamiento (Fernández y Ebert, 2005).

Se aplicaron dos fuentes de Mn ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y Mn-EDTA) por vía foliar en diferentes concentraciones (0, 200, 400, 800 y 1200 mg L^{-1} Mn) a árboles deficientes en Mn de naranjos ‘Washington Navel’ (Papadakis *et al.*, 2005) y 170 días después de las aplicaciones, las concentraciones medias de Mn en las hojas tratadas con $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (200, 400, 800 o 1200 mg L^{-1} Mn) o con Mn-EDTA (400, 800 o 1200 mg L^{-1} Mn) fueron significativamente superiores a los de las hojas de control. Se concluyó que el $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ fue más eficaz que el Mn-EDTA cuando se aplica en cantidades iguales (Mn kg^{-1}). Resultados similares con MnSO_4 se observaron en manzanos (Thalheimer y Paoli, 2002), remolacha azucarera (Last y Bean, 1991) y trigo (Modaihsh, 1997), siendo más efectivos que el Mn quelatado; mientras que en lupino (*Lupinus augustifolia*) las dos fuentes (Mn kg^{-1}) resultaron ser igualmente efectivas (Seymour y Brennan, 1995).

Las formulaciones de nutrientes pueden tener un profundo efecto sobre la respuesta de la planta a los fertilizantes foliares.

- Las propiedades físicas y químicas de la formulación alteran la cantidad de tiempo que el nutriente se mantiene en disolución y disponible para la absorción sobre la hoja.
- El tamaño de la molécula del nutriente afecta su tasa de penetración aunque actualmente no se entiende cómo esto influye en la respuesta.
- No se sabe si la formulación altera la efectividad del nutriente dentro de la planta o si las diferencias en la respuesta son de carácter biológico o simplemente de naturaleza física.
- Hay literalmente miles de formulaciones comerciales de nutrientes disponibles en el mercado y un gran número de formas en que éstas se pueden combinar y aplicar.
- Para comparar y contrastar el efecto de diferentes formulaciones es esencial que se proporcione información sobre la metodología experimental empleada, la composición de la formulación aplicada y las condiciones ambientales durante el tratamiento.

5.6. Toxicidad

Los daños al follaje pueden ocurrir a veces con fertilizantes de aplicación foliar debido a la toxicidad localizada de sales; la presencia de compuestos tóxicos y contaminantes; el pH de la solución; o toxicidad elemental directa (Alexander y Schroeder, 1987). La expresión de la toxicidad puede variar dependiendo del grado de localización de los materiales depositados y puede estar influenciada por el movimiento de los materiales aplicados hacia y dentro del tejido foliar. Los dos síntomas más comunes de toxicidad son: 1) manchas necróticas aisladas que se producen cuando las gotas y los materiales se secan y se concentran en puntos discretos quemaduras en los márgenes y puntas de las hojas debido al flujo gravitacional de los materiales pulverizados hacia esas áreas, o como consecuencia de la re-distribución interna de los químicos aplicados a través de la corriente de transpiración hacia los márgenes y puntas de las hojas. La aparición de lesiones necróticas o marginales puede resultar en una reducción del área fotosintética de las hojas, con la consiguiente disminución de la productividad (Harder *et al.*, 1982; Neumann, 1979), que puede compensar o anular los efectos promotores del crecimiento de la fertilización foliar.

Un síntoma común de toxicidad después de la aplicación de fertilizantes foliares es el ‘quemado’ o ‘chamuscado’, que puede ser la consecuencia de la ruptura celular debido a las grandes diferencias de presión osmótica a través de la pared celular cuando una solución fertilizante altamente concentrada se aplica a la superficie de la hoja (Greenway y Munns, 1980). Este tipo de daño foliar se describe en forma genérica como una quemadura de la hoja y es más frecuente con los compuestos de alto índice salino (Clapp, 2009). En este escenario, el rápido desarrollo de un gradiente de concentración de soluto a través de la membrana de la célula genera una diferencia de potencial osmótico que resulta en el colapso de la célula debido a la salida de agua hacia afuera de la célula vegetal (Majid y Ballard, 1990). La propensión para las ‘quemaduras salinas’ depende de la solubilidad y formación de especies con carga; la concentración del fertilizante aplicado; y de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, velocidad del viento) que influyen en la velocidad de evaporación y por lo tanto en la concentración de la pulverización foliar sobre la superficie de la hoja. Dado que el gradiente de concentración es la fuerza que impulsa la penetración a través de la cutícula de la hoja, la primera y más fuerte barrera que limita la absorción foliar de nutrientes (Schönherr, 2001; Swietlik y Faust, 1984) es un desafío clave para el uso de fertilizantes foliares equilibrar la necesidad de una alta solubilidad con los riesgos de las ‘quemaduras salinas’.

Un factor adicional es el daño potencial causado por el suministro de altas concentraciones de sales con bajos puntos de deliquesencia (POD) como se discutió en el Capítulo 4 y fue sugerido por Burkhardt (2010). La pulverización de sales nutrientes con baja POD puede llevar al quemado de la hoja en condiciones que favorecen el proceso de absorción foliar. Esta toxicidad puede ser el resultado del daño osmótico causado por la sal fácilmente ionizable y soluble o puede reflejar la toxicidad elemental directa de grandes concentraciones de elementos nutrientes o iones acompañantes asociados que entran al espacio celular. Teniendo en cuenta la función de los mecanismos que sirven para mantener las concentraciones de iones metálicos dentro de las tolerancias muy

ajustadas en las células (Brown y Bassil, 2011) tal vez no sea sorprendente que la entrada rápida de elementos después de la fertilización foliar podría conducir a respuestas tóxicas.

Uno de los principales problemas asociados con la nutrición foliar de P ha sido la limitada cantidad de un compuesto determinado de P que se puede aplicar sin dañar al follaje a través de una alta carga de nutrientes (Barel y Black, 1979a; Barel y Black, 1979b), aunque la evidencia sugiere que el daño es predominantemente el resultado de un desequilibrio de nutrientes bajo las gotas del fertilizante antes que a efectos osmóticos (Marschner, 1995). Se han observado quemaduras de hojas (Parker y Boswell, 1980), pero no es perjudicial para la planta. Sin embargo, algunos estudios han dado lugar a graves quemaduras de las hojas que resultan en la muerte de gran parte o de la totalidad de las hojas, lo que reducen los rendimientos luego de los tratamientos de aplicación foliar. Se reportó que un estudio que empleó mezclas pulverizadas de urea, KH_2PO_4 y polifosfato de amonio disminuyó significativamente el rendimiento de soja (Parker y Boswell, 1980) debido a la excesiva carga salina de las tres aplicaciones sucesivas de fertilizante foliar dando como resultado severas quemaduras de las hojas. Un gran número de compuestos de P se aplicaron a cultivos de maíz y de soja para determinar la cantidad máxima que podría aplicarse sin dañar a las hojas (Barel y Black, 1979a; Barel y Black, 1979b). Los mejores compuestos (más seguros) para el maíz fueron $[(\text{NH}_4)_5\text{P}_3\text{O}_{10}]$ seguido de $[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$ y luego $\text{PO}(\text{NH}_2)_3$. La soja fue más sensible a la escaldadura, tolerando entre el 60 y el 75% menos de compuesto que el maíz en la mayoría de los casos (Noack *et al.*, 2011).

Todavía hay mucha incertidumbre acerca de los efectos del bajo volumen (dosis de agua) de aplicación en la absorción foliar y la posible fitotoxicidad debido a los efectos de la mayor concentración de solutos. Se ha reportado que el aumento de la concentración de la solución de pulverización de diferentes compuestos minerales mejora la concentración foliar de nutrientes como el P, K, Mg y el Cu (Swietlik y Faust, 1984) y el Mn (Thalheimer y Paoli, 2002). La principal razón del aumento observado en la absorción de Mn y Mg con reducidos volúmenes de agua es el aumento de la concentración de nutrientes en las gotitas de pulverización (Thalheimer y Paoli, 2002). En el caso del Mn, y en menor medida del Mg, hubo un aumento de la concentración foliar de nutrientes a medida que el volumen de agua disminuyó desde 1500 L ha^{-1} hasta 500 L ha^{-1} , mientras que una reducción adicional a 300 L ha^{-1} no dio lugar a ningún incremento superior posterior. Probablemente esto se debe a que se alcanzó un umbral superior cuando los aumentos del gradiente de concentración ya no son más efectivos para aumentar la penetración cuticular, tal vez como resultado de secado más rápido de las gotitas cada vez más pequeñas.

El papel de las quemaduras salinas en la definición de la eficacia de los fertilizantes foliares está muy bien ilustrado por el cloruro de K. El cloruro de potasio es fertilizante de K más común aplicado al suelo, pero su índice salino es relativamente alto ~ 120 (Mortvedt, 2001) y su POD de 86% (Schönherr y Luber, 2001) limitan su uso como fertilizante foliar en particular porque el POD alto con lleva una más rápida cristalización luego de las pulverizaciones foliares. Se evaluó la eficacia de seis fuentes de K foliar (KCl, KNO_3 , MKP, K_2SO_4 , KTS y complejo glicina -amino-ácido de K) en parámetros

de calidad de frutos de melón cultivados a campo, y no se observaron problemas de fitotoxicidad con ninguna de las fuentes foliares de K o concentraciones utilizadas (Jifon y Lester, 2009). Cuando los niveles de pH de las soluciones de pulverización variaron desde 6.5 hasta 7.7. Las soluciones de fuentes de K sin búfer tuvieron tendencias a niveles de pH alcalino que puede causar quemaduras en las hojas y esto es más pronunciado cuando se aplicaron durante condiciones climáticas secas y cálidas (Swietlik y Faust, 1984).

Las sales presentes en las pulverizaciones foliares pueden actuar de forma sinérgica para causar daños salinos. Las lesiones puede ser causadas directamente por absorción foliar y la acumulación de sales en las aguas de riego y en las aplicaciones foliares. La pulverización con una solución de 10 meq Cl^- causó síntomas de lesiones a las hoja (Maas, 1982), pero el grado de daño dependió de la relación Ca:Na dado que el CaCl_2 sólo fue más tóxico que el NaCl, pero a concentraciones más bajas (1-3 meq L^{-1}) redujo las lesiones foliares inducidas por el NaCl. Los efectos altamente tóxicos de las soluciones de CaCl_2 pueden resultar directamente de la marcada acumulación de Ca^{2+} o indirectamente del desequilibrio iónico causado. Dado que el Na^+ es mucho más permeable que el Ca^{2+} , y el Cl^- es altamente permeable, la aplicación de CaCl_2 puede inducir un desbalance de carga local porque el flujo de Cl^- supera ampliamente los flujos de Ca^{2+} hacia la hoja. Sin embargo, los efectos beneficiosos de bajas concentraciones de Ca^{2+} son valiosos, notando que una mezcla que contiene 1 meq CaCl_2 y 24 meq de NaCl por litro fue notablemente menos tóxica que 25 meq NaCl L^{-1} . Esto fue verdad a pesar de concentraciones ligeramente superiores de Ca^{2+} , Na^+ y Cl^- en el mismo tejido. La velocidad de absorción de los iones en función de la concentración de sales, aumenta rápidamente en la película de la solución que se evapora desde las hojas y la sal se concentra. Las lesiones parecen estar relacionadas con la acumulación excesiva de Na^+ o de Cl^- . La toxicidad de la solución de NaCl puede reflejar una deficiencia en Ca, la que es importante para mantener la integridad de la membrana.

Además del efecto salino, hay crecientes evidencias que sugieren que la entrada rápida de los iones nutrientes del fertilizante foliar a los espacios metabólicos de la planta pueden dar lugar a la interrupción del metabolismo normal. El potencial de toxicidad directa es mayor con fertilizantes foliares que son rápidamente asimilados dentro de la hoja como la urea. Una alta velocidad de penetración es un requisito previo para una nutrición foliar efectiva y la urea, por sus características, incluyendo su carácter no iónico, normalmente es rápidamente absorbida (Hill-Cottingham y Lloydjones, 1975). También se cree que las quemaduras observadas dependen de la forma del fertilizante nitrogenado que se utiliza. La urea es menos probable que cause quemaduras en el follaje en comparación con otros fertilizantes de N, ya que tiene un menor índice salino y es más rápidamente absorbida dentro de la hoja, adonde está sujeta a diluirse y metabolizarse (Hanway y García, 1976).

Las quemaduras en las hojas comúnmente observadas después de la fertilización foliar de soja de con urea, resulta de la acumulación de cantidades tóxicas en la hojas antes que a un efecto salino, o de la formación de cantidades tóxicas de amoníaco por la hidrólisis de la urea en presencia de ureasa en las hojas (Bremner, 1995; Krogmeier *et al.*, 1989). La mayoría de los estudios de fertilización foliar de soja durante el desarrollo

de los granos han dado resultados decepcionantes. Por ejemplo, en la revisión de Gray y Akin (1984) la fertilización foliar de soja por lo general llevó a disminuciones del rendimiento y, en cierta medida, a necrosis en las puntas de las hojas. Las quemaduras de las hojas son en parte responsables de la reducción de rendimientos observados después de la fertilización foliar (Poole *et al.*, 1983a; Poole *et al.*, 1983b). Las quemaduras de las hojas aumentan con la baja humedad y las altas temperaturas, lo que lleva a la acumulación de la solución fertilizante muy concentrada en la superficie de las hojas (García y Hanway, 1976).

Entre los factores que afectan la penetración foliar de la urea, su concentración en la solución de pulverización juega un papel importante (Toselli *et al.*, 2004). La absorción de N por la hoja fue mayor dentro de las 48 horas cuando la urea se pulverizó a la concentración más baja. Sin embargo, al final del período de estudio (120 horas) no hubo diferencias en el porcentaje del N interceptado recuperado en las hojas. El comportamiento higroscópico de la urea, que tiene una humedad relativa crítica del 70% (Glendinnig, 1999), y la alternancia entre la alta y la baja humedad relativa del aire, probablemente haya causado el hinchado de la cutícula de la hoja promoviendo la absorción de urea (Eichert y Burkhardt, 2001). Se sabe que los ciclos repetidos de humedecimiento y secado pueden facilitar la penetración cuticular de las soluciones acuosas. Así, luego de unos días, el volumen de pulverización de agua no afecta sustancialmente la absorción de urea. Una vez que la urea aplicada por vía foliar es absorbida por las hojas, se convierte en amoníaco por la enzima ureasa, y luego se incorpora en el glutamato por la enzima glutamina sintetasa (Witte, 2011). La eficacia de la urea como fertilizante foliar puede ser mejorada, y su toxicidad reducida, con la adición de Ni, que es un componente esencial de la enzima ureasa requerida para el metabolismo de la urea (Eskew y Welch, 1982; Gheibi *et al.*, 2009; Krogmeier *et al.*, 1991; Nicoulaud y Bloom, 1998).

En melocotón, el umbral de fitotoxicidad se logra con concentraciones foliares de urea aplicada entre 0.5 y 1.0%, y como consecuencia se requieren varias pulverizaciones para satisfacer la demanda de los árboles. Sin embargo la fitotoxicidad disminuye antes de la caída natural de las hojas cuando se pueden usar concentraciones de urea más altas (de 5 a 10%) (Johnson *et al.*, 2001). Además, Tagliavini *et al.* (1998) también informaron que el follaje del melocotonero es capaz de absorber una proporción significativa del N interceptado por la canopia durante las pulverizaciones. Scagel *et al.* (2008) afirmó que cuando los productores pulverizan las plantas con urea en el otoño, las prácticas de fertilización de la primavera puede necesitar modificarse tomando en cuenta este aporte.

La urea aplicada en pulverización foliar se absorbe rápida y eficientemente por las hojas de la mayoría de los cultivos frutales (Johnson *et al.*, 2001). Los estudios han demostrado una eficiencia de absorción y translocación hacia los demás órganos, incluidas las raíces, de alrededor del 48 al 65% de la urea aplicada por vía foliar (Tagliavini *et al.*, 1998). La aplicación foliar de urea de bajo biuret (<0,5%) es bastante común en plantaciones de cítricos de gran escala para proporcionar un suministro adicional de N, sin efectos fitotóxicos (Albrigo, 2002). Por lo tanto la aplicación foliar de urea a los cítricos es una manera eficiente y rentable para suministrar N, lo que influye

enormemente para la mejor calidad y tamaño del fruto, el espesor de la cáscara, el contenido de jugo y el rendimiento de acuerdo con Agabbio *et al.* (1999) y El-y Otmani *et al.* (2002).

Los efectos directos de los iones son factores importantes para determinar la toxicidad de los fertilizantes foliares que contienen Zn, Cu, Fe y Mn, los que generalmente no se encuentran en concentraciones suficientemente altas como para que su aplicación resulte en quemaduras salinas. Sin embargo, éstos pueden alterar el metabolismo en virtud del aumento rápido en la concentración celular de elementos potencialmente tóxicos. Somnez (2006) informó que la aplicación foliar de altos niveles de Cu perturbaban gravemente el crecimiento normal de la planta, resultando en una reducción del rendimiento total, del número de frutos, del peso seco de las raíces y de la altura de las plantas. El cobre es un metal de transición que participa en las reacciones de óxido-reducción, y que en exceso causa sobreproducción de oxi-radicales, los que se cree son el efecto tóxico primario en las células vegetales. Por otra parte, el Cu y otros metales esenciales de transición pueden inducir alteraciones celulares cuando están presentes en niveles tóxicos, y por lo tanto cada uno tiene un sofisticado proceso homeostático interno que podrían ser interrumpido cuando se hacen aplicaciones foliares excesivas (Brown y Bassil, 2011).

Si bien el CuSO_4 tiene un alto índice salino (Tisdale y Nelson, 1975) y por lo tanto una alta tendencia a causar quemaduras osmóticas, en general no se usa como fertilizante foliar a altas concentraciones. Sin embargo, el cobre se aplica frecuentemente como fungicida a concentraciones muy por encima de lo que se requiere para satisfacer la demanda de nutriente, y en condiciones que pueden causar fitotoxicidad (Majid y Ballard, 1990). Del mismo modo, el ZnSO_4 se utiliza con frecuencia en producción de frutales de hoja caduca (a dosis tan altas como 20 kg ha^{-1} en 100 L) al comienzo del otoño para defoliar los árboles y así reducir el exceso de carga. De esta manera, la toxicidad del ZnSO_4 se considera beneficiosa, si bien deberían examinarse las consecuencias ambientales de tal sobrecarga de metales pesados.

La aplicación foliar de soluciones que contienen altos niveles de B causaron aumentos relativamente pequeños en las hojas/planta de B, pero tuvo efectos negativos considerables sobre el crecimiento de la planta (Ben-Gal, 2007). Los mayores síntomas de toxicidad y disminución de los rendimientos encontrados en plantas con sobre-aplicación de B, implica que la relativa toxicidad del B que entra a través de las hojas es mayor que la del B que entra a través de las raíces. Esto es posible dado que un mayor porcentaje del B total en las hojas que reciben aplicaciones foliares existiría en forma soluble intercelular, en contraste con el B que predomina unido a las paredes celulares B en plantas deficientes de B (Hu y Brown, 1994). Se ha informado que el B soluble desempeña un papel importante en la aparición de la toxicidad de B (Wimmer *et al.*, 2003) dado que es el que más probabilidades tiene de estar involucrados en los procesos fisiológicos (Brown *et al.*, 2002). Los resultados de Nable *et al.* (1990) y de Ben-Gal y Shani (2002) implican que los valores absolutos de B en la biomasa vegetal no son confiables para juzgar o predecir el daño de B.

La aparición de fitotoxicidad después de la aplicación de fertilizantes foliares representa una gran amenaza jurídica y financiera a la industria de los fertilizantes

foliares y a la productividad del agricultor. El desarrollo de mecanismos para evitar la fitotoxicidad, y a la vez manteniendo la eficacia es, por lo tanto, una cuestión de enorme importancia. El grado en que la presencia de síntomas de fitotoxicidad resulta en pérdida de rendimiento es poco conocida, con frecuencia impredecible y altamente sensible al tipo de cultivo y al producto foliar utilizado. Pequeñas manchas en un cultivo de alto valor por ejemplo ornamental (flores, plantas de hojas), u hortícolas (melocotones, cerezas, melones, etc.), pueden resultar en la completa pérdida de la cosecha comercializable, mientras que una grave fitotoxicidad en cultivos de campo puede tener poco o ningún efecto negativo en el rendimiento.

Se han sido utilizados varios enfoques para reducir la fitotoxicidad de los fertilizantes foliares; siendo el más importante la conducción de diversos y cuidadosos ensayos de campo y experimentos bajo ambiente controlado para asegurar que las dosis de los productos utilizados sean seguros y se pueden recomendar a todos los cultivos potenciales y ambientes de producción. La modificación de la dosis de los productos se puede lograr con la dilución y/o co-formulación con aditivos para optimizar, entre otros aspectos, el pH de la solución pulverizadora, la reducción del índice salino o la alteración de la velocidad de distribución y de secado de los materiales de la pulverización sobre la superficie de las hojas. Debería tenerse cuidado en asegurarse que prevenir la posible fitotoxicidad de una pulverización foliar no dé lugar a la disminución de la capacidad de la formulación para servir como una fuente efectiva de nutrientes.

La toxicidad de las aplicaciones foliares es una cuestión extremadamente importante pero se trata de un proceso poco conocido.

- La toxicidad puede ser el resultado de efectos osmóticos o directos elementales.
- La toxicidad osmótica es el resultado de la deshidratación de las células debido a la pérdida de agua hacia una solución salina extracelular.
- La toxicidad elemental se produce cuando el exceso de un elemento esencial o su contra-ión entra en el espacio metabólico, un proceso que también es muy poco conocido.
- La aparición de toxicidad elemental es una indicación de la concentración excesiva de la formulación para proporcionar nutrientes a las células vegetales.

5.7. Conclusiones

Dada la gran complejidad e incertidumbres teóricas que rigen la fertilización foliar, los ensayos a campo y la experimentación con ambientes controlados continuará jugando un papel fundamental en la adaptación de la teoría a la práctica de campo. Igualmente importante es el reconocimiento que los resultados obtenidos de los ensayos de campo no pueden generalizarse sin considerar las condiciones específicas que prevalecieron durante el ensayo y las características del cultivo y su manejo.

Las observaciones y los conclusiones derivadas de los resultados de los ensayos de campo no siempre pueden explicarse por los principios físicos y químicos conocidos

y que la eficacia predicha sobre la base de la experimentación de laboratorio sugiere que aún queda mucho por aprender. Independientemente de esto, la mayor probabilidad de éxito en el logro de la óptima eficacia de las prácticas de fertilización foliar inevitablemente se realizará a través de la aplicación y comprensión de sólidos principios físicos, químicos y biológicos.

Certezas

- La aparición de fitotoxicidad en las plantas luego de la aplicación foliar es inaceptable para la mayoría de los productores y fabricantes de fertilizantes.
- Para algunos cultivos, especialmente aquellos con una alta dependencia de la calidad visual, hay tolerancia cero para la toxicidad.
- El ambiente, los cultivos y la formulación interactúan todos influyendo en la aparición de toxicidad.
- La toxicidad puede ser el resultado de perturbaciones osmóticas, elementales o metabólicas.

Incertezas

- Niveles bajos a moderados de toxicidad pueden indicar la eficacia de nutrientes foliares, ser de naturaleza transitoria y por lo tanto, no es un motivo de preocupación.
- No se sabe si los nutrientes de aplicación foliar se comportan de igual modo que los nutrientes derivados del suelo una vez que entran en la planta.
- No se sabe si los nutrientes de aplicación foliar pueden ser re-translocados mejor que los nutrientes derivados del suelo.
- No se sabe si el ión contraparte, u otras moléculas presentes en la formulación, junto con el elemento nutritivo, entran en la hoja y tienen un efecto metabólico perceptible en el rendimiento de los cultivos.

Oportunidades

- Hay necesidad de desarrollar un enfoque de evaluación de riesgos para la fertilización foliar que integre el potencial de aparición de una deficiencia transitoria pero crítica, con la probabilidad de obtener un resultado positivo y el riesgo de un resultado negativo (toxicidad) basada en la formulación, las condiciones del cultivo y el ambiente al momento de la aplicación.
- Se requieren metodologías, tanto experimentales como basadas en modelos, para predecir el rendimiento, así como del potencial del fertilizante foliar para causar daño por fitotoxicidad.
- Se requieren metodologías para medir la translocación de los nutrientes hacia el espacio metabólico.
- Existe la necesidad de demostrar si las moléculas introducidas (co-formuladas) junto con los apropiados elementos nutrientes proveen algún beneficio, o puedan causar daños a la planta.

6. Consideraciones regulatorias y ambientales

En este capítulo proporcionaremos un breve recuento de la situación de la aplicación foliar de nutrientes en el marco de las regulaciones existentes sobre fertilizantes con énfasis en el impacto ambiental asociado con la fertilización foliar.

6.1. Asuntos regulatorios

El panorama general de la legislación actual de fertilizantes ha sido escrito sobre la base de las discusiones con el profesor José Juan Lucena (Universidad Autónoma de Madrid). En la actualidad no existen reglamentos específicos para fertilizantes foliares distintos de los demás fertilizantes tanto en la Unión Europea (UE) como en Estados Unidos (EE.UU.). Las regulaciones vigentes para los fertilizantes varían según los países y a veces entre estados del mismo país, no hay en la actualidad o protocolos estándares o generales acordados para la designación de productos químicos como fertilizantes. Por ejemplo, en Estados Unidos hay actualmente muchos productos certificados como fertilizantes que todavía no están permitidos para su uso en la Unión Europea. Esto es especialmente cierto en el ámbito de productos aceptables para su uso en agricultura orgánica. Una consecuencia de estas directrices incongruentes es que los fabricantes deben registrar los productos separadamente y los agricultores deben validar la eficacia de todos los productos en cada jurisdicción. Por ejemplo, los términos «complejo» o «quelato» son ampliamente utilizados en toda la industria, pero como no se requiere que estos términos sean utilizados de acuerdo con su significado químico real, la lectura de estos términos en las etiquetas de los productos o materiales debería ser interpretada con precaución.

En la UE, la regulación (EC) N° 2003/2003 y sus posteriores modificaciones técnicas conocidas de ATP (Adaptations to Technical Progress) se utilizan para aprobar los fertilizantes que cumplen con estas condiciones. Desde el año 2003 un gran número de enmiendas (una quinta y sexta por aparecer en breve) han sido aprobadas y posteriormente implementadas con el objetivo de promover la pureza y la eficacia de los fertilizantes, así como la estandarización de los productos y técnicas analíticas para evaluar su calidad. China, India, Australia y algunos otros países tienen reglamentos vigentes para asegurar la calidad y la eficacia de los fertilizantes en mayor o menor grado. En EE.UU., los reglamentos indican laudatoriamente que las etiquetas o marbetes de los fertilizantes reflejen con exactitud el contenido de nutrientes y que solo cumplan con los estándares de contaminación por metales pesados. Actualmente, no existe

una normativa en EE.UU. que exija una demostración de la eficacia de un producto fertilizante como fuente de nutriente.

La Legislación Europea de Fertilizantes cumple con los requisitos legales establecidos en todos los países europeos, pero que puede ser reemplazada por las reglamentaciones nacionales de fertilizantes que pueden permitir o no el uso de compuestos de nutrientes que no están reguladas por la Unión Europea. La regulación de los fertilizantes dentro de los países europeos permite la aparición de “ventanas legales” para introducir productos que de otra forma no serían permitidos por la Regla (CE) N° 2003/2003 y su consecuente ATP.

6.2. Consideraciones ambientales y de calidad alimentaria

En términos generales, y cuando se aplican solos, el impacto ambiental de los fertilizantes foliares es menor que el de la mayoría de los fertilizantes aplicados al suelo y de los productos de protección vegetal aplicados por vía foliar. Principalmente porque las cantidades aplicadas son más bajas y el riesgo de contaminación del suelo o del agua se reduce al mínimo. Sin embargo, dado que los sprays agrícolas con frecuencia se suministran junto con mezclas de agroquímicos que pueden incluir nutrientes foliares y productos fitosanitarios juntos, se debe tener cuidado en evitar la contaminación ambiental. En el Capítulo 5, se discutió la tecnología de la aplicación foliar refiriéndose a las crecientes preocupaciones por la deriva de productos fitosanitarios lo que está dando lugar a la aplicación gradual de políticas de control en muchas regiones del mundo, como describen Hewitt (2008) y Van Zande *et al.* (2008a). Estas restricciones pueden impactar el uso de fertilizantes foliares tanto limitando su uso en las mezclas en el tanque con otros agroquímicos, e indirectamente, afectando la percepción pública acerca de las actividades de pulverizaciones de campo en general.

Los nutrientes aplicados por vía foliar pueden beneficiar al medio ambiente mediante la mejora de la eficacia de los productos fitosanitarios. Se ha demostrado en varias investigaciones el efecto sinérgico de los nutrientes minerales cuando se aplican en combinación con productos fitosanitarios (Dordas, 2009; Elattal *et al.*, 1984; Moustafa *et al.*, 1984; Simoglou y Dordas, 2006). Además se han descrito efectos de protección fitosanitaria de varias soluciones de macro y micro-nutrientes por aplicación foliar, incluyendo compuestos basados en silicio, en especial en relación con el control de enfermedades fúngicas (Dordas, 2009; Reuveni y Reuveni, 1998a; Reuveni y Reuveni, 1998b). Recientemente, Deliopoulos *et al.* (2010) revisaron la literatura existente para analizar el efecto de 34 sales inorgánicas (principalmente bicarbonatos, fosfatos, silicatos, cloruros y fosfitos) respecto a reducir la severidad de 49 enfermedades fúngicas en 35 especies vegetales, y concluyeron que en general fueron menos eficaces para el control de las enfermedades fúngicas que los fungicidas convencionales, los cuales no pueden ser sustituidos totalmente. Sin embargo, se sugirió que como una estrategia de manejo de las enfermedades, la aplicación de sales inorgánicas puede permitir una reducción del número de aplicaciones de fungicidas convencionales necesarios (Deliopoulos *et al.*, 2010), y que el suministro de nutrientes puede mejorar los mecanismos de

tolerancia o resistencia de la planta huésped a los patógenos (Dordas, 2009). Una nutrición equilibrada es claramente una componente esencial de cualquier programa de protección integrada de cultivos (Datnoff, 2007), pero se requieren más investigaciones para alcanzar plenamente el potencial de las pulverizaciones foliares de elementos minerales como herramientas para reducir el efecto del estrés biótico en plantas.

Los fosfitos han sido reconocidos por tener propiedades antifúngicas, pero hay algunas controversias en relación al potencial de estos productos químicos para proporcionar P a las plantas (Lovatt, 1990). Se ha sugerido recientemente que no debería ser clasificado como fertilizante foliar debido al alto riesgo de fitotoxicidad derivado de su aplicación (Ratjen y Gerendas, 2009).

- Los fertilizantes foliares se aplican con frecuencia solos y como tales tienen un bajo impacto ambiental.
- Cuando se aplican en conjunto con otros productos fitosanitarios asociados pueden ocurrir problemas con la deriva de la pulverización.
- Los fertilizantes foliares pueden tener un efecto sinérgico cuando se aplican junto con fungicidas o pesticidas.
- Se han reportado que varios compuestos foliares inorgánicos limitan el efecto de estrés biótico en plantas.

Sólo unos pocos estudios informaron la presencia de residuos de pulverización foliar y daños posteriores a la comercialización y a la seguridad de productos hortícolas. La aplicación durante la estación de fertilizantes a base de P foliar en manzanos condujo a la aparición de residuos ácidos de P en las manzanas al momento de la cosecha (Malusa y Tosi, 2005; Tosi y Malusa, 2002). Crisosto y Cheng (1994) demostraron que concentraciones elevadas de contaminantes de Fe y Al superficiales, en combinación con la abrasión (como puede ocurrir durante el transporte de los frutos), indujo desordenes del tipo de “piel manchada de tinta” en melocotones y nectarinas. A la luz de estas observaciones, Crisosto *et al.* (1999) recomendó evitar la aplicación de pulverizaciones foliares de nutrientes que contengan estas metales pesados, en particular Fe, pero en menor grado Cu y Al en orden decreciente para evitar la inducción del desorden “piel manchada de tinta” del fruto dentro de los 22 días antes de la cosecha.

- En general cuando se aplican solos, los fertilizantes foliares no son propensos a causar problemas de seguridad alimentaria o producir riesgos de comerciabilidad.

El efecto beneficioso de la aplicación de pulverizaciones foliares de nutrientes en términos de una mejor efectividad y limitada contaminación ambiental en comparación con los fertilizantes aplicados al suelo ha sido ilustrada por varios autores (Kannan, 2010). Johnson *et al.* (2001) sugirió que el suministro de N para árboles de melocotón utilizando una combinación de suelo y fertilizantes foliares de N conduce a respuestas óptimas de las plantas y limitados riesgos de contaminación ambiental. Este enfoque también ha sido apoyado por otros (Dong *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2005b), que

demostraron la eficacia de aplicaciones foliares de urea en el otoño como estrategia para aumentar las reservas de N del árbol y limitar los problemas de lixiviación de N-NO_3^- asociados con la fertilización de N al suelo. Stiegler *et al.* (2011) midió pérdidas mínimas de N-NH_3 por volatilización. Cuando la urea se aplicó al follaje herbáceo de céspedes de crecimiento activo. Los autores destacaron el potencial de minimizar las pérdidas de N al ambiente y aumentar así la eficiencia de la aplicación a través del uso de la fertilización foliar de N en campos de golf de alta densidad. Una relación similar de eficacia entre la fertilización foliar y el suelo de K se demostró en olivos de secano cultivados en regiones áridas y semi-áridas (Restrepo-Díaz *et al.*, 2009) para evitar problemas asociados con una baja absorción de K por las raíces en condiciones de limitada humedad del suelo. Del mismo modo, puede ser beneficiosa la nutrición foliar de P en cultivos de cereales de secano cuando las capas superficiales del suelo se secan reduciéndose por lo tanto la eficacia de las aplicaciones de P a la superficie (Noack *et al.*, 2011).

- La fertilización foliar tiene un bajo riesgo ambiental en contraste con las aplicaciones al suelo.
- Los nutrientes son entregados directamente a los órganos que los requieren mediante la aplicación de aspersiones de nutrientes.
- Una combinación de tratamientos de fertilizantes foliares y al suelo pueden ayudar a aumentar la eficiencia de absorción de nutrientes y limitar la contaminación del suelo, particularmente con elementos tales como N y/o P.

6.3. Conclusiones

En este capítulo, se han evaluado aspectos relacionados con la regulación de los fertilizantes foliares y sus riesgos potenciales sobre la calidad del ambiente y los alimentos. A la luz de los conocimientos y su comprensión actuales, se abordan las siguientes certezas, incertidumbres y oportunidades para la regulación y el riesgo potencial de los fertilizantes foliares.

Certezas

- Actualmente no hay reglamentos específicos que gobiernen el uso de los fertilizantes foliares.
- Los productos se clasifican de acuerdo a una lista de ingredientes activos permitidos como fertilizantes.
- Cuando se aplican solos, los fertilizantes foliares tienen un bajo impacto ambiental.
- Con frecuencia se aplican conjuntamente mezclas de productos de protección de cultivos y de fertilizantes con la consiguiente deriva de la pulverización y riesgo de contaminación.
- Ciertos compuestos de elementos nutrientes pueden tener un efecto sinérgico cuando se aplican junto con fungicidas o insecticidas.

- Algunos compuestos de elementos nutrientes pueden tener un efecto de protección del cultivo (por ejemplo, fungicida) cuando se pulverizan a las plantas.
- Los fertilizantes foliares de nutrientes aplicados solos en general no representan riesgos para la seguridad alimentaria.
- Muchos informes proporcionan evidencias del menor impacto ambiental de las pulverizaciones foliares comparadas con los tratamientos al suelo.

Incertidumbres

- Dado que no hay actualmente regulaciones específicas para los fertilizantes foliares es difícil de estandarizar los muchos productos fertilizantes foliares disponibles en el mercado.
- El proceso de introducir nuevos fertilizantes foliares al mercado es complejo.
- Los efectos combinados de los productos de protección de cultivos/fertilizantes no se pueden predecir con anticipación.
- Varios informes proporcionan evidencias del efecto beneficioso de la pulverización de soluciones de elementos nutrientes al follaje como una herramienta para el control de enfermedades de las cultivos, pero hasta ahora los mecanismos involucrados no son completamente entendidos.
- El uso de fertilizantes foliares como una estrategia complementaria para reducir las aplicaciones al suelo y la polución no ha sido plenamente explotado en la producción agrícola.

Oportunidades

- Mediante la introducción de regulaciones específicas para fertilizantes foliares podría ser posible estandarizar y clasificar los productos comercialmente disponibles y así enfocar mejor la investigación científico y la práctica a campo para optimizar las ventajas generales y la eficacia de las pulverizaciones foliares de nutrientes.
- El conocimiento del efecto sinérgico de ciertos compuestos de nutrientes vegetales cuando se aplican junto con productos fitosanitarios puede ayudar a optimizar la concentración de agroquímicos aplicados a las plantas y por lo tanto reducir su impacto ambiental.
- El efecto beneficioso de la aplicación foliar de nutrientes en la reducción del estrés biótico de las planta debería ser mejor aclarado e implementado por la agricultura.
- El bajo riesgo de seguridad alimentaria y ambiental de los fertilizantes aplicados por vía foliar han resultado ventajosos para la producción hortícola y agrícola en general.
- Como estrategia complementaria a los tratamientos al suelo las pulverizaciones foliares de nutrientes pueden ayudar a reducir el escurrimiento y la lixiviación de nutrientes de los suelos y reducir así la contaminación de las napas freáticas.

7. Perspectivas de la fertilización foliar

La fertilización foliar ha sido ampliamente adoptada en el manejo moderno de los cultivos, donde se emplea para garantizar el rendimiento óptimo cuando el suministro de los nutrientes para el cultivo desde el suelo es inadecuado o incierto. Los fertilizantes foliares ofrecen ventajas específicas sobre fertilizantes para el suelo cuando la demanda de los nutrientes por las plantas exceden la capacidad de absorción de éstos por las raíces; cuando la movilidad de los elementos limita el transporte hacia los tejidos de la planta; y cuando las condiciones ambientales limitan la efectividad o impiden la aplicación de los nutrientes al suelo. En muchos sistemas de producción con aversión al riesgo y de alto valor, los fertilizantes foliares se comercializan como un “seguro” para minimizar los posibles impactos de impredecibles deficiencias de nutrientes.

El suministro de nutrientes por fertilización foliar representa un costo significativo (por kg de elemento aplicado) y requiere una cuidadosa consideración del beneficio relativo por sobre las aplicaciones de fertilizantes convencionales de suelos. La determinación de la relación costo-beneficio de los fertilizantes foliares no es trivial y requiere una evaluación realista del riesgo económico de la presencia de una deficiencia de nutrientes; la cuantificación de la eficacia biológica del fertilizante foliar; y la consideración de todos los costos de la aplicación (por ejemplo, la pulverización). Si bien es sencillo estimar los costos de la aplicación y la pérdida de rendimiento, es mucho más difícil de determinar: 1) la probabilidad de que una deficiencia de nutrientes económicamente relevante pueda producirse durante el ciclo de cultivo; y 2) la eficacia biológica del fertilizante foliar aplicado. Dado el uso generalizado de los fertilizantes foliares y el costo de estas prácticas, es notable que haya muy pocos ejemplos en los que la viabilidad económica de los fertilizantes foliares haya sido críticamente evaluada. Por lo menos esto es parcialmente una consecuencia de la dificultad de conocer con precisión el verdadero riesgo de que se produzca una deficiencia de nutrientes económicamente importante, así como también la incertidumbre acerca de la eficacia de los materiales utilizados como solución foliar en el tratamiento de los efectos de esa deficiencia. El objetivo de este libro es proporcionar una idea de estas dos incertidumbres de modo que puedan tomarse decisiones sobre una base de mayor información y se puedan desarrollar mejores prácticas.

Como se ilustró en los capítulos anteriores hay una buena dosis de complejidad en determinar si las plantas en un ambiente determinado tienen potencial de experimentar una demanda de nutrientes que no pueda ser adecuadamente abastecida por los nutrientes del suelo. Igual complejidad existe para predecir si una aplicación foliar determinada suministrará adecuadamente los nutrientes necesarios de manera oportuna. Independientemente de estas complejidades la comprensión fundamental de los principios de la fertilización foliar ayudará a minimizar la incertidumbre y mejorar la eficacia de la fertilización foliar en la producción moderna de cultivos.

Los factores que gobiernan la ‘demanda’ de las plantas por los fertilizantes foliares y los factores que rigen la capacidad de una formulación foliar de nutrientes para ‘ofertarlos’ se resumen en lo siguiente:

Demanda: la fertilización foliar es aplicable si prevalecen alguna de las siguientes situaciones:

- Cuando la demanda de las plantas es superior a la capacidad de la planta de absorber nutrientes. Esto se da cuando.
 - Las condiciones del suelo limitan la solubilidad de los nutrientes o su acceso por las raíces como consecuencia de un pH desfavorable o la composición química del nutriente; exceso de concentración en el suelo de iones competidores; condiciones desfavorables para el crecimiento de las raíces; o condiciones del ambiente del suelo que limitan la absorción de nutrientes (temperatura, humedad o contenido de oxígeno desfavorables).
 - Una limitante de la capacidad de absorción como consecuencia de la fenología de la planta tal como por ejemplo durante principios de la primavera cuando muchas especies de hoja caduca florecen y fructifican durante periodos de temperaturas desfavorables del suelo.
 - Durante los periodos picos de requerimientos de nutrientes tales como durante el rápida crecimiento del fruto cuando la demanda de nutrientes puede exceder la capacidad de las raíces para suministrar los nutrientes adecuados, incluso en suelos bien fertilizados.
- Cuando la demanda localizada interna excede la capacidad de re-distribución de nutrientes dentro de la planta.
 - Esto ocurre comúnmente en las proximidades de grandes racimos de frutas y nueces, o durante el llenado de grano o el desarrollo de los tejido de almacenamiento, y se relaciona tanto con una demanda muy localizada de elementos (en particular N y K) o como consecuencia de la baja movilidad en el floema de ciertos elementos (en particular Ca y B).
 - La movilidad de un elemento dentro de la planta también puede estar limitado si la floración precede a la expansión de las hojas y de esta manera se limita el transporte de nutrientes por el xilema.
 - Periodos de sequía o de alta humedad pueden limitar el flujo de transpiración por el xilema, así también como restringir el suministro de nutrientes inmóviles por el floema.
- Cuando la demanda de la planta no puede ser satisfecha debido a:
 - Condiciones de campo, costos de aplicación o etapas de crecimiento que impiden el uso de aplicaciones de suelo
 - La percepción de la necesidad de un “seguro” de nutrientes para reducir al mínimo los riesgos potenciales de deficiencias impredecibles de nutrientes

Suministro: la eficacia de la fertilización foliar está determinada por:

- Las características físicas y químicas de los fertilizantes, que determina la cantidad total de nutriente que puede entregarse y la compatibilidad del nutriente con otros productos químicos.
- Las características de las especies y del ambiente de cultivo.
- El uso de aditivos (surfactantes, humectantes, esparcidor/adherentes, etc.) y el método de aplicación.
- El ambiente durante, y después de la aplicación foliar.
- La capacidad de los nutrientes de penetrar en el volumen citoplasmático que está influenciada por las especies; tipo y edad de la hoja; características químicas de los fertilizantes; condiciones ambientales; y método de aplicación.
- La fitotoxicidad de la mezcla de fertilizante foliar que limita la concentración de nutrientes que puede aplicarse.
- La movilidad del nutriente aplicado dentro de la hoja que se determina por su movilidad relativa en el floema, las características de las especies, edad de la hoja e inmovilización del elemento en el sitio de aplicación

En última instancia, la decisión de utilizar fertilizantes foliares requiere la consideración de cada uno de estos factores de oferta y demanda en equilibrio con los costos relativos. En circunstancias en donde el tipo de suelo, sistema de cultivo o el ambiente impiden la aplicación al suelo de los nutrientes necesarios, entonces la fertilización foliar representa una práctica esencial y, como consecuencia, el principal desafío debe ser desarrollar formulaciones y métodos de aplicación foliar que sean tan eficaces y económicos como sea posible. Sin embargo, la mayoría de los fertilizantes foliares no son aplicados bajo circunstancias donde la aplicación al suelo no es posible, sino que son aplicados con la presunción que la aplicación foliar es superior a la del suelo. También es probable que la incertidumbre de saber si la demanda de los fertilizantes foliares, o la eficacia de una formulación, resultan en la utilización ineficiente de los fertilizantes foliares por los productores; o bien aplicarlos cuando no son necesarios; o no hacerlo cuando son indispensables. En tales escenarios, que probablemente representan un gran porcentaje de las condiciones donde se utilizan los fertilizantes foliares, el reto es no sólo desarrollar formulaciones y métodos de aplicación foliar que sean efectivas y económicas como sea posible, sino también desarrollar la metodología para predecir sí y cuando los nutrientes puede llegar a ser limitantes y que no respondan a las aplicaciones de suelo.

La práctica de la fertilización foliar actualmente, es a la vez una ciencia y un arte, y para aquellos que adscriben a la filosofía ‘pulverizar y rezar’ también se asemeja a la fe. Para que la ciencia de la fertilización foliar sea optimizada existe la necesidad sustancial de comprender los factores que rigen la eficacia de los fertilizantes foliares y desarrollar formulaciones y métodos de aplicación que maximicen la probabilidad de una respuesta benéfica.

7.1. Conclusiones

En este libro, hemos proporcionado un análisis integrado de los principios físicos, químicos y biológicos conocidos que influyen en la absorción y utilización de fertilizantes foliares por las plantas, y hemos revisado resultados disponibles de laboratorio y de campo para proporcionar una visión de los factores que determinan en última instancia la eficacia de su aplicación. Nuestro objetivo fue proporcionar un análisis integrado de lo que se conoce y lo que queda por descubrir hacia el logro de la meta de optimizar la utilización de los fertilizantes foliares en la producción moderna de cultivos. Los factores que determinan la eficacia de la fertilización foliar son complejos y abarcan aspectos de la física, la química, el medio ambiente, la biología y la economía, así como los intangibles, como la aversión al riesgo y la facilidad de manejo. Si bien algunos de los principios fundamentales que rigen el uso de fertilizantes foliares se entienden muy bien, hay muchos más acerca de esta tecnología que aún no se ha resuelto o todavía se debe ser descubierta.

Certezas, incertidumbres y oportunidades

En los capítulos previos se han identificado hechos que son conocidos (Certezas); aquellos que son desconocidos o poco claros (Incertidumbres); y las oportunidades que existen para mejorar la práctica de la fertilización foliar mediante la optimización de nuestra comprensión de los factores que gobiernan la demanda de las plantas de los fertilizantes foliares, así como los factores que rigen la capacidad de una formulaciones foliar para suministrar nutrientes. Las incertidumbres más importantes que limitan la utilidad de los fertilizantes foliares son los siguientes:

Con respecto a los factores que rigen la capacidad de una formulación foliar de ‘suministrar’ nutrientes, el conocimiento actual de los siguientes procesos críticos es insuficiente:

- Los mecanismos de penetración cuticular de compuestos polares, hidrofílicos tales como el agua y las sales de nutrientes, no se conocen bien.
- La contribución de la vía de absorción estomática y de otras estructuras epidérmicas como tricomas y lenticelas, para que haya absorción foliar no ha sido adecuadamente investigada en detalle.
- Tenemos escasa comprensión de los fenómenos de contacto entre la formulación de un fertilizante foliar y la superficie de la planta.
- En la actualidad no es posible seleccionar surfactantes, humectantes, esparcidores/ adherentes y otros aditivos que puedan comportarse de forma óptima cuando se mezclan con ciertos fertilizantes foliares. Por lo tanto no es posible predecir a priori la respuesta de las plantas a las formulaciones de fertilizantes foliares sin una comprobación empírica previa.
- Los factores que afectan la estructura y composición de las superficies vegetales y su respuesta a la aplicación foliar no están bien caracterizados y el conocimiento actual es insuficiente para predecir o manipular la respuesta de la planta a la aplicación foliar.

Con respecto a los factores que rigen la demanda de la planta por los fertilizantes foliares el conocimiento actual de los siguientes procesos críticos es insuficiente:

- La incidencia e importancia de las deficiencias 'transitorias' de nutrientes o de otro tipo que no se puedan prevenir mediante la fertilización al suelo no ha sido adecuadamente investigada.
- No se sabe si los nutrientes foliares aplicados, una vez que entran al espacio celular, están más o menos metabólicamente disponibles que los nutrientes adquiridos del suelo.
- El mecanismo de toxicidad de los fertilizantes foliares no está bien entendido.
- No se sabe si los nutrientes de aplicación foliar pueden ser re-translocados con más eficiencia que los nutrientes derivados del suelo.
- Se desconoce la importancia de los iones acompañantes, u otras moléculas presentes en la formulación, en el metabolismo o para el transporte de los nutrientes luego de su entrada a las células vivas.
- La influencia de las pulverizaciones foliares sobre las señales del brote a las raíces, y su posterior crecimiento y absorción de nutrientes desde el suelo, no han sido investigadas adecuadamente.

Hay claras oportunidades para mejorar la eficacia, o ampliar la utilización de los fertilizantes foliares:

- Existe el potencial de utilizar fertilizantes foliares suplementarios en combinación con los fertilizantes aplicados al suelo como estrategia para proporcionar una fertilización más eficiente, amigable con el ambiente, y orientada al objetivo de producir cosechas con mayor calidad, rendimiento y mejor coste-beneficio.
- Sin embargo el potencial de las pulverizaciones foliares de nutrientes como estrategia complementaria para mejorar calidad de los cultivos no se conoce bien en la actualidad y requiere de más investigación.
- La permeabilidad de las superficies de las plantas a las soluciones de nutrientes ofrece la oportunidad de suministrar nutrientes a los órganos de destino, sorteando la absorción radicular y los mecanismos de translocación que a menudo limitan el suministro de los nutrientes de la planta bajo ciertas condiciones de crecimiento y en relación a los elementos inmóviles.
- Hay una creciente evidencia que muestra que las carencias nutricionales pueden dañar la estructura de la planta a veces de forma irreversible y también limitan la capacidad de absorción de nutrientes.
- El agregado de humectantes a las formulaciones de nutrientes foliares para prolongar el proceso de secado de la solución mejora la eficacia de los tratamientos, especialmente en zonas áridas y semi-áridas.
- Hay necesidad del desarrollo de un enfoque de evaluación de riesgos para la fertilización foliar que integre la posibilidad de ocurrencia de una deficiencia transitoria pero crítico, con la probabilidad de un resultado positivo y equilibrado

con el riesgo de un resultado negativo basado en la formulación, condiciones del cultivo y del ambiente al momento de la aplicación.

- Se requieren métodos, tanto experimentales como basados en modelos, para predecir el potencial de toxicidad de que un fertilizante foliar cause daños.
- Mas importante aún, hay una necesidad de coordinar mejor el momento y la formulación foliar para que coincida con los periodos críticos de la demanda de la planta y donde la aplicación foliar puede tener ventajas específicas.

En los capítulos 2 y 4, se describen en detalle los mecanismos de absorción de pulverizaciones de nutrientes foliares en asociación con la estructura y la función de las plantas. También fueron descritos en general las características de la superficie de la planta como una barrera para la entrada de agua y solutos enfatizando en el carácter hidrófobo de la cutícula. La importancia de proporcionar nutrientes en formulaciones que puedan facilitar el proceso de absorción foliar se ha explicado en detalle. Con el fin de garantizar la eficacia de las pulverizaciones de nutrientes foliares, uno de los factores claves que puede ser controlado, y que puede cambiar radicalmente la efectividad de un compuesto nutriente en particular, es el agregado de adyuvantes adecuados. Deberían realizarse esfuerzos para mejorar las propiedades físico-químicas de las formulaciones de pulverización de nutrientes que garanticen la eficacia y reproducibilidad de los tratamientos bajo diferentes condiciones ambientales. Por ejemplo, las aplicaciones foliares en zonas áridas y semi-áridas pueden verse limitadas por el rápido secado de soluciones de pulverización después del tratamiento, y el agregado de humectantes pueden aumentar de manera significativa la tasa de absorción de los nutrientes foliares aplicados.

La investigación y desarrollo en el área de las formulaciones de fertilizantes foliares pueden aumentar el mercado y mejorar la calidad, el rendimiento y la eficacia de los tratamientos foliares. Aparte de mejorar la tasa de absorción de los nutrientes de los fertilizantes foliares los esfuerzos de investigación deberían concentrarse en el análisis del efecto fisiológico de los nutrientes de aplicación foliar sobre el metabolismo y de emisión de señales de la planta. Además, el rol de la fisiología del estrés de la planta en relación con la eficacia de los nutrientes foliares aplicados aún no se comprende bien y debería ser aclarada, ya que con frecuencia se utilizan pulverizaciones foliares para superar deficiencias de nutrientes que son más comunes en zonas áridas y semi-áridas con suelos de alto pH, calcáreos o salinos.

Otros factores clave que influyen en la eficacia de las pulverizaciones de nutrientes foliares son el modo y el momento de aplicación. Por ejemplo para mejorar la absorción, los tratamientos deberían realizarse cuando los estomas están abiertos; la mejora y el desarrollo de tecnologías más eficientes de pulverización aumentarán la eficacia de las aplicaciones de nutrientes cuando se hacen sobre el follaje.

En resumen, la fertilización foliar ya está establecida como una práctica estándar en muchos sistemas de cultivo. El potencial de esta tecnología no está totalmente realizado debido a una inadecuada comprensión de los principios involucrados. No están aclaradas las lagunas de conocimiento que impiden el desarrollo de mejores estrategias de fertilización foliar. Sin embargo, también hay una buena cantidad de

información sobre los mecanismos de absorción, de fisiología vegetal, de físico-química y de formulaciones que no haya sido plenamente aplicada. La fertilización foliar es probable que desempeñe un papel creciente en el mantenimiento del estado nutricional de los cultivos bajo una variedad de situaciones ambientales cuando el suministro de nutrientes del suelo es insuficiente, y durante los períodos de máxima demanda de nutrientes cuando el aporte de los nutrientes aplicados al suelo puede ser inadecuado.

En última instancia, el objetivo debería ser mejorar la capacidad de predecir la probabilidad de una deficiencia de nutrientes económicamente relevante que pueda producirse durante el ciclo de crecimiento del cultivo y optimizar el momento y la eficacia biológica del fertilizante foliar aplicado. Con esta información disponible, un análisis racional del costo/beneficio puede realizarse y efectuarse una adecuada toma de decisión. Además los análisis de este tipo resultarán en un mejor enfoque de los esfuerzos de investigación los que sin duda redundarán en la mejora de las formulaciones de fertilizantes foliares y su aplicación práctica.

8. Referencias

- Abadia, A., F. Ambardbretteville, R. Remy, y A. Tremolieres. 1988. Iron deficiency in pea leaves- effect on lipid composition and synthesis. *Physiol. Plant.* 72:713-717.
- Abadia, J. 1992. Leaf responses to iron deficiency - a review. *J. Plant Nutr.* 15:1699-1713.
- Abadia, J., S. Vazquez, R. Rellan-Alvarez, H. El-Jendoubi, A. Abadia, A. Alvarez-Fernandez, y A.F. Lopez-Millan. 2011. Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis. *Plant Physiology and Biochemistry.* 49:471-482.
- Aerts, R., y F.S. Chapin. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. In *Advances in Ecological Research*, Vol. 30. A.H. Fitter and D.G. Raffaelli, editors. 1-67.
- Agabbio, M., G. Lovicu, M. Pala, G. D'hallewin, M. Mura, y M. Schirra. 1999. Fruit canopy position effects on quality and storage response of "Torocco" oranges. *Acta Horticulturae.* 485:19-25.
- Albano, J.P., y W.B. Miller. 2001a. Ferric ethylenediaminetetraacetic acid (Fe EDTA) photodegradation in commercially produced soluble fertilizers. *Horttechnology.* 11:265-267.
- Albano, J.P., y W.B. Miller. 2001b. Photodegradation of Fe DTPA in nutrient solutions. I. Effects of irradiance, wavelength, and temperature. *Hortscience.* 36:313-316.
- Albano, J.P., y W.B. Miller. 2001c. Photodegradation of Fe DTPA in nutrient solutions. II. Effects on root physiology and foliar Fe and Mn levels in Marigold. *Hortscience.* 36:317-320.
- Albrigo, L.G. 1999. Effects of foliar applications of urea or nutriphite on flowering and yields of Valencia orange trees. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 112:1-4.
- Albrigo, L.G. 2002. Foliar uptake of N-P-K sources and urea biuret tolerance in citrus. *Acta Horticulturae.* 594:627-633.
- Alexander, A. 1985. Foliar fertilization. Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Alexander, A., y M. Schroeder. 1987. Modern trends in foliar fertilization. *J. Plant Nutr.* 10:1391-1399.
- Ali, A.G., y C.J. Lovatt. 1994. Winter application of low biuret urea to the foliage of Washington navel orange increased yield. *Journal of the American Society for Horticultural Science.* 119:1144-1150.
- Allen, M. 1959. Role of the anion in magnesium uptake from foliar applications of its salts on apple. *Nature.* 184:995-995.
- Alva, A.K., S. Paramasivam, A. Fares, T.A. Obreza, y A.W. Schumann. 2006a. Nitrogen best management practice for citrus trees II. Nitrogen fate, transport, and components of N budget. *Scientia Horticulturae.* 109:223-233.
- Alva, A.K., S. Paramasivam, T.A. Obreza, y A.W. Schumann. 2006b. Nitrogen best management practice for citrus trees - I. Fruit yield, quality, and leaf nutritional status. *Scientia Horticulturae.* 107:233-244.

- Alvarez-Fernandez, A., P. Garcia-Lavina, C. Fidalgo, J. Abadia, y A. Abadia. 2004. Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Plant and Soil*. 263:5-15.
- Aranda, I., L.F. Bergasa, L. Gil, y J.A. Pardos. 2001. Effects of relative irradiance on the leaf structure of *Fagus sylvatica* L. seedlings planted in the understory of a *Pinus sylvestris* L. stand after thinning. *Annals of Forest Science*. 58:673-680.
- Arquero, O., D. Barranco, y M. Benlloch. 2006. Potassium starvation increases stomatal conductance in olive trees. *Hortscience*. 41:433-436.
- Badawi, A.M., M.A. Mekawi, M.Z. Mohamed, A.S. Mohamed, y M.M. Khowdairy. 2007. Surface and biological activity of organoammonium hydrogen selenite surfactants. *Journal of Surfactants and Detergents*. 10:257-267.
- Bai, R.Q., T.K. Schlegel, J. Schonherr, y P.W. Masinde. 2008. The effects of foliar applied $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{HO}_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and K_2CO_3 combined with the surfactants glucopon and plantacare on gas exchange of 1 year old apple (*Malus domestica* borkh.) and broad bean (*Vicia faba* L.) leaves. *Scientia Horticulturae*. 116:52-57.
- Baker, E.A. 1974. Influence of environment on leaf wax development in *Brassica oleracea* var gemmifera. *New Phytologist*. 73:955-&966.
- Barel, D., y C.A. Black. 1979a. Foliar application of P. 2. Yield responses of corn and soybeans sprayed with various condensed phosphates and P-N compounds in greenhouse and field experiments. *Agron. J.* 71:21-24.
- Barel, D., y C.A. Black. 1979b. Foliar application of P. 1. Screening of various inorganic and organic P-compounds. *Agron. J.* 71:15-21.
- Barnes, J.D., K.E. Percy, N.D. Paul, P. Jones, C.K. McLaughlin, P.M. Mullineaux, G. Creissen, y A.R. Wellburn. 1996. The influence of UV-B radiation on the physicochemical nature of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaf surfaces. *Journal of Experimental Botany*. 47:99-109.
- Barraclough, P.B., y J. Haynes. 1996. The effect of foliar supplements of potassium nitrate and urea on the yield of winter wheat. *Fertilizer Research*. 44:217-223.
- Barranco, D., H. Ercan, C. Munoz-Diez, A. Belaj, y O. Arquero. 2010. Factors influencing the efficiency of foliar sprays of monopotassium phosphate in the olive. *International Journal of Plant Production*. 4:235-240.
- Barthlott, W., y C. Neinhuis. 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*. 202:1-8.
- Barthlott, W., C. Neinhuis, D. Cutler, F. Ditsch, I. Meusel, I. Theisen, y H. Wilhelm. 1998. Classification and terminology of plant epicuticular waxes. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 126:237-260.
- Basiouny, F.M., y R.H. Biggs. 1976. Penetration of ^{59}Fe through isolated cuticles of citrus leaves. *Hortscience*. 11:417-419.
- Basiouny, F.M., C.D. Leonard, y R.H. Biggs. 1970. Comparison of different iron formulations for effectiveness in correcting iron chlorosis in citrus. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 83:1-6.
- Batten, G.D., I.F. Wardlaw, y M.J. Aston. 1986. Growth and the distribution of phosphorus in wheat developed under various phosphorus and temperature regimes. *Australian Journal of Agricultural Research*. 37:459-469.

- Baur, P., H. Marzouk, y J. Schönherr. 1999. Estimation of path lengths for diffusion of organic compounds through leaf cuticles. *Plant Cell and Environment*. 22:291-299.
- Ben-Gal, A. 2007. The contribution of foliar exposure to boron toxicity. *J. Plant Nutr.* 30:1705-1716.
- Benbella, M., y G.M. Paulsen. 1998. Efficacy of treatments for delaying senescence of wheat leaves: II. Senescence and grain yield under field conditions. *Agron. J.* 90:332-338.
- Beyer, M., S. Lau, y M. Knoche. 2005. Studies on water transport through the sweet cherry fruit surface: IX. Comparing permeability in water uptake and transpiration. *Planta*. 220:474-485.
- Bi, G.H., y C.F. Scagel. 2008. Nitrogen uptake and mobilization by hydrangea leaves from foliar-sprayed urea in fall depend on plant nitrogen status. *Hortscience*. 43:2151-2154.
- Blanco, A., V. Fernandez, y J. Val. 2010. Improving the performance of calcium-containing spray formulations to limit the incidence of bitter pit in apple (*Malus x domestica* borkh). *Scientia Horticulturae*. 127:23-28.
- Blandino, M., y A. Reyneri. 2009. Effect of fungicide and foliar fertilizer application to winter wheat at anthesis on flag leaf senescence, grain yield, flour bread-making quality and DON contamination. *European Journal of Agronomy*. 30:275-282.
- Blanpied, G.D. 1979. Effect of artificial rain water pH and calcium-concentration on the calcium and potassium in apple leaves. *Hortscience*. 14:706-708.
- Bly, A.G., y H.J. Woodard. 2003. Foliar nitrogen application timing influence on grain yield and protein concentration of hard red winter and spring wheat. *Agron. J.* 95:335-338.
- Bondada, B.R., D.M. Oosterhuis, y N.P. Tugwell. 1999. Cotton growth and yield as influenced by different timing of late-season foliar nitrogen fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 54:1-8.
- Bondada, B.R., P.D. Petracek, J.P. Syvertsen, y L.G. Albrigo. 2006. Cuticular penetration characteristics of urea in citrus leaves. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 81:219-224.
- Bondada, B.R., J.P. Syvertsen, y L.G. Albrigo. 2001. Urea nitrogen uptake by citrus leaves. *Hortscience*. 36:1061-1065.
- Boom, A., J.S.S. Damste, y J.W. de Leeuw. 2005. Cutan, a common aliphatic biopolymer in cuticles of drought-adapted plants. *Organic Geochemistry*. 36:595-601.
- Boote, K.J., R.N. Gallaher, W.K. Robertson, K. Hinson, y L.C. Hammond. 1978. Effect of foliar fertilization on photosynthesis, leaf nutrition, and yield of soybeans. *Agron. J.* 70:787-791.
- Borowski, E., y S. Michalek. 2010. The effect of foliar nutrition of spinach (*Spinacia oleracea* L.) with magnesium salts and urea on gas exchange, leaf yield and quality. *Acta Agrobot.* 63:77-85.
- Bouma, D. 1969. Response of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) to foliar applications of phosphorus. *Australian Journal of Agricultural Research*. 20:435-445.
- Bouma, D. 1975. Effects of some metabolic phosphorus-compounds on rates of photosynthesis of detached phosphorus-deficient subterranean clover leaves. *Journal of Experimental Botany*. 26:52-59.

- Bowen, J.E. 1969. Absorption of copper zinc and manganese by sugarcane leaf tissue. *Plant Physiology*. 44:255-261.
- Bowman, D.C., y J.L. Paul. 1992. Foliar absorption of urea, ammonium, and nitrate by perennial ryegrass turf. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 117:75-79.
- Boynton, D. 1954. Nutrition by foliar application. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 5:31-54.
- Brazee, R.D., M.J. Bukovac, y H. Zhu. 2004. Diffusion model for plant cuticular penetration by spray-applied weak organic acid bioregulator in presence or absence of ammonium nitrate. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 47:629-635.
- Bremner, J.M. 1995. Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer. *Fertilizer Research*. 42:321-329.
- Brewer, C.A., W.K. Smith, y T.C. Vogelmann. 1991. Functional interaction between leaf trichomes, leaf wettability and the optical properties of water droplets. *Plant Cell and Environment*. 14:955-962.
- Bringe, K., C.F.A. Schumacher, M. Schmitz-Eiberger, U. Steiner, y E.C. Oerke. 2006. Ontogenetic variation in chemical and physical characteristics of adaxial apple leaf surfaces. *Phytochemistry*. 67:161-170.
- Brown, P., N. Bellaloui, H. Hu, y A. Dandekar. 1999a. Transgenically enhanced sorbitol synthesis facilitates phloem boron transport and increases tolerance of tobacco to boron deficiency. *Plant Physiology*. 119:17.
- Brown, P.H. 2001. Transient nutrient deficiencies and their impact on yield - a rationale for foliar fertilizers? *Acta Horticulturae*. 564:217-223.
- Brown, P.H., y E. Bassil. 2011. Overview of the acquisition and utilization of boron, chlorine, copper, manganese, molybdenum, and nickel by plants and prospects for improvement of micronutrient use efficiency. In *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*. M.J. Hawkesford y P.B. Barraclough, editors. Wiley-Blackwell. 377-429.
- Brown P.H., Bellaloui N., Hu H.N. y A. Dandekar, 1999. Transgenically enhanced sorbitol synthesis facilitates phloem boron transport and increases tolerance of tobacco to boron deficiency. *Plant Physiology* 119:17-20.
- Brown, P.H., N. Bellaloui, M.A. Wimmer, E.S. Bassil, J. Ruiz, H. Hu, H. Pfeffer, F. Dannel, y V. Romheld. 2002. Boron in plant biology. *Plant Biology*. 4:205-223.
- Brown, P.H., y H. Hu. 1998. Phloem boron mobility in diverse plant species. *Botanica Acta*. 111:331-335.
- Brown, P.H., y H.N. Hu. 1996. Phloem mobility of boron is species dependent: Evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species. *Annals of Botany*. 77:497-505.
- Brown, P.H., S. Perica, L. Hendricks, K. Kelley, J. Grant, S. Sibbett, y H. Hu. 1999c. Foliar boron application to decrease PFA, increase fruit set and yield in walnut. *Walnut Marketing Board Annual Report*. 1999.
- Brown, P.H., y B.J. Shelp. 1997. Boron mobility in plants. *Plant and Soil*. 193:85-101.
- Buchholz, A., P. Baur, y J. Schönherr. 1998. Differences among plant species in cuticular permeabilities and solute mobilities are not caused by differential size selectivities. *Planta*. 206:322-328.

- Bukovac, M.J. 1985. Citation classic - absorption and mobility of foliar applied nutrients. *Current Contents/Agriculture Biology & Environmental Sciences*:16-16.
- Bukovac, M.J., J.A. Flore, y E.A. Baker. 1979. Peach leaf surfaces - changes in wettability, retention, cuticular permeability, and epicuticular wax chemistry during expansion with special reference to spray application. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 104:611-617.
- Bukovac, M.J., y S.H. Wittwer. 1957. Absorption and mobility of foliar applied nutrients. *Plant Physiology*. 32:428-435.
- Burkhardt, J. 2010. Hygroscopic particles on leaf surfaces: Nutrients or desiccants? *Ecological Monographs*. 80:369-399.
- Butler Ellis, M.C., C.R. Tuck, y P.C.H. Miller. 1997. The effect of some adjuvants on sprays produced by agricultural flat fan nozzles. *Crop Protection*. 16:41-50.
- Caetano, A.A. 1982. Estudo da eficiência de várias fontes dos micronutrientes, zinco, manganês e boro aplicados em pulverização na laranjeira valência (*Citrus sinensis* L. osbeck). In Agronomy. Vol. MS. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*. 302:1-17.
- Cakmak, I., M. Kalayci, Y. Kaya, A.A. Torun, N. Aydin, Y. Wang, Z. Arisoy, H. Erdem, A. Yazici, O. Gokmen, L. Ozturk, y W.J. Horst. 2010. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 58:9092-9102.
- Cape, J.N., y K.E. Percy. 1993. Environmental influences on the development of spruce needle cuticles. *New Phytologist*. 125:787-799.
- CF, P., y R. Graham. 1995. Transport of zinc and manganese to developing wheat grains. *Physiol. Plant*.
- Chabot, B.F., y D.J. Hicks. 1982. The ecology of leaf life spans. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 13:229-259.
- Chamel, A. 1988. Foliar uptake of chemicals studied with whole plants and isolated cuticles. In Plant growth and leaf-applied chemicals. P. Neumann, editor. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Chamel, A., M. Pineri, y M. Escoubes. 1991. Quantitative determination of water sorption by plant cuticles. *Plant Cell and Environment*. 14:87-95.
- Chamel, A., y N. Vitton. 1996. Sorption and diffusion of ¹⁴C-atrazine through isolated plant cuticles. *Chemosphere*. 33:995-1003.
- Chamel, A.R. 1989. Permeability characteristics of isolated golden delicious apple fruit cuticles with regard to calcium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 114:804-809.
- Chatzistathis, T., I. Therios, y D. Alfigragis. 2009. Differential uptake, distribution within tissues, and use efficiency of manganese, iron, and zinc by olive cultivars kothreiki and koroneiki. *HortScience*. 44(7): 1994-1999.
- Chen, Y.Z., J.M. Smagula, W. Litten, y S. Dunham. 1998. Effect of boron and calcium foliar sprays on pollen germination and development, fruit set, seed development, and berry yield and quality in lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* ait). *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 123:524-531.

- Cheng, G.W., y C.H. Crisosto. 1994. Development of dark skin discoloration on peach and nectarine fruit in response to exogenous contaminations. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 119:529-533.
- Cheng, L., S. Dong, y L.H. Fuchigami. 2002. Urea uptake and nitrogen mobilization by apple leaves in relation to tree nitrogen status in autumn. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 77:13-18.
- Chermahini, S.A., N. Moallemi, D.A. Nabati, y A.R. Shafieizargar. 2011. Winter application of foliar urea can promote some quantitative and qualitative characters of flower and fruit set of valencia orange trees. *Journal of Food Agriculture & Environment*. 9:252-255.
- Chiu, S.T., L.H. Anton, F.W. Ewers, R. Hammerschmidt, y K.S. Pregitzer. 1992. Effects of fertilization on epicuticular wax morphology of needle leaves of douglas-fir, *Pseudotsuga menziesii* (pinaceae). *American Journal of Botany*. 79:149-154.
- Christensen, P. 1980. Timing of zinc foliar sprays. 1. Effects of application intervals preceding and during the bloom and fruit-set stages. 2. Effects of day vs night application. *American Journal of Enology and Viticulture*. 31:53-59.
- Clapp, J.G. 2009. Let's be careful when defining salt index. *Fluid Journal*. 17.
- Cook, J.A., y D. Boynton. 1952. Some factors affecting the absorption of urea by McIntosh apple leaves. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 59:82-90.
- Coret, J.M., y A.R. Chamel. 1993. Influence of some nonionic surfactants on water sorption by isolated tomato fruit cuticles in relation to cuticular penetration of glyphosate. *Pesticide Science*. 38:27-32.
- Correia, M.A.R., R.D. Prado, L.S. Collier, D.E. Rosane, y L.M. Romualdo. 2008. Zinc forms of application in the nutrition and the initial growth of the culture of the rice. *Bioscience Journal*. 24:1-7.
- Crisosto, C.H., F.G. Mitchell, y Z.G. Ju. 1999. Susceptibility to chilling injury of peach, nectarine, and plum cultivars grown in California. *Hortscience*. 34:1116-1118.
- Cross, J. 1998. Anionic surfactants - an introduction. In *Anionic surfactants. Analytical chemistry*. Vol. J. Cross, editor. Marcel Dekker, New York. 1-33.
- Crowley, D.E., W.K. Smith, B. Faber, y J.A. Manthey. 1996. Zinc fertilization of avocado. *Hortscience*. 31:224-229.
- Datnoff, L.E., Elmer, W.H., Huber, D.M. 2007. Mineral nutrition and plant disease. American Phytopathological Society, St Paul, MN. 278.
- Day, J.M., R.J. Roughley, y J.F. Witty. 1979. Effect of planting density, inorganic nitrogen-fertilizer and supplementary carbon-dioxide on yield of *Vicia faba* L. *J. Agric. Sci.* 93:629-633.
- De Schampheleire, S.B., D. Nuytens, T.M. Baetens, W. Cornelis, D. Gabriels, y P. Spanoghe. 2008. Effects on pesticide spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. *Precision Agriculture* 10:409-420.
- De Wet, E., P.J. Robbertse, y H.T. Groeneveld. 1989. The influence of temperature and boron on pollen germination in *Mangifera indica* L. *Sud Afrikan Tydskr. Plant Grond*. 6:228-234.

- Deliopoulos, T., P.S. Kettlewell, y M.C. Hare. 2010. Fungal disease suppression by inorganic salts: A review. *Crop Protection*. 29:1059-1075.
- Deshmukh, A.P., A.J. Simpson, C.M. Hadad, y P.G. Hatcher. 2005. Insights into the structure of cutin and cutan from *Agave americana* leaf cuticle using HRMAS NMR spectroscopy. *Organic Geochemistry*. 36:1072-1085.
- Dickinson, D.B. 1978. Influence of borate and pentaerythritol concentrations on germination and tube growth of *Lilium longiflorum* pollen. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 103:413-416.
- Dominguez, E., J. Cuartero, y A. Heredia. 2011. An overview on plant cuticle biomechanics. *Plant Science*. 181:77-84.
- Dong, S.F., L.L. Cheng, C.F. Scagel, y L.H. Fuchigami. 2002. Nitrogen absorption, translocation and distribution from urea applied in autumn to leaves of young potted apple (*Malus domestica*) trees. *Tree Physiology*. 22:1305-1310.
- Dong, S.F., L.L. Cheng, C.F. Scagel, y L.H. Fuchigami. 2005a. Timing of urea application affects leaf and root N uptake in young Fuji/M9 apple trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 80:116-120.
- Dong, S.F., D. Neilsen, G.H. Neilsen, y L.H. Fuchigami. 2005b. Foliar N application reduces soil NO₃-N leaching loss in apple orchards. *Plant and Soil*. 268:357-366.
- Dong, S.F., C.F. Scagel, L.L. Cheng, L.H. Fuchigami, y P.T. Rygielwicz. 2001. Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. *Tree Physiology*. 21:541-547.
- Donkersley, P., y D. Nuytens. 2011. A meta analysis of spray drift sampling. *Crop Protection*. 30:931-936.
- Dordas, C. 2006. Foliar boron application improves seed set, seed yield, and seed quality of alfalfa. *Agron. J.* 98:907-913.
- Dordas, C. 2009. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*. 28:33-46.
- Drew, M.J. 1988. Effects of flooding and oxygen deficiency on plant mineral nutrition. In *Advances in Plant Nutrition*. Vol. 1. A. Lauchli y T. PB, editors. Praeger, New York. 115-159.
- Du Plooy, G.W., C.F. Van Der Merwe, y L. Korsten. 2006. Lenticel discolouration in mango (*Mangifera indica* L.) fruit - a cytological study of mesophyll cells from affected tissue. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 81:869-873.
- Dybing, C.D., y H.B. Currier. 1961. Foliar penetration by chemicals. *Plant Physiology*. 36:169-174.
- Ebrahim, M.K.H., y M.M. Aly. 2004. Physiological response of wheat to foliar application of zinc and inoculation with some bacterial fertilizers. *J. Plant Nutr.* 27:1859-1874.
- Eichert, T., y J. Burkhardt. 2001. Quantification of stomatal uptake of ionic solutes using a new model system. *Journal of Experimental Botany*. 52:771-781.
- Eichert, T., y H.E. Goldbach. 2008. Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces - further evidence for a stomatal pathway. *Physiol. Plant.* 132:491-502.
- Eichert, T., H.E. Goldbach, y J. Burkhardt. 1998. Evidence for the uptake of large anions through stomatal pores. *Botanica Acta*. 111:461-466.

- Eichert, T., J.J. Peguero-Pina, E. Gil-Pelegrin, A. Heredia, y V. Fernandez. 2010. Effects of iron chlorosis and iron resupply on leaf xylem architecture, water relations, gas exchange and stomatal performance of field-grown peach (*Prunus persica*). *Physiol. Plant.* 138:48-59.
- Eichert T., y V. Fernández. 2011. Uptake and release of elements by leaves and other aerial plant parts. In Marschners' mineral nutrition of higher plants. P. Marschner, editor. Academic Press, Oxford. 71-84.
- El-Hilali, F., A. Ait-Qubahou, A. Remah, y O. Akhayat. 2004. Effect of preharvest spray of Ca and K on quality, peel disorders and peroxidases activity of 'Fortune' mandarin fruit in low temperature storage. *Acta Horticulturae*. 632:309-315.
- El-Otmani, M., A. Ait-Qubahou, F.Z. Taibi, y C.J. Lovatt. 2002. Efficacy of foliar urea as N source in sustainable citrus production systems. *Acta Horticulturae*. 594:611-617.
- El-Otmani, M., C.W. Coggins, M. Agusti, y C.J. Lovatt. 2000. Plant growth regulators in citriculture: World current uses. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 19:395-447.
- Elattal, Z.M., O.K. Moustafa, y S.A. Diab. 1984. Influence of foliar fertilizers on the toxicity and tolerance to some insecticides in the cotton leafworm. *J. Agric. Sci.* 102:111-114.
- Elshatshat, S., L. Schreiber, y J. Schonherr. 2007. Some cesium and potassium salts increase the water permeability of stomatous isolated plant cuticles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 170:59-64.
- Epstein, E., y A.J. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. 380.
- Erenoglu, B., M. Nikolic, V. Romheld, y I. Cakmak. 2002. Uptake and transport of foliar applied zinc (^{65}Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency. *Plant and Soil*. 241:251-257.
- Eskew, D.L., y R.M. Welch. 1982. Nickel supplementation 1 microgram per liter prevents leaflet tip necrosis in soybeans grown in nutrient solutions purified using 8 hydroxy quinoline controlled pore glass chromatography. *Plant Physiology*. 69:43.
- Everett, R.L., y D.F. Thran. 1992. Nutrient dynamics in single leaf pinyon (*Pinus monophylla* torr and frem) needles. *Tree Physiology*. 10:59-68.
- Faber, B., y J.A. Manthey. 1996. Zinc fertilization of avocado trees. *Hortscience*. 31:224-229.
- Fageria, N.K., M.P. Barbosa, A. Moreira, y C.M. Guimaraes. 2009. Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.* 32:1044-1064.
- Fahn, A. 1986. Structural and functional-properties of trichomes of xeromorphic leaves. *Annals of Botany*. 57:631-637.
- Fang, Y., L. Wang, Z. Xin, L.Y. Zhao, X.X. An, y Q.H. Hu. 2008. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56:2079-2084.
- Fernandez, V., y G. Ebert. 2005. Foliar iron fertilization: A critical review. *J. Plant Nutr.* 28:2113-2124.
- Fernández V., Ebert G. y G. Winkelmann 2005. The use of microbial siderophores for foliar iron application studies. *Plant and Soil* 72:245-252.

- Fernandez, V., V. Del Rio, J. Abadia, y A. Abadia. 2006. Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* L. batsch): Effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. *Plant and Soil*. 289:239-252.
- Fernandez, V., V. Del Rio, L. Pumarino, E. Igartua, J. Abadia, y A. Abadia. 2008a. Foliar fertilization of peach (*Prunus persica* L. batsch) with different iron formulations: Effects on re-greening, iron concentration and mineral composition in treated and untreated leaf surfaces. *Scientia Horticulturae*. 117:241-248.
- Fernandez, V., T. Eichert, V. Del Rio, G. Lopez-Casado, J.A. Heredia-Guerrero, A. Abadia, A. Heredia, y J. Abadia. 2008b. Leaf structural changes associated with iron deficiency chlorosis in field-grown pear and peach: Physiological implications. *Plant and Soil*. 311:161-172.
- Fernandez, V., y T. Eichert. 2009. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 28:36-68.
- Fernandez, V., I. Orera, J. Abadia, y A. Abadia. 2009. Foliar iron-fertilisation of fruit trees: Present knowledge and future perspectives - a review. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 84:1-6.
- Fernandez, V., M. Khayet, P. Montero-Prado, J. Alejandro Heredia-Guerrero, G. Liakopoulos, G. Karabourniotis, V. del Rio, E. Dominguez, I. Tacchini, C. Nerin, J. Val, y A. Heredia. 2011. New insights into the properties of pubescent surfaces: Peach fruit as a model. *Plant Physiology*. 156:2098-2108.
- Fernández, V., y P.H. Brown. 2013. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science* 4, 289.
- Fernández, V., Sancho-Knapik, D., Guzmán, P., Peguero-Pina, J.J., y and E. Gil-Pelegrin, 2014a. Wettability, polarity and water absorption of *Quercus ilex* leaves: effect of leaf side and age. *Plant Physiology* 166: 168-180.
- Fernández V., Guzmán P., Peirce C. A. E., McBeath T. M., Khayet M., y M.J. McLaughlin. 2014b. Effect of wheat phosphorus status on leaf surface properties and permeability to foliar applied phosphorus. *Plant and Soil* 384:7-20.
- Fernandez-Escobar, R., J.M. Garcia-Novelo, y H. Restrepo-Diaz. 2011. Mobilization of nitrogen in the olive bearing shoots after foliar application of urea. *Scientia Horticulturae*. 127:452-454.
- Ferrandon, M., y A.R. Chamel. 1988. Cuticular retention, foliar absorption and translocation of Fe, Mn and Zn supplied in organic and inorganic form. *J. Plant Nutr.* 11:247-263.
- Fischer, R.A., y T.C. Hsiao. 1968. Stomatal opening in isolated epidermal strips of *Vicia faba*. II. Responses to KCl concentration and role of potassium absorption. *Plant Physiology*. 43:1953-1958.
- Fisher, E.G. 1952. The principles underlying foliage applications of urea for nitrogen fertilization of the McIntosh apple. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 59:91-98.
- Forshey, C.G. 1963. The effect of nitrogen status of McIntosh apple trees in sand culture on the absorption of magnesium from epsom salts sprays. *Proc Amer Soc Hort Sci*. 83:21-31.

- Franke, W. 1967. Mechanisms of foliar penetration of solutions. *Annual Review of Plant Physiology*. 18:281-300.
- Freeborn, J.R., D.L. Holshouser, M.M. Alley, N.L. Powell, y D.M. Orcutt. 2001. Soybean yield response to reproductive stage soil-applied nitrogen and foliar-applied boron. *Agron. J.* 93:1200-1209.
- Freeman, B., L.G. Albrigo, y R.H. Biggs. 1979. Ultrastructure and chemistry of cuticular waxes of developing citrus leaves and fruits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 104:801-808.
- Garcia, R.L., y J.J. Hanway. 1976. Foliar fertilization of soybeans during seed-filling period. *Agron. J.* 68:653-657.
- Garcia-Lavina, P., A. Alvarez-Fernandez, J. Abadia, y A. Abadia. 2002. Foliar applications of acids with and without FeSO_4 to control chlorosis in pear. *Acta Horticulturae*. 594:217-222.
- Garnett, T.P., y R.D. Graham. 2005. Distribution and remobilization of iron and copper in wheat. *Annals of Botany*. 95:817-826.
- Gerik, T.J., D.M. Oosterhuis, y H.A. Torbert. 1998. Managing cotton nitrogen supply. *Advances in Agronomy*, Vol 64. 64:115-147.
- Gheibi, M., M. Malakouti, B. Kholdebarin, F. Ghanati, S. Teimouri, y R. Sayadi. 2009. Significance of nickel supply for growth and chlorophyll content of wheat supplied with urea or ammonium nitrate. *J. Plant Nutr.* 32:1440-1450.
- Gholami, A., S. Akhlaghi, S. Shahsavani, y N. Farrokhi. 2011. Effects of urea foliar application on grain yield and quality of winter wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42:719-727.
- Gibert, C., F. Lescourret, M. Genard, G. Vercambre, y A.P. Pastor. 2005. Modelling the effect of fruit growth on surface conductance to water vapour diffusion. *Annals of Botany*. 95:673-683.
- Girma, K., K.L. Martin, K.W. Freeman, J. Mosali, R.K. Teal, W.R. Raun, S.M. Moges, y D.B. Arnall. 2007. Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:1137-1154.
- Giskin, M., y Y. Efron. 1986. Planting date and foliar fertilization of corn grown for silage and grain under limited moisture. *Agron. J.* 78:426-429.
- Glendinnig, J.S. 1999. Australian Soil Fertility Manual. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia.
- Glenn, G.M., y B.W. Poovaiah. 1985. Cuticular permeability to calcium compounds in Golden Delicious apple fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 110:192-195.
- Gonzalez, D., A. Obrador, y J.M. Alvarez. 2007. Behavior of zinc from six organic fertilizers applied to a navy bean crop grown in a calcareous soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55:7084-7092.
- Gooding, M.J., y W.P. Davies. 1992. Foliar urea fertilization of cereals - a review. *Fertilizer Research*. 32:209-222.
- Gordon, D., y T.M. Dejong. 2007. Current-year and subsequent-year effects of crop-load manipulation and epicormic-shoot removal on distribution of long, short and epicormic shoot growth in *Prunus persica*. *Annals of Botany*. 99:323-332.

- Graham, R.D., R.J. Hannam, y N. Uren. 1988. Manganese in Soils and Plants. Kluwer Academic Press, Dordrecht, Netherlands. 388.
- Grant, C.A., D.N. Flaten, D.J. Tomasiewicz, y S.C. Sheppard. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 81:211-224.
- Gray, R.C., y G.W. Akin. 1984. Foliar fertilization *In* Nitrogen in Crop Production. R.D. Hauck, editor. American Agronomy Society, Madison. 579-584.
- Green, J.M., y C.L. Foy. 2000. Adjuvants: Test design, interpretation, and presentation of results. *Weed Technology*. 14:819-825.
- Greenway, H., y R. Munns. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 31:149-190.
- Grignon, C., y H. Sentenac. 1991. pH and ionic conditions in the apoplast. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 42:103-128.
- Guak, S., D. Neilsen, P. Millard, y N.E. Looney. 2004. Leaf absorption, withdrawal and remobilization of autumn-applied urea-N in apple. *Can. J. Plant Sci.* 84:259-264.
- Guertal, E.A., A.O. Abaye, B.M. Lippert, G.S. Miner, y G.J. Gascho. 1996. Sources of boron for foliar fertilization of cotton and soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27:2815-2828.
- Guest, P.L., y H.D. Chapman. 1949. Investigations on the use of iron sprays, dusts, and soil applications to control iron chlorosis of citrus. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 54:11-21.
- Guvenc, I., A. Karatas, y H.C. Kaymak. 2006. Effect of foliar applications of urea, ethanol and putrecine on growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 76:23-25.
- Guzmán, P., Fernández, V., Graça, J., Cabral, V., Kayali, N., Khayet, M., y L. Gil (2014a). Chemical and structural analysis of *Eucalyptus globulus* and *E. camaldulensis* leaf cuticles: a lipidized cell wall region. *Frontiers in Plant Science* 5:481.
- Guzmán, P., Fernández, V., García, M.L., Khayet, M., Fernández, A., y L. Gil (2014b). Localization of polysaccharides in isolated and intact cuticles of eucalypt, poplar and pear leaves by enzyme-gold labelling. *Plant Physiology and Biochemistry* 76:1-6.
- Gwathmey, C.O., C.L. Main, y X.H. Yin. 2009. Potassium uptake and partitioning relative to dry matter accumulation in cotton cultivars differing in maturity. *Agron. J.* 101:1479-1488.
- Haefs, R., M. Schmitz-Eiberger, H.D. Mohr, y G. Noga. 2002. Improvement of Mg uptake of grapevine by use of rapeseed oil ethoxylates for foliar application of Mg. *Vitis*. 41:7-10.
- Hanson, E.J. 1991. Movement of boron out of tree fruit leaves. *Hortscience*. 26:271-273.
- Haq, M.U., y A.P. Mallarino. 1998. Foliar fertilization of soybean at early vegetative stages. *Agron. J.* 90:763-769.
- Haq, M.U., y A.P. Mallarino. 2005. Response of soybean grain oil and protein concentrations to foliar and soil fertilization. *Agron. J.* 97:910-918.
- Harder, H.J., R.E. Carlson, y R.H. Shaw. 1982. Leaf photosynthetic response to foliar fertilizer applied to corn plants during grain fill. *Agron. J.* 74:759-761.
- Harker, F.R., y I.B. Ferguson. 1988. Transport of calcium across cuticles isolated from apple fruit. *Scientia Horticulturae*. 36:205-217.

- Harker, F.R., y I.B. Ferguson. 1991. Effects of surfactants on calcium penetration of cuticles isolated from apple fruit. *Scientia Horticulturae*. 46:225-233.
- Haslett, B.S., R.J. Reid, y Z. Rengel. 2001. Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany*. 87:379-386.
- Hazen, J.L. 2000. Adjuvants - terminology, classification, and chemistry. *Weed Technology*. 14:773-784.
- Hellmann, M., y R. Stosser. 1992. Development of cuticle thickness and epidermal-cells of apple leaves. *Gartenbauwissenschaft*. 57:223-227.
- Heredia, A. 2003. Biophysical and biochemical characteristics of cutin, a plant barrier biopolymer. *Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects*. 1620:1-7.
- Herren, T., y U. Feller. 1994. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat. *J. Plant Nutr.* 17:1587-1598.
- Hesse, C.O., y W.H. Griggs. 1950. The effect of gland type on the wettability and water retention of peach leaves. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 56:173-180.
- Hewitt, A.J. 2008. Droplet size spectra classification categories in aerial application scenarios. *Crop Protection*. 27:1284-1288.
- Hill, J., A.D. Robson, y J.F. Loneragan. 1979a. Effect of copper supply on the senescence and the retranslocation of nutrients of the oldest leaf of wheat. *Annals of Botany*. 44:279-287.
- Hill, J., A.D. Robson, y J.F. Loneragan. 1979b. Effects of copper and nitrogen supply on the distribution of copper in dissected wheat grains. *Australian Journal of Agricultural Research*. 30:233-237.
- Hill-Cottingham, D.G., y C.P. Lloydjones. 1975. Nitrogen ¹⁵N in apple nutrition investigations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 26:165-173.
- Hocking, P.J. 1994. Dry-matter production, mineral nutrient concentrations, and nutrient distribution and redistribution in irrigated spring wheat. *J. Plant Nutr.* 17:1289-1308.
- Hocking, P.J., y J.S. Pate. 1977. Mobilization of minerals to developing seeds of legumes. *Annals of Botany*. 41:1259-1278.
- Hogue, E.J., y G.H. Nielsen. 1986. Effect of root temperature and varying cation ratios on growth and leaf cation concentration of apple seedlings grown in nutrient solution. *Can. J. Plant Sci.* 66:637-645.
- Holloway, P.J. 1969. Effects of superficial wax on leaf wettability. *Annals of Applied Biology*. 63:145-153.
- Horesh, I., y Y. Levy. 1981. Response of iron-deficient citrus trees to foliar iron sprays with a low-surface-tension surfactant. *Scientia Horticulturae*. 15:227-233.
- Hsu, H.H. 1986. The absorption and distribution of metalosates from foliar fertilization. In *Foliar Feeding of Plants with Amino Acid Chelates*. H. De Wayne Ashmead, editor. Noyes Publications, Park Ridge, NJ. 236-354.
- Hu, H., y P.H. Brown. 1994. Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin. *Plant Physiology*. 105:681-689.
- Huang, L.B., R.W. Bell, y B. Dell. 2008. Evidence of phloem boron transport in response to interrupted boron supply in white lupin (*Lupinus albus* L. Cv. Kiev mutant) at the reproductive stage. *Journal of Experimental Botany*. 59:575-583.

- Huett, D.O., y I. Vimpany. 2006. An evaluation of foliar nitrogen and zinc applications to macadamia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 46:1373-1378.
- Hull, H.M., H.L. Morton, y J.R. Wharrie. 1975. Environmental influences on cuticle development and resultant foliar penetration. *Botanical Review*. 41:421-452.
- Hull, H.M. 1970. Leaf structure related to absorption of pesticides and other compounds. *Residue Rev.* 31: 1-155.
- Seasonal assimilate metabolism in evergreen and deciduous conifers. *Plant Physiology*. 46:5.
- Hundt, I., y W. Podlesak. 1990. Weather effects on N uptake from foliar-applied urea ammonium-nitrate in cereals. *Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde-Archives of Agronomy and Soil Science*. 34:757-764.
- Hunsche, M., M.M. Blanke, y G. Noga. 2010. Does the microclimate under hail nets influence micromorphological characteristics of apple leaves and cuticles? *Journal of Plant Physiology*. 167:974-980.
- Hunsche, U., F. Walter, y H. Schnier. 2004. Evolution and failure of the opalinus clay: Relationship between deformation and damage, experimental results and constitutive equation. *Applied Clay Science*. 26:403-411.
- Jackson, J.E., y J.W. Palmer. 1980. A computer-model study of light interception by orchards in relation to mechanized harvesting and management. *Scientia Horticulturae*. 13:1-7.
- Jackson, J.F. 1989. Borate control of protein secretion from petunia pollen exhibits critical temperature discontinuities. *Sexual Plant Reproduction*. 2:11-14.
- Jacoby, B. 1975. Light sensitivity of ^{22}Na , ^{86}Rb , ^{42}K absorption by different tissues of bean-leaves. *Plant Physiology*. 55:978-981.
- Jarvinen, R., M. Kaimainen, y H. Kallio. 2010. Cutin composition of selected northern berries and seeds. *Food Chemistry*. 122:137-144.
- Jeffree, C.E. 2006. The fine structure of the plant cuticle. In *Biology of the Plant Cuticle*. Vol. 23. M.M.C. Riederer, editor. 11-125.
- Jensen, P.K., L.N. Jorgensen, y E. Kirknel. 2001. Biological efficacy of herbicides and fungicides applied with low-drift and twin-fluid nozzles. *Crop Protection*. 20:57-64.
- Jeschke, W.D., y W. Hartung. 2000. Root-shoot interactions in mineral nutrition. *Plant and Soil*. 226:57-69.
- Jeschke, W.D., J.S. Pate, y C.A. Atkins. 1987. Partitioning of K^+ , Na^+ , Mg^{++} , and Ca^{++} through xylem and phloem to component organs of nodulated white lupin under mild salinity. *Journal of Plant Physiology*. 128:77-93.
- Jetter, R., y S. Schaffer. 2001. Chemical composition of the *Prunus laurocerasus* leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development. *Plant Physiology*. 126:1725-1737.
- Jifon, J.L., y G.E. Lester. 2009. Foliar potassium fertilization improves fruit quality of field-grown muskmelon on calcareous soils in south Texas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 89:2452-2460.
- Johnson, E.J., O. Dorot, J. Liu, B. Chefetz, y B. Xing. 2007. Spectroscopic characterization of aliphatic moieties in four plant cuticles. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:2461-2478.

- Johnson, H.B. 1975. Plant pubescence: An ecological perspective. *Botanical Review*. 41:235-258.
- Johnson, R.S., R. Rosecrance, S. Weinbaum, H. Andris, y J.Z. Wang. 2001. Can we approach complete dependence on foliar-applied urea nitrogen in an early-maturing peach? *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 126:364-370.
- Jones, C., K. Olson-Rutz, y C. Dinkins, P. 2009. Nutrient uptake timing by crops: To assist with fertilizer timing. *Montana State University, Extension*:1-7.
- Jongruaysup, S., B. Dell, y R.W. Bell. 1994. Distribution and redistribution of molybdenum in black gram (*Vigna mungo* L. hepper) in relation to molybdenum supply. *Annals of Botany*. 73:161-167.
- Jongruaysup, S., B. Dell, R.W. Bell, G.W. Ohara, y J.S. Bradley. 1997. Effect of molybdenum and inorganic nitrogen on molybdenum redistribution in black gram (*Vigna mungo* L. hepper) with particular reference to seed fill. *Annals of Botany*. 79:67-74.
- Jyung, W.H., S.H. Wittwer, y M.J. Bukovac. 1965. Role of stomata in foliar absorption of Rb by leaves of tobacco bean and tomato. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 86:361-& 367.
- Kadman, A., y A. Cohen. 1977. Experiments with zinc application to avocado trees. *Israel Journal of Botany*. 26:50-50.
- Kaiser, H. 2014. Stomatal uptake of mineral particles from a sprayed suspension containing an organosilicone surfactant. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 177: 869-874.
- Kannan, S. 1986. Foliar absorption and transport of inorganic nutrients. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 4:341-375.
- Kannan, S. 2010. Foliar fertilization for sustainable crop production. *Sustainable Agriculture Reviews*. 4:371-402.
- Karabourniotis, G., y G. Liakopoulos. 2005. Phenolic compounds in plant cuticles: Physiological and ecophysiological aspects. *Advances in Plant Physiology*. 8:33-47.
- Karak, T., D.K. Das, y D. Maiti. 2006. Yield and zinc uptake in rice (*Oryza sativa*) as influenced by sources and times of zinc application. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 76:346-348.
- Kaya, C., y D. Higgs. 2002. Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc. *Scientia Horticulturae*. 93:53-64.
- Kerstiens, G. 2010. Plant cuticle. ELS.
- Keshavarz, K., K. Vandati, M. Samar, B. Azadegan, y P.H. Brown. 2011. Foliar application of zinc and boron improves walnut vegetative and reproductive growth. *Horttechnology*. 21:181-186.
- Khan, F.A., J.S. Ellenberger, N.B. Birchfield, M. Kosuko, y G. Rothman. 2011. Validation testing of drift reduction technology testing protocol. *ASTM Special Technical Publication*. 1527 STP:238-248.
- Khayet, M., and V. Fernández. 2012. Estimation of the solubility parameter of model plant surfaces and agrochemicals: a valuable tool for understanding plant surface interactions. *Theoretical Biology and Medical Modelling* 9, 45.
- Kinaci, E., y N. Gulmezoglu. 2007. Grain yield and yield components of triticale upon application of different foliar fertilizers. *Interiencia*. 32:624-628.

- Kirkwood, R.C. 1993. Use and mode of action of adjuvants for herbicides - a review of some current work. *Pesticide Science*. 38:93-102.
- Klein, I., y S.A. Weinbaum. 1984. Foliar application of urea to olive - translocation of urea nitrogen as influenced by sink demand and nitrogen deficiency. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 109:356-360.
- Klein, I., y S.A. Weinbaum. 1985. Foliar application of urea to almond and olive - leaf retention and kinetics of uptake. *J. Plant Nutr.* 8:117-129.
- Kluge, R. 1990. Symptom-related toxic threshold values of plants for the evaluation of excess of boron (B) in selected crops. *Agribiological Research-Zeitschrift für Agrarbiologie Agrikulturchemie Okologie*. 43:234-243.
- Knoche, M. 1994. Organosilicone surfactant performance in agricultural spray application - a review. *Weed Research*. 34:221-239.
- Knoche, M., H. Tamura, y M.J. Bukovac. 1991. Stability of the organosilicone surfactant silwet L-77 in growth-regulator sprays. *Hortscience*. 26:1498-1500.
- Koch, K., y H.-J. Ensikat. 2008. The hydrophobic coatings of plant surfaces: Epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly. *Micron*. 39:759-772.
- Koch, K., K.D. Hartmann, L. Schreiber, W. Barthlott, y C. Neinhuis. 2006. Influences of air humidity during the cultivation of plants on wax chemical composition, morphology and leaf surface wettability. *Environmental and Experimental Botany*. 56:1-9.
- Kolattukudy, P.E. 1980. Bio-polyester membranes of plants - cutin and suberin. *Science*. 208:990-1000.
- Koontz, H., and O. Biddulph, 1957. Factors affecting absorption and translocation of foliar applied phosphorus. *Plant Physiology* 32(5) :463-470.
- Kosma, D.K., B. Bourdenx, A. Bernard, E.P. Parsons, S. Lue, J. Joubes, y M.A. Jenks. 2009. The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of arabidopsis. *Plant Physiology*. 151:1918-1929.
- Koutinas, N., T. Sotiropoulos, A. Petridis, D. Almaliotis, E. Deligeorgis, I. Therios, y N. Voulgarakis. 2010. Effects of preharvest calcium foliar sprays on several fruit quality attributes and nutritional status of the kiwifruit cultivar Tsechelidis. *Hortscience*. 45:984-987.
- Kraemer, T., M. Hunsche, y G. Noga. 2009a. Cuticular calcium penetration is directly related to the area covered by calcium within droplet spread area. *Scientia Horticulturae*. 120:201-206.
- Kraemer, T., M. Hunsche, y G. Noga. 2009b. Selected calcium salt formulations: Interactions between spray deposit characteristics and Ca penetration with consequences for rain-induced wash-off. *J. Plant Nutr.* 32:1718-1730.
- Krogmeier, M.J., G.W. McCarty, y J.M. Bremner. 1989. Phytotoxicity of foliar applied urea. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 86:8189-8191.
- Krogmeier, M.J., G.W. McCarty, D.R. Shogren, y J.M. Bremner. 1991. Effect of nickel deficiency in soybeans on the phytotoxicity of foliar-applied urea. *Plant and Soil*. 135:283-286.

- Kutman, U.B., B. Yildiz, y I. Cakmak. 2011. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant and Soil*. 342:149-164.
- Lakso, A.N. 1980. Correlations of fisheye photography to canopy structure, light climate, and biological responses to light in apple-trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 105:43-46.
- Last, P.J., y K.M.R. Bean. 1991. Controlling manganese deficiency in sugar-beet with foliar sprays. *J. Agric. Sci.* 116:351-358.
- Lauer, D.A. 1982. Foliar fertilization of dry beans with Zn and NPKs. *Agron. J.* 74:339-343.
- Law, S.E. 2001. Agricultural electrostatic spray application: A review of significant research and development during the 20th century. *Journal of Electrostatics*. 51-52:25-42.
- Laywisadkul, S., C.F. Scagel, L.H. Fuchigami, y R.G. Linderman. 2010. Spraying leaves of pear nursery trees with urea and copper ethylenediaminetetraacetic acid alters tree nitrogen concentration without influencing tree susceptibility to phytophthora syringae. *Horttechnology*. 20:331-342.
- Leach, K.A., y A. Hameleers. 2001. The effects of a foliar spray containing phosphorus and zinc on the development, composition and yield of forage maize. *Grass and Forage Science*. 56:311-315.
- Leacox, J.D., y J.P. Syvertsen. 1995. Nitrogen uptake by citrus leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 120:505-509.
- Leaper, C., y P.J. Holloway. 2002. Adjuvants and glyphosate activity. *Pesticide Management Science*. 56:313-319.
- Lee, S.H., W.S. Kim, y T.H. Han. 2009. Effects of post-harvest foliar boron and calcium applications on subsequent season's pollen germination and pollen tube growth of pear (*Pyrus pyrifolia*). *Scientia Horticulturae*. 122:77-82.
- Leece, D.R. 1976. Composition and ultrastructure of leaf cuticles from fruit trees relative to differential foliar absorption. *Australian Journal of Plant Physiology*. 3:833-847.
- Leece, D.R. 1978. Foliar absorption in *Prunus domestica* L. 1. Nature and development of the surface wax barrier. *Australian Journal of Plant Physiology*. 5:749-766.
- Leite, V.M., P.H. Brown, y C.A. Rosolem. 2007. Boron translocation in coffee trees. *Plant and Soil*. 290:221-229.
- Lenk, S., L. Chaerle, E.E. Pfundel, G. Langsdorf, D. Hagenbeek, H.K. Lichtenthaler, D. Van der Straeten, y C. Buschmann. 2007. Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications. *Journal of Experimental Botany*. 58:807-814.
- Lester, G.E., J.L. Jifon, y D.J. Makus. 2010. Impact of potassium nutrition on postharvest fruit quality: Melon (*Cucumis melo* L.) case study. *Plant and Soil*. 335:117-131.
- Lester, G.E., J.L. Mon, y D.J. Makus. 2006. Supplemental foliar potassium applications with or without a surfactant can enhance netted muskmelon quality. *Hortscience*. 41:741-744.
- Leyshon, A.J., y R.W. Sheard. 1974. Influence of short-term flooding on growth and plant nutrient composition of barley. *Canadian Journal of Soil Science*. 54:463-473.

- Li, P., Li, L., Du, Y., Hampton, M. A., Nguyen, A. V., Huang, L., Rudolph, V. y Z.P. Xu 2014. Potential foliar fertilizers with copper and zinc dual micronutrients in nanocrystal suspension. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(11):1-11.
- Liakopoulos, G., S. Stavrianakou, y G. Karabourniotis. 2001. Analysis of epicuticular phenolics of *Prunus persica* and *Olea europaea* leaves: Evidence on the chemical origin of the UV-induced blue fluorescence of stomata. *Annals of Botany*. 87:641-648.
- Liakopoulos, G., S. Stavrianakou, D. Nikolopoulos, E. Karvonis, K.A. Vekkos, V. Psaroudi, y G. Karabourniotis. 2009. Quantitative relationships between boron and mannitol concentrations in phloem exudates of *Olea europaea* leaves under contrasting boron supply conditions. *Plant and Soil*. 323:177-186.
- Lidster, P.D., S.W. Porritt, y G.W. Eaton. 1977. Effect of storage relative humidity on calcium-uptake by Spartan apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 102:394-396.
- Limm, E.B., K.A. Simonin, A.G. Bothman, y T.E. Dawson. 2009. Foliar water uptake: A common water acquisition strategy for plants of the redwood forest. *Oecologia*. 161:449-459.
- Ling, F., y M. Silberbush. 2002. Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers. *J. Plant Nutr.* 25:2333-2342.
- Liu, Z.Q. 2004. Effects of surfactants on foliar uptake of herbicides - a complex scenario. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*. 35:149-153.
- Lotze, E., J. Joubert, y K.I. Theron. 2008. Evaluating pre-harvest foliar calcium applications to increase fruit calcium and reduce bitter pit in 'Golden Delicious' apples. *Scientia Horticulturae*. 116:299-304.
- Lovatt, C.J. 1990. A definitive test to determine whether phosphate fertilization can replace phosphate fertilization to supply P in the metabolism of hass on Duke 7. *California Avocado Society Yearbook* 81:61-64.
- Lovatt, C.J., Y.S. Zheng, y K.D. Hake. 1988. Demonstration of a change in nitrogen-metabolism influencing flower initiation in citrus. *Israel Journal of Botany*. 37:181-188.
- Luque, P., S. Bruque, y A. Heredia. 1995. Water permeability of isolated cuticular membranes - a structural-analysis. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 317:417-422.
- Lurie, S., E. Fallik, y J.D. Klein. 1996. The effect of heat treatment on apple epicuticular wax and calcium uptake. *Postharvest Biology and Technology*. 8:271-277.
- Ma, B.L., M. Li, L.M. Dwyer, y G. Stewart. 2004. Effect of in-season application methods of fertilizer nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency in maize. *Canadian Journal of Soil Science*. 84:169-176.
- Ma, Q.F., N. Longnecker, y C. Atkins. 1998. Exogenous cytokinin and nitrogen do not increase grain yield in narrow-leaved lupins. *Crop Sci.* 38:717-721.
- Macey, M.J.K. 1970. Effect of light on wax synthesis in leaves of *Brassica oleracea*. *Phytochemistry*. 9:757-761.
- Majid, N.M., y T.M. Ballard. 1990. Effects of foliar application of copper-sulfate and urea on the growth of lodgepole pine. *Forest Ecology and Management*. 37:151-165.

- Mallarino, A.P., M.U. Haq, D. Wittry, y M. Bermudez. 2001. Variation in soybean response to early season foliar fertilization among and within fields. *Agron. J.* 93:1220-1226.
- Malusa, E., y L. Tosi. 2005. Phosphorous acid residues in apples after foliar fertilization: Results of field trials. *Food Additives and Contaminants.* 22:541-548.
- Marentes, E., B.J. Shelp, R.A. Vanderpool, y G.A. Spiers. 1997. Retranslocation of boron in broccoli and lupin during early reproductive growth. *Physiol. Plant.* 100:389-399.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, San Diego.
- Marschner, P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, San Diego. 651 pp.
- Masi, E., y M. Boselli. 2011. Foliar application of molybdenum: Effects on yield quality of the grapevine Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *Advances in Horticultural Science.* 25:37-43.
- Mason, J.L., J.M. McDougald, y B.G. Drought. 1974. Calcium concentration in apple fruit resulting from calcium chloride dips modified by surfactants and thickeners. *Hortscience.* 9:122-123.
- McBeath, T.M., M.J. McLaughlin, y S.R. Noack. 2011. Wheat grain yield response to and translocation of foliar-applied phosphorus. *Crop & Pasture Science.* 62:58-65.
- Middleton, L.J., y J. Sanderson. 1965. Uptake of inorganic ions by plant leaves. *Journal of Experimental Botany.* 16:197.
- Miller, P.C.H., y M.C. Butler Ellis. 2000. Effects of formulation on spray nozzle performance for applications from ground-based boom sprayers. *Crop Protection.* 19:609-615.
- Miwa, K., M. Tanaka, T. Kamiya, y T. Fujiwara. 2010. Molecular mechanisms of boron transport in plants: Involvement of arabidopsis nip5;1 and nip6;1. *Mips and Their Role in the Exchange of Metalloids.* 679:83-96.
- Modaihsh, A.S. 1997. Foliar application of chelated and non-chelated metals for supplying micronutrients to wheat grown on calcareous soil. *Experimental Agriculture.* 33:237-245.
- Monge, E., C. Perez, A. Pequerul, P. Madero, y J. Val. 1993. Effect of iron chlorosis on mineral-nutrition and lipid-composition of thylakoid biomembrane in *Prunus persica* L. bastch. *Plant and Soil.* 154:97-102.
- Moran, K. 2004. Micronutrient product types and their development. *International Fertiliser Society.* Proceedings No. 545.
- Morandi, B., L. Manfrini, P. Losciale, M. Zibordi, y L. Corelli-Grappadelli. 2010. The positive effect of skin transpiration in peach fruit growth. *Journal of Plant Physiology.* 167:1033-1037.
- Mortvedt, J.J. 2001. Calculating salt index. *Fluid Journal.* Spring:1-3.
- Mosali, J., K. Desta, R.K. Teal, K.W. Freeman, K.L. Martin, J.W. Lawles, y W.R. Raun. 2006. Effect of foliar application of phosphorus on winter wheat grain yield, phosphorus uptake, and use efficiency. *J. Plant Nutr.* 29:2147-2163.
- Moustafa, O.K., Z.M. Elattal, y A.F. Doban. 1984. The role of foliar fertilizers in tolerance of the cotton leafworm to certain insecticides. *J. Agric. Sci.* 102:115-117.

- Muhling, K.H., y A. Lauchli. 2000. Light-induced pH and K⁺ changes in the apoplast of intact leaves. *Planta*. 212:9-15.
- Mullins, G.L., y C.H. Burmester. 1990. Dry-matter, nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation by 4 cotton varieties. *Agron. J.* 82:729-736.
- Nable, R.O., J.G. Paull, y B. Cartwright. 1990. Problems associated with the use of foliar analysis for diagnosing boron toxicity in barley. *Plant and Soil*. 128:225-232.
- Neilsen, G., D. Neilsen, S.F. Dong, P. Toivonen, y F. Peryea. 2005a. Application of CaCl₂ sprays earlier in the season may reduce bitter pit incidence in 'Braeburn' apple. *Hortscience*. 40:1850-1853.
- Neilsen, G.H., E.J. Hogue, D. Neilsen, y P. Bowen. 2005b. Postbloom humic- and fulvic-based zinc sprays can improve apple zinc nutrition. *Hortscience*. 40:205-208.
- Neilsen, G.H., y P.B. Hoyt. 1984. Field comparison of chelated and epsom salt magnesium foliar sprays on apple-trees. *Hortscience*. 19:431-432.
- Nelson, K.A., y C.G. Meinhardt. 2011. Foliar boron and pyraclostrobin effects on corn yield. *Agron. J.* 103:1352-1358.
- Neumann, P., y R. Prinz. 1975. Enhancement of seedling establishment with foliar sprays. *Israel Journal of Botany*. 24:48-48.
- Neumann, P.M. 1979. Rapid evaluation of foliar fertilizer-induced damage - N, P, K, S on corn. *Agron. J.* 71:598-602.
- Neumann, P.M. 1982. Late-season foliar fertilization with macronutrients - is there a theoretical basis for increased seed yields? *J. Plant Nutr.* 5:1209-1215.
- Neumann, P.M., y M. Giskin. 1979. Late season foliar fertilization of beans with NPKs - effects of cytokinins, calcium and spray frequency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10:579-589.
- Neumann, P.M., y R. Prinz. 1974. The effect of organo silicone surfactants in foliar nutrient sprays on increased adsorption of phosphate and iron salts through stomatal infiltration. *Israel Journal of Agricultural Research*. 23:123-128.
- Nicoulaud, B.A.L., y A.J. Bloom. 1998. Nickel supplements improve growth when foliar urea is the sole nitrogen source for tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 123:556-559.
- Noack, S.R., T.M. McBeath, y M.J. McLaughlin. 2011. Potential for foliar phosphorus fertilisation of dryland cereal crops: A review. *Crop & Pasture Science*. 62:659-669.
- Nobel, P.S. 1969. Light-dependent potassium uptake by *Pisum sativum* leaf fragments. *Plant and Cell Physiology*. 10:597-605.
- Nobel, P.S. 1970. Relation of light-dependent potassium uptake by pea leaf fragments to PK of accompanying organic acid. *Plant Physiology*. 46:491-493.
- Norris, R.F. 1974. Penetration of 2,4-D in relation to cuticle thickness. *American Journal of Botany*. 61:74-79.
- Nowack, B., I. Schwyzer, y R. Schulin. 2008. Uptake of Zn and Fe by wheat (*Triticum aestivum* var. Greina) and transfer to the grains in the presence of chelating agents (ethylenediaminedisuccinic acid and ethylenediaminetetraacetic acid). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56:4643-4649.

- Nuyttens, D., W.A. Taylor, S.B. De Schampheleire, P. Verboven, y D. Dekeyser. 2009. Influence of nozzle type and size on drift potential by means of different wind tunnel evaluation methods. *Biosystems Engineering*. 103:271-280.
- Nuyttens, K., T.M. Baetens, y M.J. McLaughlin. 2007. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems Engineering*. 97:271-280.
- Nyomora, A.M.S., P.H. Brown, y B. Krueger. 1999. Rate and time of boron application increase almond productivity and tissue boron concentration. *Hortscience*. 34:242-245.
- Nyomora, A.M.S., P.H. Brown, K. Pinney, and V.S. Polito. 2000. Foliar application of boron to almond trees affects pollen quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 125:265-270.
- Oosterhuis, D.M., y B.R. Bondada. 2001. Yield response of cotton to foliar nitrogen as influenced by sink strength, petiole, and soil nitrogen. *J. Plant Nutr.* 24:413-422.
- Orbovic, V., D. Achor, P. Petracek, y J.P. Syvertsen. 2001. Air temperature, humidity, and leaf age affect penetration of urea through grapefruit leaf cuticles. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 126:44-50.
- Orlovius, K. 2001. Effect of foliar fertilization with magnesium, sulfur, manganese and boron to sugar beet, oilseed rape, and cereals. In *Plant Nutrition – Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystem*. W.J. Horst, editor. Kluwer, Dordrecht. 788-789.
- Ozturk, L., M.A. Yazici, C. Yucel, A. Torun, C. Cekic, A. Bagci, H. Ozkan, H.J. Braun, Z. Sayers, y I. Cakmak. 2006. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiol. Plant*. 128:144-152.
- Palmer, C.M., y M.L. Guerinot. 2009. Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Nat. Chem. Biol.* 5:333-340.
- Pandey, N., G.C. Pathak, y C.P. Sharma. 2006. Zinc is critically required for pollen function and fertilisation in lentil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 20:89-96.
- Pandey, N., G.C. Pathak, y C.P. Sharma. 2009. Impairment in reproductive development is a major factor limiting yield of black gram under zinc deficiency. *Biologia Plantarum*. 53:723-727.
- Pang, J.Y., J. Ross, M.X. Zhou, N. Mendham, y S. Shabala. 2007. Amelioration of detrimental effects of waterlogging by foliar nutrient sprays in barley. *Functional Plant Biology*. 34:221-227.
- Papadakis, I.E., E. Protopapadakis, I.N. Therios, y V. Tsirakoglou. 2005. Foliar treatment of Mn deficient 'Washington Navel' orange trees with two Mn sources. *Scientia Horticulturae*. 106:70-75.
- Parker, M.B., y F.C. Boswell. 1980. Foliage injury, nutrient intake, and yield of soybeans as influenced by foliar fertilization. *Agron. J.* 72:110-113.
- Parr, J.F. 1982. Toxicology of adjuvants. In *Adjuvants and Herbicides*. R.H. Hodgson, editor. Weed Science Society of America, Champaign, IL. 93-112.
- Pearson, J.N., y Z. Rengel. 1994. Distribution and remobilization of Zn and Mn during grain development in wheat. *Journal of Experimental Botany*. 45:1829-1835.
- Pearson, J.N., Z. Rengel, C.F. Jenner, y R.D. Graham. 1995. Transport of zinc and manganese to developing wheat grains. *Physiol. Plant*. 95:449-455.

- Penner, D. 2000. Activator adjuvants. *Weed Technology*. 14:785-791.
- Perica, S., P.H. Brown, J.H. Connell, A.M.S. Nyomora, C. Dordas, H.N. Hu, y J. Stangoulis. 2001. Foliar boron application improves flower fertility and fruit set of olive. *Hortscience*. 36:714-716.
- Peryea, F.J. 2006. Phytoavailability of zinc in postbloom zinc sprays applied to 'Golden Delicious' apple trees. *Horttechnology*. 16:60-65.
- Peryea, F.J. 2007. Comparison of dormant and circum-bloom zinc spray programs for washington apple orchards. *J. Plant Nutr.* 30:1903-1920.
- Peryea, F.J., D. Neilsen, y G. Neilsen. 2003. Boron maintenance sprays for apple: Early-season applications and tank-mixing with calcium chloride. *Hortscience*. 38:542-546.
- Peryea, F.J., G.H. Neilsen, y D. Faubion. 2007. Start-timing for calcium chloride spray programs influences fruit calcium and bitter pit in 'Braeburn' and 'Honeycrisp' apples. *J. Plant Nutr.* 30:1213-1227.
- Pfündel, E.E., G. Agati, y Z.G. Cerovic. 2006. Optical properties of plant surfaces. In *Biology of the Cuticle*. Vol. 23. M. Riederer y C. Muller, editors. Blackwell, Oxford. 216-249.
- Phillips, S.B., y G.L. Mullins. 2004. Foliar burn and wheat grain yield responses following topdress-applied nitrogen and sulfur fertilizers. *J. Plant Nutr.* 27:921-930.
- Picchioni, G.A., y S.A. Weinbaum. 1995. Retention and the kinetics of uptake and export of foliage-applied, labeled boron by apple, pear, prune, and sweet cherry leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 120:28-35.
- Poole, W.D., G.W. Randall, y G.E. Ham. 1983a. Foliar fertilization of soybeans. 1. Effect of fertilizer sources, rates, and frequency of application. *Agron. J.* 75:195-200.
- Poole, W.D., G.W. Randall, y G.E. Ham. 1983b. Foliar fertilization of soybeans. 2. Effect of biuret and application time of day. *Agron. J.* 75:201-203.
- Popp, C., M. Burghardt, A. Friedmann, y M. Riederer. 2005. Characterization of hydrophilic and lipophilic pathways of *Hedera helix* L. Cuticular membranes: Permeation of water and uncharged organic compounds. *Journal of Experimental Botany*. 56:2797-2806.
- Porro, D., C. Dorigatti, M. Stefanini, M. Policarpo, F. Camin, y L. Ziller. 2006. Foliar nitrogen composition and application timing influence nitrogen uptake by, as well as partitioning within, two grapevine cultivars. *Acta Horticulturae*. 721:245-250.
- Prior, S.A., S.G. Pritchard, G.B. Runion, H.H. Rogers, y R.J. Mitchell. 1997. Influence of atmospheric CO₂ enrichment, soil N, and water stress on needle surface wax formation in *Pinus palustris* (pinaceae). *American Journal of Botany*. 84:1070-1077.
- Pushman, F.M., y J. Bingham. 1976. Effects of a granular nitrogen-fertilizer and a foliar spray of urea on yield and bread-making quality of 10 winter wheats. *J. Agric. Sci.* 87:281-292.
- Rabe, E. 1994. Yield benefits associated with pre-blossom low-biuret urea sprays on *Citrus spp.* *Journal of Horticultural Science*. 69:495-500.
- Rains, D.W. 1968. Kinetics and energetics of light-enhanced potassium absorption by corn leaf tissue. *Plant Physiology*. 43:394-&400.
- Ramos, D., G. McGranahan, y L. Hendricks. 1984. Walnuts. *Fruit Varieties Journal*. 38:112-120.

- Ramsey R. J. L., Stephenson G.R., y J.C. Hall. 2005. A review of the effects of humidity, humectants, and surfactant composition on the absorption and efficacy of highly water-soluble herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 82:162-175.
- Rathore, V.S., S.H. Wittwer, W.H. Jyung, Y.P.S. Bajaj, y M.W. Adams. 1970. Mechanism of zinc uptake in bean (*Phaseolus vulgaris*) tissues. *Physiol. Plant.* 23:908-919.
- Ratjen, A.M., y J. Gerendas. 2009. A critical assessment of the suitability of phosphite as a source of phosphorus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 172:821-828.
- Raven, J.A. 1971. Effects of visible light on influx and efflux of solutes in plant cells. *Chemistry & Industry*:859-866.
- Reed, D.W., C.G. Lyons, y G.R. McEachern. 1988. Field-evaluation of inorganic and chelated iron fertilizers as foliar sprays and soil application. *J. Plant Nutr.* 11:1369-1378.
- Reed, D.W., y H.B. Tukey. 1978. Effect of pH on foliar absorption of rubidium compounds by chrysanthemum. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 103:815-817.
- Reed, D.W., y H.B. Tukey. 1982. Light-intensity and temperature effects on epicuticular wax morphology and internal cuticle ultrastructure of carnation and brussels-sprouts leaf cuticles. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 107:417-420.
- Reickenberg, R.L., y M.P. Pritts. 1996. Dynamics of nutrient uptake from foliar fertilizers in red raspberry (*Rubus idaeus* L.). *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 121:158-163.
- Rerkasem, B., y S. Jamjod. 2004. Boron deficiency in wheat: A review. *Field Crops Research*. 89:173-186.
- Restrepo-Díaz, H., M. Benlloch, y R. Fernandez-Escobar. 2008a. Plant water stress and K⁺ starvation reduce absorption of foliar applied K⁺ by olive leaves. *Scientia Horticulturae*. 116:409-413.
- Restrepo-Díaz, H., M. Benlloch, y R. Fernandez-Escobar. 2009. Leaf potassium accumulation in olive plants related to nutritional K status, leaf age, and foliar application of potassium salts. *J. Plant Nutr.* 32:1108-1121.
- Restrepo-Díaz, H., M. Benlloch, C. Navarro, y R. Fernandez-Escobar. 2008b. Potassium fertilization of rainfed olive orchards. *Scientia Horticulturae*. 116:399-403.
- Reuveni, M., y R. Reuveni. 1998a. Foliar applications of mono-potassium phosphate fertilizer inhibit powdery mildew development in nectarine trees. *Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie*. 20:253-258.
- Reuveni, R., y M. Reuveni. 1998b. Foliar-fertilizer therapy - a concept in integrated pest management. *Crop Protection*. 17:111-118.
- Rhee, K.H., E.P. Morriss, J. Barber, y W. Kuhlbrandt. 1998. Three-dimensional structure of the plant photosystem ii reaction centre at 8 angstrom resolution. *Nature*. 396:283-286.
- Riceman, D.S., y G.B. Jones. 1958. Distribution of zinc and copper in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) grown in culture solutions supplied with graduated amounts of zinc. *Australian Jour Agric Res*. 9:73-122.

- Riceman, D.S., y G.B. Jones. 1960. Distribution of recently absorbed zinc in subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.), determined by adding radioactive zinc to the culture solution. *Australian Jour Agric Res.* 2:887-893.
- Riederer, M. 1995. Partitioning and transport of organic chemicals between the atmospheric environment and leaves. In *Plant Contamination. Modeling and Simulation of Organic Chemical Processes*. S. Trapp, J.C. McFarlane, editors. Lewis Publishers, Boca Raton. 153-190.
- Riederer, M., y A. Friedmann. 2006. Transport of lipophilic non-electrolytes across the cuticle. In *Biology of the Plant Cuticle*. Vol. 23. M. Riederer and C. Muller, editors. Blackwell Publishing, 9600 Garsington Rd, Oxford, Oxen, UK. 250-279.
- Riederer, M., y L. Schreiber. 2001. Protecting against water loss: Analysis of the barrier properties of plant cuticles. *Journal of Experimental Botany*. 52:2023-2032.
- Robbertse, P.J., J.J. Lock, E. Stoffberg, y L.A. Coetzer. 1990. Effect of boron on directionality of pollen-tube growth in petunia and agapanthus. *South African Journal of Botany*. 56:487-492.
- Robertson, D., H.P. Zhang, J.A. Palta, T. Colmer, y N.C. Turner. 2009. Waterlogging affects the growth, development of tillers, and yield of wheat through a severe, but transient, N deficiency. *Crop & Pasture Science*. 60:578-586.
- Rodney, D.R. 1952. The entrance of nitrogen compounds through the epidermis of apple leaves. *Proc Amer Soc Hort Sci*. 59:99-102.
- Rombola, A.D., W. Bruggemann, M. Tagliavini, B. Marangoni, y P.R. Moog. 2000. Iron source affects iron reduction and re-greening of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) leaves. *J. Plant Nutr.* 23:1751-1765.
- Rose, T.J., Z. Rengel, Q. Ma, y J.W. Bowden. 2007. Differential accumulation patterns of phosphorus and potassium by canola cultivars compared to wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 170:404-411.
- Rosecrance, R.C., R.S. Johnson, y S.A. Weinbaum. 1998a. The effect of timing of post-harvest foliar urea sprays on nitrogen absorption and partitioning in peach and nectarine trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 73:856-861.
- Rosecrance, R.C., S.A. Weinbaum, y P.H. Brown. 1996. Assessment of nitrogen, phosphorus, and potassium uptake capacity and root growth in mature alternate-bearing pistachio (*Pistacia vera*) trees. *Tree Physiology*. 16:949-956.
- Rosecrance, R.C., S.A. Weinbaum, y P.H. Brown. 1998b. Alternate bearing affects nitrogen, phosphorus, potassium and starch storage pools in mature pistachio trees. *Annals of Botany*. 82:463-470.
- Rosen, C.J., P.M. Bierman, A. Telias, y E.E. Hoover. 2006. Foliar- and fruit-applied strontium as a tracer for calcium transport in apple trees. *Hortscience*. 41:220-224.
- Samuels, L., L. Kunst, y R. Jetter. 2008. Sealing plant surfaces: Cuticular wax formation by epidermal cells. *Annual Review of Plant Biology*. Vol. 59. 683-707.
- Sanchez, E.E., y T.L. Righetti. 1990. Tree nitrogen status and leaf canopy position influence postharvest nitrogen accumulation and efflux from pear leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 115:934-937.
- Sanchez, E.E., y T.L. Righetti. 2005. Effect of postharvest soil and foliar application of boron fertilizer on the partitioning of boron in apple trees. *Hortscience*. 40:2115-2117.

- Sanchez, E.E., T.L. Righetti, D. Sugar, y P.B. Lombard. 1990. Response of Comice pear trees to a postharvest urea spray. *Journal of Horticultural Science*. 65:541-546.
- Sanchez, E.E., S.A. Weinbaum, y R.S. Johnson. 2006. Comparative movement of labelled nitrogen and zinc in 1-year-old peach *Prunus persica* L. batsch trees following late-season foliar application. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 81:839-844.
- Santos, C.H., J. Duarte Filho, J.C. Modesto, y G. Ferreira. 1999. Adubos foliares quelatizados e sais na absorção de boro, manganês e zinco em laranjeira 'pera'. *Scientia Agricola*. 56:999-1004.
- Sanz, A., C. Monerri, J. Gonzalezferrer, y J.L. Guardiola. 1987. Changes in carbohydrates and mineral elements in citrus leaves during flowering and fruit-set. *Physiol. Plant*. 69:93-98.
- Sargent, J.A., y G.E. Blackman. 1962. Studies on foliar penetration. 1. Factors controlling entry of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Journal of Experimental Botany*. 13:348-368.
- Sartori, R.H., A.E. Boaretto, F.C. Alvarez Villanueva, y H.M. Gimenes Fernandes. 2008. Foliar and radicular absorption of ^{65}Zn and its redistribution in citrus plant. *Revista Brasileira De Fruticultura*. 30:523-527.
- Scagel, C.F., G.H. Bi, L.H. Fuchigami, y R.P. Regan. 2008. Rate of nitrogen application during the growing season and spraying plants with urea in the autumn alters uptake of other nutrients by deciduous and evergreen container-grown rhododendron cultivars. *Hortscience*. 43:1569-1579.
- Schlegel, T.K., y J. Schönherr. 2002. Stage of development affects penetration of calcium chloride into apple fruits. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 165:738-745.
- Schlegel, T.K., J. Schönherr, y L. Schreiber. 2005. Size selectivity of aqueous pores in stomatous cuticles of *Vicia faba* leaves. *Planta*. 221:648-655.
- Schlegel, T.K., J. Schönherr, y L. Schreiber. 2006. Rates of foliar penetration of chelated Fe(III): Role of light, stomata, species, and leaf age. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54:6809-6813.
- Schmitz-Eiberger, M.A., R. Haefs, y G.J. Noga. 2002. Enhancing biological efficacy and rainfastness of foliar applied calcium chloride solutions by addition of rapeseed oil surfactants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 165:634-639.
- Schmucker, T. 1934. Über den Einfluß von Borsäure auf Pflanzen, insbesondere keimende Pollenkörner. *Planta*. 23:264-283.
- Schönherr, J. 1976. Water permeability of isolated cuticular membranes - effect of pH and cations on diffusion, hydrodynamic permeability and size of polar pores in cutin matrix. *Planta*. 128:113-126.
- Schönherr, J. 2000. Calcium chloride penetrates plant cuticles via aqueous pores. *Planta*. 212:112-118.
- Schönherr, J. 2001. Cuticular penetration of calcium salts: Effects of humidity, anions, and adjuvants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 164:225-231.
- Schönherr, J. 2006. Characterization of aqueous pores in plant cuticles and permeation of ionic solutes. *Journal of Experimental Botany*. 57:2471-2491.

- Schönherr, J., y P. Baur. 1994. Modeling penetration of plant cuticles by crop protection agents and effects of adjuvants on their rates of penetration. *Pesticide Science*. 42:185-208.
- Schönherr, J., y M.J. Bukovac. 1972. Penetration of stomata by liquids - dependence on surface-tension, wettability, and stomatal morphology. *Plant Physiology*. 49:813-819.
- Schönherr, J., y M.J. Bukovac. 1978. Foliar penetrations of succinic acid 2,2 dimethylhydrazide - mechanism and rate limiting step. *Physiol. Plant*. 42:243-251.
- Schönherr, J., V. Fernández, y L. Schreiber. 2005. Rates of cuticular penetration of chelated Fe(III): Role of humidity, concentration, adjuvants, temperature, and type of chelate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53:4484-4492.
- Schönherr, J., y R. Huber. 1977. Plant cuticles are polyelectrolytes with isoelectric points around 3. *Plant Physiology*. 59:145-150.
- Schönherr, J., y M. Luber. 2001. Cuticular penetration of potassium salts: Effects of humidity, anions, and temperature. *Plant and Soil*. 236:117-122.
- Schönherr, J., y M. Riederer. 1988. Desorption of chemicals from plant cuticles - evidence for asymmetry. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 17:13-19.
- Schönherr, J., y L. Schreiber. 2004. Size selectivity of aqueous pores in astomatous cuticular membranes isolated from *Populus canescens* (aiton) sm. leaves. *Planta*. 219:405-411.
- Schreiber, L. 2005. Polar paths of diffusion across plant cuticles: New evidence for an old hypothesis. *Annals of Botany*. 95:1069-1073.
- Schreiber, L. 2006. Review of sorption and diffusion of lipophilic molecules in cuticular waxes and the effects of accelerators on solute mobilities. *Journal of Experimental Botany*. 57:2515-2523.
- Schreiber, L., y J. Schönherr. 2009. Water and solute permeability of plant cuticles: Measurement and data analysis. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Schreiner, R.P. 2010. Foliar sprays containing phosphorus (P) have minimal impact on 'Pinot Noir' growth and P status, mycorrhizal colonization, and fruit quality. *Hortscience*. 45:815-821.
- Seymour, M., y R.F. Brennan. 1995. Nutrient sprays applied to the foliage of narrow-leaved lupins (*Lupinus angustifolius* L.) during flowering and podding do not increase seed yield. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 35:381-385.
- Shaheen, M.A., N.W. Miles, y G.L. Kreitner. 1981. Lenticel origin on Golden Delicious apple fruits. *Fruit Varieties Journal*. 35:134-136.
- Sharma, P.N., C. Chatterjee, S.C. Agarwala, y C.P. Sharma. 1990. Zinc-deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*). *Plant and Soil*. 124:221-225.
- Sharples, G.C., y R.H. Hilgeman. 1972. Leaf mineral composition of 5 citrus cultivars grown on sour orange and rough lemon rootstocks. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 97:427-430.
- Shaw, G.B., R.B. Mc KERcher, y R. Ashford. 1997. The effect of spray volume on spray partitioning between plant and soil. *Plant and Soil*. 100:323-331.
- Shazly, S.A. 1986. The effect of amino acid chelated minerals in correcting mineral deficiencies and increasing fruit production in Egypt. In *Foliar Feeding of Plants with*

- Amino Acid Chelates. H. De Wayne Ashmead, editor. Noyes Pub., Park Ridge, NJ. 236-254.
- Shelp, B.J. 1988. Boron mobility and nutrition in broccoli (*Brassica oleracea* var *italica*). *Annals of Botany*. 61:83-91.
- Shelp, B.J., P. Vivekanandan, R.A. Vanderpool, y A.M. Kitheka. 1996. Translocation and effectiveness of foliar-fertilized boron in broccoli plants of varying boron status. *Plant and Soil*. 183:309-313.
- Shi, R.L., R. Bassler, C.Q. Zou, y V. Romheld. 2011. Is iron phloem mobile during senescence in trees? A reinvestigation of Rissmuller's finding of 1874. *Plant Physiology and Biochemistry*. 49:489-493.
- Shim, K.K., J.S. Titus, y Splittstoesser W.E. 1972. Utilization of post-harvest urea sprays by senescing apple leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 97:592-596.
- Simoglou, K.B., y C. Dordas. 2006. Effect of foliar applied boron, manganese and zinc on tan spot in winter durum wheat. *Crop Protection*. 25:657-663.
- Singh, A.L., y D. Dayal. 1992. Foliar application of iron for recovering groundnut plants from lime-induced iron-deficiency chlorosis and accompanying losses in yields. *J. Plant Nutr.* 15:1421-1433.
- Smith, M.W., y J.B. Storey. 1979. Zinc concentration of pecan leaflets and yield as influenced by zinc source and adjuvants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 104:474-477.
- Sonmez, S., M. Kaplan, N.K. Sonmez, H. Kaya, y I. Uz. 2006. High level of copper application to soil and leaves reduce the growth and yield of tomato plants. *Scientia Agricola*. 63:213-218.
- Southwick, S.M., W. Olson, J. Yeager, y K.G. Weis. 1996. Optimum timing of potassium nitrate spray applications to 'French' prune trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 121:326-333.
- Sparks, D. 1986. Growth and nutrition of pecan seedlings from potassium phosphate foliar sprays. *Hortscience*. 21:451-453.
- Stangoulis, J., P. Brown, N. Bellaloui, R. Reid, y R. Graham. 2001. The efficiency of boron utilisation in canola. *Australian Journal of Plant Physiology*. 28:1109-1114.
- Stangoulis, J., M. Tate, R. Graham, M. Bucknall, L. Palmer, B. Boughton, y R. Reid. 2010. The mechanism of boron mobility in wheat and canola phloem. *Plant Physiology*. 153:876-881.
- Steiner, C., M.F. Destain, B. Schiffere, y F. Lebeau. 2006. Droplet size spectra and drift effect of two phenmediapham formulations and four adjuvant mixtures. *Crop Protection*. 25:1238-1243.
- Stevens, P.J.G. 1993. Organosilicone surfactants as adjuvants for agrochemicals. *Pesticide Science*. 38:103-122.
- Stock, D., y P.J. Holloway. 1993. Possible mechanisms for surfactant-induced foliar uptake of agrochemicals. *Pesticide Science*. 38:165-177.
- Strik, B., T. Righetti, y G. Buller. 2004. Influence of rate, timing, and method of nitrogen fertilizer application on uptake and use of fertilizer nitrogen, growth, and yield of

- June-bearing strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 129:165-174.
- Swader, J.A., C.R. Stocking, y C.H. Lin. 1975. Light-stimulated absorption of nitrate by *Wolffia arrhiza*. *Physiol. Plant*. 34:335-341.
- Swietlik, D. 2002. Zinc nutrition of fruit crops. *Horttechnology*. 12:45-50.
- Swietlik, D., J.A. Bunce, y S.S. Miller. 1984. Effect of foliar application of mineral nutrients on stomatal aperture and photosynthesis in apple seedlings. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 109:306-312.
- Swietlik, D., y M. Faust. 1984. Foliar nutrition of fruit crops. *In* Janick, J. 287-356.
- Swietlik, D., y J.V. Laduke. 1991. Productivity, growth, and leaf mineral-composition of orange and grapefruit trees foliar-sprayed with zinc and manganese. *J. Plant Nutr.* 14:129-142.
- Syverud, T.D., L.M. Walsh, E.S. Oplinger, y K.A. Kelling. 1980. Foliar fertilization of soybeans (*Glycine max* L.). *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 11:637-651.
- Tadros, T.F. 1995. Physical chemistry of surfactant solutions. *In* Surfactants in Agrochemicals. J. Cross, editor. Marcel Dekker, New York. 7-29.
- Tagliavini, M., J. Abadia, A.D. Rombola, A. Abadia, C. Tsipouridis, y B. Marangoni. 2000. Agronomic means for the control of iron deficiency chlorosis in deciduous fruit trees. *J. Plant Nutr.* 23:2007-2022.
- Tagliavini, M., P. Millard, y M. Quartieri. 1998. Storage of foliar-absorbed nitrogen and remobilization for spring growth in young nectarine (*Prunus persica* var. Nectarina) trees. *Tree Physiology*. 18:203-207.
- Takeoka, Y., K. Kondo, y P.B. Kaufman. 1983. Leaf surface fine-structures in rice plants cultured under shaded, and non-shaded conditions. *Japanese Journal of Crop Science*. 52:534-543.
- Taylor, W.A., A.R. Womac, P.C.H. Miller, y B.P. Taylor. 2004. An attempt to relate drop size to drift risk. *Proceedings of the International Conference on Pesticide Application for Drift Management*. 210-223.
- Thalheimer, M., y N. Paoli. 2002. Influence of foliar nutrient spray concentrations on leaf absorption and phytotoxicity in apple. *Acta Horticulturae*. 594:595-600.
- Tisdale, S.L., y W.L. Nelson. 1975. Soil fertility and fertilizers. MacMillan, New York.
- Tomar, J.S., A.F. Mackenzie, G.R. Mehuys, y I. Alli. 1988. Corn growth with foliar nitrogen, soil-applied nitrogen, and legume intercrops. *Agron. J.* 80:802-807.
- Toselli, M., M. Thalheimer, y M. Tagliavini. 2004. Leaf uptake and subsequent partitioning of urea-N as affected by the concentration and volume of spray solution and by the shoot leaf position in apple (*Malus domestica*) trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 79:97-100.
- Tosi, L., y E. Malusa. 2002. Phosphate foliar fertilization as source of phosphite residues. *Acta Horticulturae*. 594:283-287.
- Tuck, C.R., M.C. Butler Ellis, y P.C.H. Miller. 1997. Techniques for measurement of droplet size and velocity distributions in agricultural sprays. *Crop Protection*. 16:619-628.

- Tukey, H.B., M.J. Bukovac, y S.H. Wittwer. 1961. Absorption of radionuclides by aboveground plant parts and movement within plant. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 9:106-112.
- Turgeon, R. 2006. Phloem loading: How leaves gain their independence. *Bioscience*. 56:15-24.
- Turley, R.H., y T.M. Ching. 1986. Physiological-responses of barley leaves to foliar applied urea-ammonium nitrate. *Crop Sci*. 26:987-993.
- Turrell, F.M. 1947. Citrus leaf stomata - structure, composition, and pore size in relation to penetration of liquids. *Botanical Gazette*. 108:476-483.
- Tyree, M.T., T.D. Scherbatskoy, y C.A. Tabor. 1990. Leaf cuticles behave as asymmetric membranes - evidence from the measurement of diffusion potentials. *Plant Physiology*. 92:103-109.
- Tyree, M.T., C.R. Wescott, C.A. Tabor, y A.D. Morse. 1992. Diffusion and electric mobility of KCl within isolated cuticles of *Citrus aurantium*. *Plant Physiology*. 99:1057-1061.
- Uhlig, B.A., y A.H. Wissemeier. 2000. Reduction of non-ionic surfactant phytotoxicity by divalent cations. *Crop Protection*. 19:13-19.
- Val, J., y V. Fernandez. 2011. In-season calcium-spray formulations improve calcium balance and fruit quality traits of peach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 174:465-472.
- Valkama, E., J.P. Salminen, J. Koricheva, y K. Pihlaja. 2004. Changes in leaf trichomes and epicuticular flavonoids during leaf development in three birch taxa. *Annals of Botany*. 94:233-242.
- van de Zande, J.C., H.J. Holterman, y M. Wenneker. 2008a. Nozzle classification for drift reduction in orchard spraying: Identification of drift reduction class threshold nozzles. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal Manuscript ALNARP 08 0013*.
- van de Zande, J.C., J.F.M. Huijsmans, H.A.J. Porskamp, J.M.G.P. Michielsen, H. Stallinga, H.J. Holterman, y A. de Jong. 2008b. Spray techniques: How to optimise spray deposition and minimise spray drift? *Environmentalist*. 28:9-17.
- Van Goor, B.J. 1973. Penetration of surface applied calcium-45 into apple fruit. *Journal of Horticultural Science*. 48:261-270.
- Van Goor, B.J., y D. Wiersma. 1976. Chemical forms of manganese and zinc in phloem exudates. *Physiol. Plant*. 36:213-216.
- Varga, B., y Z. Svecnjak. 2006. The effect of late-season urea spraying on grain yield and quality of winter wheat cultivars under low and high basal nitrogen fertilization. *Field Crops Research*. 96:125-132.
- Villena, J.F., E. Dominguez, D. Stewart, y A. Heredia. 1999. Characterization and biosynthesis of non-degradable polymers in plant cuticles. *Planta*. 208:181-187.
- Von Mohl, H. 1847. Untersuchungender Frage: bildet die Cellulose die Grundlage Sammtlicher Vegetabilischen Membranen. *Botanische Zeitung* 5, 497-505.
- Vu, D.T., Huang, L., Nguyen A.H., Du, Y., Xu, Z., Hampton, A. M., Peng, L., y V. Rudolph. 2013. Quantitative methods for estimating foliar uptake of zinc from

- suspension-based Zn chemicals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176(5):764-775.
- Wagner, G.J., E. Wang, y R.W. Shepherd. 2004. New approaches for studying and exploiting an old protuberance, the plant trichome. *Annals of Botany*. 93:3-11.
- Wagner, P., R. Furstner, W. Barthlott, y C. Neinhuis. 2003. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces. *Journal of Experimental Botany*. 54:1295-1303.
- Walker, D.R., y E.G. Fisher. 1955. Foliar sprays of urea on sour cherry trees. *Proc Amer Soc Hort Sci*. 66:21-27.
- Wang, C.J., y Z.Q. Liu. 2007. Foliar uptake of pesticides - present status and future challenge. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 87:1-8.
- Waters, B.M., y R.P. Sankaran. 2011. Moving micronutrients from the soil to the seeds: Genes and physiological processes from a biofortification perspective. *Plant Science*. 180:562-574.
- Weichert, H., y M. Knoche. 2006a. Studies on water transport through the sweet cherry fruit surface. 10. Evidence for polar pathways across the exocarp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54:3951-3958.
- Weichert, H., y M. Knoche. 2006b. Studies on water transport through the sweet cherry fruit surface. 11. FeCl_3 decreases water permeability of polar pathways. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54:6294-6302.
- Weinbaum, S. 1988. Foliar nutrition in fruit trees. In *Plant Growth and Leaf Applied Chemicals*. P.M. Neumann, editor. CRC Press, Boca Raton. 81-100.
- Werker, E. 2000. Trichome diversity and development. *Advances in Botanical Research Incorporating Advances in Plant Pathology, Vol 31* 2000. 31:1-35.
- White, P.J., y M.R. Broadley. 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*. 92:487-511.
- White, P.J., y M.R. Broadley. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets - iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*. 182:49-84.
- Will, S., T. Eichert, V. Fernandez, J. Moehring, T. Mueller, y V. Roemheld. 2011. Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex. *Plant and Soil*. 344:283-293.
- Williams, C.M.J., N.A. Maier, y L. Bartlett. 2004. Effect of molybdenum foliar sprays on yield, berry size, seed formation, and petiolar nutrient composition of "Merlot" grapevines. *J. Plant Nutr.* 27:1891-1916.
- Wimmer, M.A., K.H. Muhling, A. Lauchli, P.H. Brown, y H.E. Goldbach. 2003. The interaction between salinity and boron toxicity affects the subcellular distribution of ions and proteins in wheat leaves. *Plant Cell and Environment*. 26:1267-1274.
- Witte, C.P. 2011. Urea metabolism in plants. *Plant Science*. 180:431-438.
- Wittwer, S.H., M.J. Bukovac, W.H. Jyung, Y. Yamada, R. De, Rasmussen H.P., Haile Mariam S.N., y S. Kannan. 1967. Foliar absorption - penetration of cuticular membrane and nutrient uptake by isolated leaf cells. *Qualitas Plantarum Et Materiae Vegetabiles*. 14:105-120.
- Wittwer, S.H., y F.G. Teubner. 1959. Foliar absorption of mineral nutrients. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* 10:13-32.

- Witty, J.F., R.J. Roughley, y J.M. Day. 1980. Reduction of yield of *Vicia faba* by foliar fertilization during the seed-filling period. *J. Agric. Sci.* 94:741-743.
- Wojcik, P. 2004. Uptake of mineral nutrients from foliar fertilization - (review). *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. 12:201-218.
- Wojcik, P., y M. Wojcik. 2006. Effect of boron fertilization on sweet cherry tree yield and fruit quality. *J. Plant Nutr.* 29:1755-1766.
- Woolfolk, C.W., W.R. Raun, G.V. Johnson, W.E. Thomason, R.W. Mullen, K.J. Wynn, y K.W. Freeman. 2002. Influence of late-season foliar nitrogen applications on yield and grain nitrogen in winter wheat. *Agron. J.* 94:429-434.
- Xia, G.H., y L.L. Cheng. 2004. Foliar urea application in the fall affects both nitrogen and carbon storage in young 'Concord' grapevines grown under a wide range of nitrogen supply. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 129:653-659.
- Yamada, Y., M.J. Bukovac, y S.H. Wittwer. 1964a. Penetration of ions through isolated cuticles. *Plant Physiology*. 39:28.
- Yamada, Y., S.H. Wittwer, y M.J. Bukovac. 1964b. Penetration of organic compounds through isolated cuticles with special reference to urea. *Plant Physiology*. 39:R11.
- Yeats, T. H., y J. K. Rose. 2013. The formation and function of plant cuticles. *Plant Physiology* 163:5-20.
- Yildirim, E., I. Guvenc, M. Turan, y A. Karatas. 2007. Effect of foliar urea application on quality, growth, mineral uptake and yield of broccoli (*Brassica oleracea* L., var. Italica). *Plant Soil and Environment*. 53:120-128.
- Young, K. 1979. Binding-energy in model classical field-theories. *Nuclear Physics B*. 158:77-101.
- Zabkiewicz, J.A. 2002. Adjuvants and herbicidal efficacy – present status and future prospects. *Weed Research*. 40:139-149.
- Zaragoza, S., C. Gazzola, I. Trenor, E. Alonso, E. Primo-Milo, V. Almela, M. Juan, y M. Agusti. 1996. Control of peel pitting of "Fortune" mandarin. *Proc. Int. Soc. Citriculture*:1105-1109.
- Zhang, Q.L., y P.H. Brown. 1999a. Distribution and transport of foliar applied zinc in pistachio. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 124:433-436.
- Zhang, Q.L., y P.H. Brown. 1999b. The mechanism of foliar zinc absorption in pistachio and walnut. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 124:312-317.
- Zhang, Y., R. Shi, K.M. Rezaul, F. Zhang, y C. Zou. 2010. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 58:12268-12274.

