

Eyal Ronen
Gerente Regional para América del Sur de Haifa Chemicals.
Email: eyalr@haifachem.com

Introducción

La fertilización foliar es un método confiable para la fertilización de las plantas cuando la nutrición proveniente del suelo es ineficiente. En este artículo se remarcará cuándo se debe tener en cuenta la fertilización foliar, cómo los nutrientes penetran realmente en el tejido de las plantas y algunas de las limitaciones técnicas existentes en este método de fertilización.

Se ha considerado tradicionalmente que la forma de nutrición para las plantas es a través del suelo, donde se supone que las raíces de la planta absorberán el agua y los nutrientes necesarios. Sin embargo, en los últimos años, se ha desarrollado la fertilización foliar para proporcionar a las plantas sus reales necesidades nutricionales.

El desarrollo de equipo de riego presurizado, como es el caso del riego por goteo, ha promovido la necesidad de disponer de fertilizantes solubles en agua, tan limpios y purificados como sea posible para disminuir la posibilidad de obstrucción de los emisores. No queda claro cuándo comenzó a utilizarse la fertilización foliar, pero luego del desarrollo de fertilizantes solubles en agua o líquidos, los agricultores comenzaron a utilizarlos con los mismos pulverizadores que utilizaban en la aplicación de pesticidas. Al comienzo, esta técnica de pulverización fue utilizada para corregir las deficiencias en micronutrientes, pero la corrección rápida ha mostrado que las plantas pueden absorber algunos elementos a través de su tejido foliar. Como resultado de ello, la fertilización foliar continuó avanzando y desarrollándose en forma continua. Actualmente la fertilización foliar es considerada el mejor complemento de la fertilización edáfica, para cubrir las necesidades nutricionales de las plantas.

En este artículo se efectúa una completa revisión del concepto de aplicaciones foliares, cuándo deben ser, cómo penetran los nutrientes en el tejido de las plantas y también se detallan algunas de las limitaciones técnicas.

La fertilización foliar

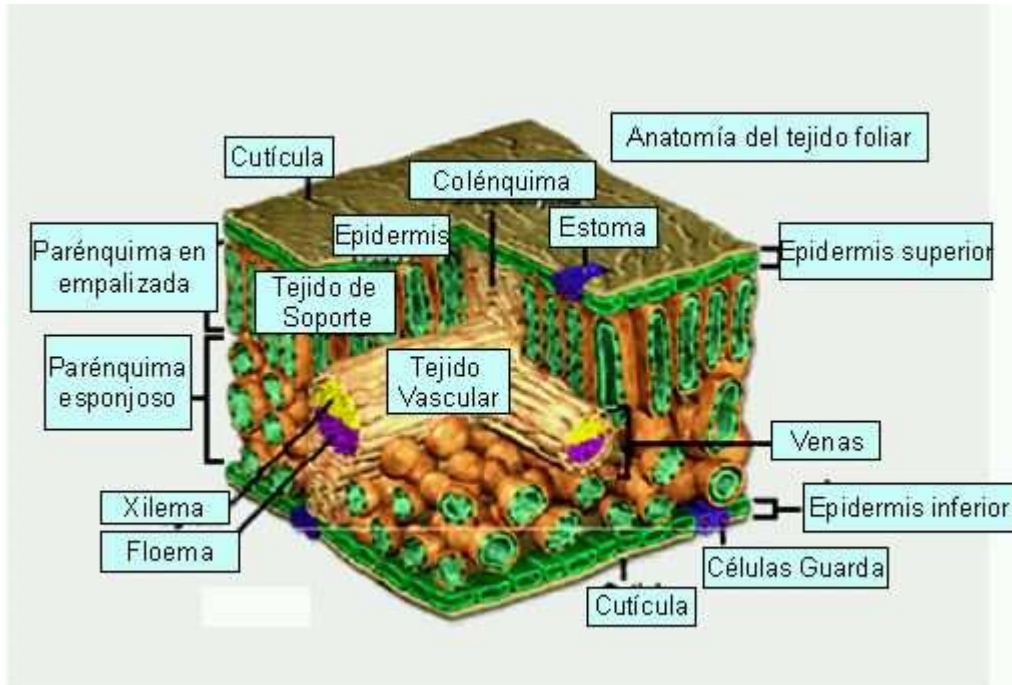
La fertilización foliar es una aproximación "by-pass" que complementa a las aplicaciones convencionales de fertilizantes edáficas, cuando éstas no se desarrollan suficientemente bien. Mediante la aplicación foliar se superan las limitaciones de la fertilización del suelo tales como la lixiviación, la precipitación de fertilizantes insolubles, el antagonismo entre determinados nutrientes, los suelos heterogéneos que son inadecuados para dosificaciones bajas, y las reacciones de fijación/absorción como en el caso del fósforo y el potasio.

La fertilización foliar puede ser utilizada para superar problemas existentes en las raíces cuando éstas sufren una actividad limitada debido a temperaturas bajas/altas (<10°, >40°C), falta de oxígeno en campos inundados, ataque de nematodos que dañan el sistema radicular, y una reducción en la actividad de la raíz durante las etapas reproductivas en las cuales la mayor parte de los fotoasimilados es transferida para reproducción, dejando pocos para la respiración de la raíz (Trobisch y Schilling, 1970). La nutrición foliar ha probado ser la forma más rápida para curar las deficiencias de nutrientes y acelerar la performance de las plantas en determinadas etapas fisiológicas. Con el cultivo compitiendo con las malezas, la pulverización foliar focaliza los nutrientes sólo en aquellas plantas seleccionadas como destino. Se ha encontrado además que los fertilizantes son químicamente compatibles con los pesticidas, y de esta forma se ahorran costos y mano de obra. Cierta tipo de fertilizantes puede incluso desacelerar la tasa de hidrólisis de pesticidas/hormonas de crecimiento (GA3), debiendo bajarse el pH de la solución y lográndose de esta forma mejorar la performance o reducir costos.

Los fertilizantes aplicados a través de la superficie de las hojas (canopia), deben afrontar diversas barreras estructurales a diferencia de los pesticidas, que están principalmente basados en aceite y que no presentan dificultades para penetrar en este tejido. Los fertilizantes que están basados en sales (cationes/aniones) pueden presentar algunos problemas para penetrar las células interiores del tejido de la planta. La estructura general de la

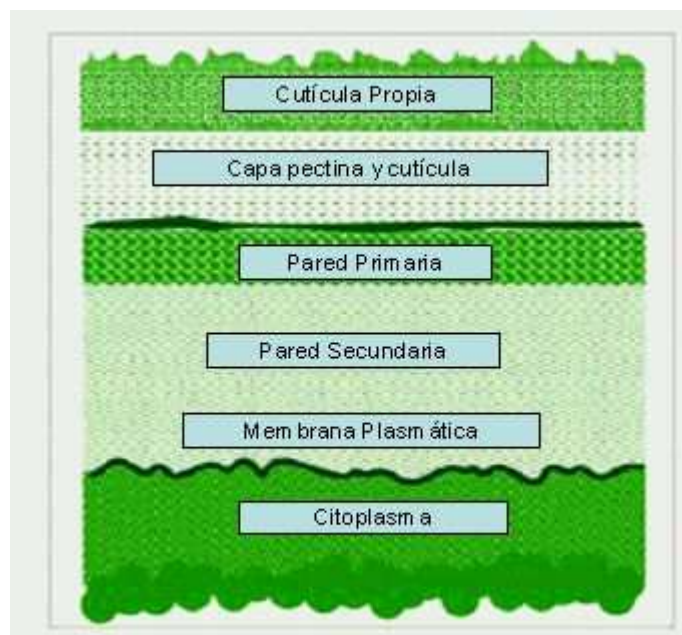
hoja está basada en diversas capas, celulares y no celulares. Las diferentes capas (Figura 1) proporcionan protección contra la desecación, la radiación UV y con respecto a diversos tipos de agentes físicos, químicos y microbiológicos.

Figura 1



Las diferentes capas están caracterizadas por la carga eléctrica negativa que influye en la forma y en la tasa de penetración de los diferentes iones. Algunas capas son hidrofóbicas y por lo tanto rechazan el rocío que está basado en agua (Figura 2).

Figura 2



La primera capa exterior es de cera, la cual es extremadamente hidrofóbica. Las células epidérmicas sintetizan la cera y cristalizan en formas intrincadas constituidas por barras, tubos o platos. Esta capa puede cambiar durante el ciclo de crecimiento de la planta. La segunda capa, conocida como "cutícula real", es una capa protectora no celular rodeada de cera hacia el lado superior y también hacia el inferior. Está constituida principalmente de

"cutina" (macromolécula polimérica consistente en ácidos grasos de cadena larga que le brindan un carácter semi-hidrofílico). La capa siguiente es la "pectina", cargada negativamente y constituida por polisacáridos que forman un tejido tipo gel basado en ácidos con azúcar (celulosa y materiales pécticos) y a continuación encontramos el lado exterior de las células comenzando con la pared primaria. La cutícula tiene una densidad de carga negativa debido a la pectina y a la cutina (Franke, 1967; Marschner, 1986).

¿Cómo penetran los nutrientes en el tejido de las plantas?

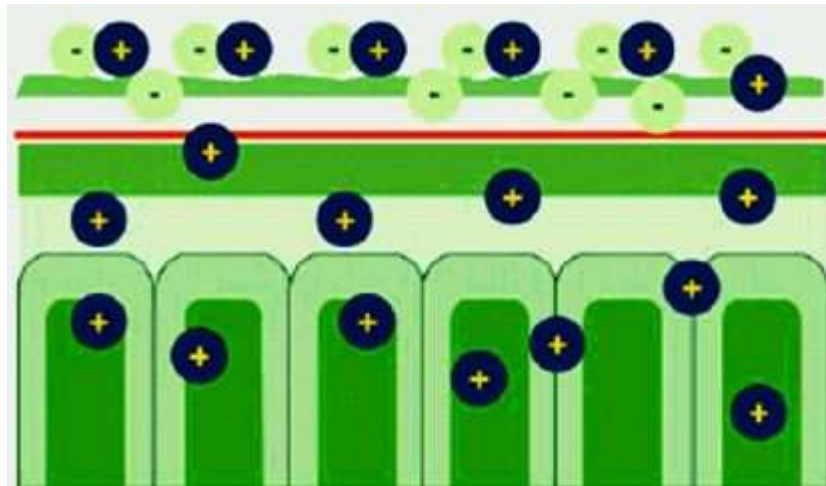
Cuando nos referimos a la penetración de nutrientes podemos definir dos movimientos:

1. Hacia el tejido desde el exterior, que se conoce como absorción
2. Desde el punto de penetración hacia otras partes de la planta, conocido como traslado.

La penetración/absorción puede ser realizada a través de diversos elementos que existen en el tejido. La penetración principal se realiza directamente a través de la cutícula y se realiza en forma pasiva. Los primeros en penetrar son los cationes dado que éstos son atraídos hacia las cargas negativas del tejido, y se mueven pasivamente de acuerdo al gradiente – alta concentración afuera y baja adentro. Luego de un cierto período los cationes que se han movido hacia dentro modifican el equilibrio eléctrico en el tejido

provocando que éste sea menos negativo y más positivo. Desde este punto, los aniones comienzan a penetrar el tejido de la misma forma como se ha descrito para los cationes (Figura 3). Dado que la penetración es pasiva, la tasa de difusión a través de la membrana es proporcional al gradiente de concentración, por lo tanto se consigue una concentración alta sin chamuscar el tejido; esto podría mejorar la penetración en forma muy significativa.

Figura 3



La penetración tiene lugar también a través de los estomas, que tienen su apertura controlada para realizar un intercambio de gases y el proceso de transpiración. Se sabe que estas aperturas difieren entre las distintas especies vegetales, en su distribución, ocurrencia, tamaño y forma. En cultivos latifoliados y en árboles, la mayor parte de los estomas están en la superficie inferior de la hoja, mientras que en las especies de gramíneas tienen el mismo número en ambas superficies. El tamaño puede variar, por ejemplo, el estoma

del sorgo es cuatro veces más grande que el estoma del haba. Se estima que la penetración tiene lugar debido a la alta densidad del poro de la cutícula en las paredes de las células, entre células de guarda y células subsidiarias (Maier-Maercker, 1979). Además, los poros cercanos a las células de guarda del

estoma parecen tener diferentes características de permeabilidad (Schonherr y Bukovac, 1978). Existe una opinión opuesta, que dice que la penetración a través del estoma abierto no juega un papel importante dado que la cubierta de la cutícula también cubre la superficie de las células de guarda en las cavidades del estoma y debido a que las tasas de absorción del ion son normalmente más altas a la noche cuando los estomas están relativamente cerrados.

Otro camino por el que los nutrientes pueden penetrar es a través de órganos del tamaño de un cabello conocidos como "tricomas", que son crecimientos epidérmicos de diversos tipos. La importancia de este camino depende de la cantidad de tricomas, posición, su origen y edad de la hoja (Hull et al., 1975; Haynes y Goh, 1977).

Traslado

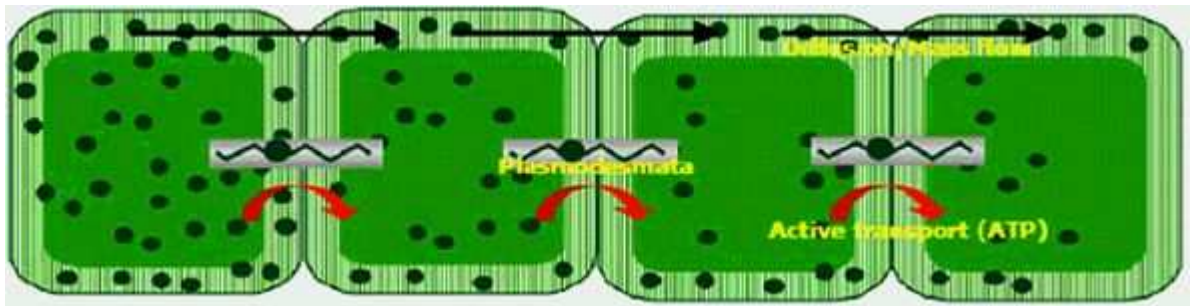
Luego de que los iones hayan penetrado comienza el transporte hacia las diferentes partes de la planta y esto se conoce con el nombre de traslado. El mismo se realiza mediante dos mecanismos:

- Transporte célula a célula, conocido como "movimiento apoplástico"
- Transporte a través de los canales vasculares, conocido como "movimiento simplástico".

El movimiento apoplástico describe el movimiento desde una célula hacia la otra. Esto es realizado por tres mecanismos (Figura 4):

- El transporte pasivo involucra a la difusión de acuerdo al gradiente y al flujo de masa a través del movimiento agua/fluido entre células.
- La absorción por la superficie de la membrana citoplasmática por medio de los plasmodesmos, que son canales microscópicos que conectan una pared de la célula con otra permitiendo el transporte y la comunicación entre ellas.
- El transporte activo (ATP) contra el gradiente, habilitado debido a la inversión de energía de las moléculas ATP.

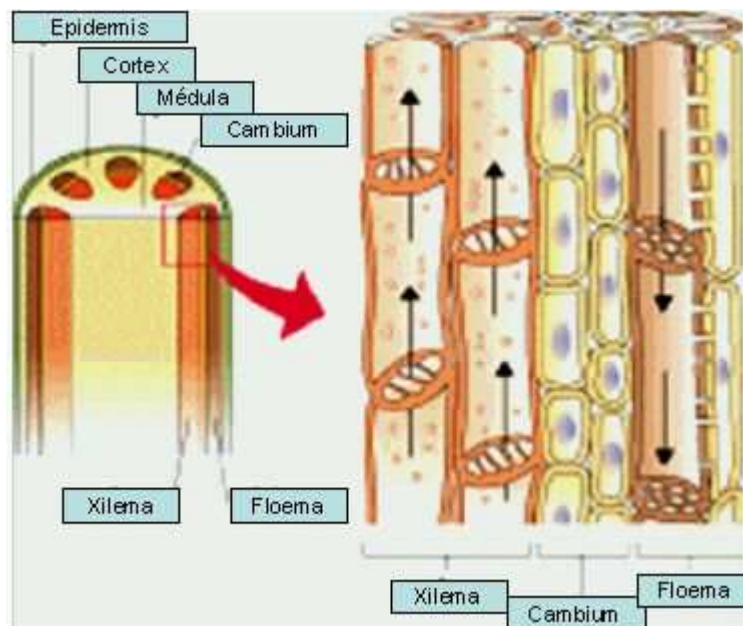
Figura 4



El movimiento simplástico, describe la descarga del ion en el sistema vascular. Esta se realiza a través de dos sistemas (Figura 5):

- El traslado del floema: es dependiente de la energía y más adecuado para los cationes divalentes (C^{2+}); los aniones están muy limitados dado que la pared de la célula está cargada negativamente (Van Steveninck y Chenoweth, 1972). El transporte del floema es importante para la distribución desde las hojas maduras hacia las regiones de crecimiento en las raíces y tallos. El movimiento del floema sigue en forma regular la relación "fuente – consumo", de lugares donde los carbohidratos son creados (fuente) hacia los lugares donde son consumidos (sumidero).
- El traslado Xilémico – es de flujo regulado y depende de la diferencia de potencial de agua entre el suelo, la hoja y la atmósfera.

Figura 5



El traslado difiere entre iones distintos, por lo tanto, los nutrientes se dividen en tres grupos (Bukovac y Wittwer, 1957):

- Móviles
- Parcialmente móviles
- Inmóviles

Tabla 1

Movilidad	Nutrientes de las plantas				
Móvil	N	P	K	S	Cl
Parcialmente móvil	Zn	Cu	Mn	Fe	Mo
Inmóvil	Ca	Mg			

(Bukovac y Wittwer, 1957; Kunnan, 1980)

Limitaciones de la alimentación foliar

A pesar de que la nutrición foliar se describe como un método de aplicación que podría sortear una serie de problemas que se encuentren en las aplicaciones edáficas, no es perfecta y tiene sus limitaciones:

- Tasas de penetración bajas, particularmente en hojas con cutículas gruesas y cerosas.
- Se escurre en superficies hidrofóbicas.
- Se lava con la lluvia.
- Rápido secado de las soluciones de rociado lo cual no permite la penetración de los solutos.
- Tasas limitadas de traslado de ciertos nutrientes minerales.
- Cantidades limitadas de macronutrientes, que pueden ser suministrados en un rociado foliar.
- Posible daño de la hoja (necrosis y quemado). Obliga a costos y tiempos extras debido a aplicaciones repetidas.
- Pérdida de rociado en sitios no seleccionados como objetivos.
- Limitada superficie efectiva disponible de la hoja (plantas de semilla o dañadas).

La efectividad de la fertilización foliar puede estar sujeta a diversos factores. Estos factores pueden dividirse en cuatro grupos principales:

- Solución de rociado
- Condiciones ambientales
- Características de la hoja
- Estado de la planta.

Existen diversos factores que juegan un rol importante en la solución de rociado:

• pH de la solución: El pH afecta principalmente el nivel de solubilidad de diversos elementos tales como el fósforo, el cual mejora su solubilidad a medida que el pH de la solución disminuye. El pH puede afectar la forma iónica de los elementos y esto puede afectar también la tasa de penetración. Al margen de los aspectos relacionados con la penetración, un pH bajo puede reducir la tasa de hidrólisis alcalina de distintos pesticidas (Tabla 2).

El pH tiene también sus efectos sobre el tejido. Las cutículas de las plantas son polielectrolitos con puntos isoeléctricos con valores de alrededor de 3,0. Con valores de pH menores que el punto isoeléctrico, las membranas cuticulares llevan una carga positiva neta y son selectivas a los aniones, y, por el contrario, con valores de pH por sobre el punto isoeléctrico las membranas tienen una carga negativa neta y son selectivas a los cationes (Schonherr y Huber, 1977). Estos descubrimientos dan soporte a la hipótesis del "canal hidrofílico" que es utilizado por algunos surfactantes.

Tabla 2

Nombre comercial	Nombre común	pH de la Solución	50% Descomposición
Benlate	Benomil	7,0	1 hora

Guthion	Metil azinfós	9,0	12 horas
		7,0	10 días
		5,0	17 días
Captan	Captan	10,0	2 minutos
		4,0	4 horas
Furadan	Carbofuran	9,0	78 horas
		7,0	40 días
		6,0	200 días

- Etapa iónica/tipo de molécula: los materiales con alto peso molecular penetran en forma más lenta que aquellos con bajo peso molecular (Haile, 1965; Kannan, 1969).
- Tensión del agua de la solución: la disminución en la tensión superficial interfacial de una gota de agua incrementa los sitios de exposición para la absorción en dirección a la hoja (Leece, 1976). Una tensión del agua inferior también mejora la penetración a través del estoma (Greene y Bukovac, 1974). El uso de surfactantes puede ayudar a reducir la tensión del agua dado que transportan una cola lipídica no polar (lipófila), que se alinea a sí misma con la cutícula y la cabeza hidrofílica (hidrófila) con a gota de agua provocando que se amplíe su ángulo de contacto y alcance una mayor superficie de adherencia con la hoja.
- Tamaño de la gota de rociado: los diferentes tamaños de gota pueden afectar la interacción con la superficie objetivo y la posible pérdida de la solución desde la planta seleccionada. Gotas más grandes pueden resistir la pérdida pero disminuyen la penetración a través del follaje (canopia) de la planta.

El ambiente puede tener influencia en la absorción de la hoja, en el desarrollo de la cutícula o en las reacciones fisiológicas relacionadas con el mecanismo de absorción activo (Flore y Bukovac, 1982). Entre los principales factores con influencia se encuentran:

- Humedad – tiene una influencia directa sobre la tasa de deshidratación de la gota de rociado. Cuando la humedad es alta, la solución estará activa por un período más largo permitiendo que los solutos penetren antes de que ésta se seque completamente. Hasta cierto punto, la deshidratación puede acelerar la tasa de penetración en la medida en que ella aumenta la concentración de los solutos, de esta forma el gradiente aumenta hasta que se seque cuando la penetración está demorada y los solutos cristalizan. La humedad tiene influencia sobre el desarrollo y el estado fisiológico. En condiciones de baja humedad el estoma se cierra y las plantas pueden desarrollar una cutícula más gruesa; en condiciones de humedad alta, los estomas se abren y las plantas pueden desarrollar una cutícula más delgada.
- Temperatura – cuando la deshidratación de la solución no es un factor limitante, la suba de temperatura aumenta la absorción (Jyung et al., 1964). La temperatura puede tener relaciones negativas con la humedad – cuando la temperatura disminuye, la humedad puede aumentar (Cook y Boynton). Otra idea en pie expresa que una temperatura aumentada disminuye la viscosidad de la cutícula y por ello, aumenta la tasa de penetración.
- Luz – con altos niveles de luz la cutícula y las capas de cera son gruesas comparadas con niveles bajos de luz (Macey, 1970; Hallam, 1970; Reed y Tuley, 1982). El efecto de la luz se puede relacionar con la apertura de los estomas y la temperatura, como resultado de la radiación.

Efectos de las características de las plantas, principalmente con relación a la estructura de la hoja:

- Edad de la hoja – a medida que la hoja envejece tiende a engrosar y a tener una mayor cantidad de cera y un tejido de cutícula más amplio. Esta barrera aumentada reduce la tasa de penetración.
- Superficie de la hoja – algunas plantas tienen una alta densidad de pelos (tricomas), que pueden provocar que las gotas de rociado no hagan contacto con la superficie real de la hoja – las gotas de agua "descansan" sobre estos pelos. La

plantas. Las superficies más suaves pueden provocar que el rociado se deslice con una menor tasa de adherencia, mientras que las superficies más rugosas retendrán a las gotas de rociado y tendrán una mayor tasa de adherencia.

- Disposición de las hojas: el ángulo de la hoja en dirección al suelo tiene influencia en la retención de la solución de rociado en la superficie de la hoja (De Rutter et al., 1990).
- Forma de la hoja: las diferentes formas de la hoja pueden determinar la superficie efectiva en contacto con las gotas de rociado.
- Plantas de diferentes especies: Las plantas pueden dividirse en aquellas que crecen en habitats húmedos (hidromórficos) y en habitats secos (xeromórficos) y difieren en el grosor de la cutícula, la posición de los estomas (adaxial = lado superior / abaxial = lado inferior), y su forma.

El estado fisiológico de las plantas puede conllevar en forma asociada un efecto determinado en las plantas con una menor actividad metabólica, una menor actividad "sumidero", resultando un menor traslado.

Una aplicación foliar exitosa depende de diversos factores. Algunos de ellos están en manos de los propios agricultores y pueden ser utilizados en forma efectiva, mientras que otros no. En general, se recomienda efectuar el rociado bien temprano durante la mañana o si no bien tarde o cercano al ocaso, ya que la radiación solar y la temperatura son bajas (18-19°C; ideal 21°C), la velocidad del viento es baja (menos de 8 kph), y la humedad es alta (mayor que 70% de humedad relativa). El mejor horario es al final del día, dado que permite una absorción más efectiva, antes de que la solución se vuelva seca e inactiva. Aún siguiendo las reglas descritas en este artículo, pueden continuar existiendo algunos problemas, que pueden ser manejados de la siguiente forma:

- Pérdida: Si hay pérdida de rociado en sitios más allá de las plantas seleccionados, se debe aumentar el tamaño de la gota.
- Cobertura pobre: En ese caso se deben utilizar volúmenes de rociado más grandes con presiones de rociado más altas.
- Pobre adherencia o penetración cuticular: El agregado de un surfactante de baja tensión superficial puede ayudar a solucionar el problema.
- Retención pobre: El tamaño de la gota de rociado debe ser reducida y la viscosidad de la solución aumentada mediante agregado de adhesivos poliméricos.
- Secado rápido: A medida que la solución se va secando se va inhibiendo la penetración. El agregado de aceite y emulsión puede preservar la humedad necesaria y solucionar el problema.
- Concentración no-efectiva: La importancia es alta en la medida en que la penetración se realiza en forma pasiva, dependiendo del gradiente. La aplicación debe seguir a la concentración más alta posible sin que se quemen o chamusquen las hojas. Pre: test para determinar la fitotoxicidad y el umbral de daño. Si se usa una concentración más baja, la compensación vendrá asociada con una mayor cantidad de aplicaciones.

La fototoxicidad aparece principalmente en la forma de quemadura en la hoja. La toxicidad es el resultado del efecto osmótico de una solución salina altamente concentrada cuando el agua de las gotas del pulverizado se evapora. El desequilibrio de los nutrientes locales en la hoja es otro de los factores que

puede provocar toxicidad. Por ejemplo, el daño por urea puede ser prevenido mediante el agregado de sacarosa, sin importar el incremento adicional en el potencial osmótico del rociado foliar (Barel y Black, 1979).

Cabe destacar que si la fototoxicidad no se observa en forma inmediata, puede llegar a aparecer en etapas posteriores del cultivo si las pulverizaciones son muy rápidas y el intervalo es demasiado corto, dando como resultado una acumulación de elementos tóxicos en el tejido. Las plantas pueden mostrar síntomas de fitotoxicidad aún cuando la concentración de la solución esté en el nivel correcto o estén fisiológicamente estresadas, ya sea por agua, ataque de insectos, o por aparición de enfermedades.

Conclusiones

En este artículo se ha revisado el concepto de nutrición de las plantas mediante pulverización foliar. Resulta obvio que la fertilización foliar es un método bueno y confiable para la nutrición de las plantas cuando la fertilización edáfica no es suficiente y/o ineficiente. Es importante comprender que este método no puede sustituir a la

provisión de nutrientes a través de las raíces, dado que la absorción de todos los nutrientes de las plantas a través de las hojas involucra una cantidad considerable de mano de obra con un alto riesgo de fitotoxicidad. La fertilización foliar tiene sus limitaciones y en algunos casos puede ser considerado trabajoso. No obstante, a lo largo de los años ha alcanzado un lugar de honor en los diferentes esquemas de nutrición de las plantas. La utilización de fertilizantes altamente solubles y nutrientes puros es esencial para alcanzar la mejor performance desde este enfoque.

Existen compatibilidad entre muchos fertilizantes y pesticidas, pudiendo ser mezclados en el mismo pulverizador para ahorrar costos, mano de obra. Siendo una verdadera ventaja cada vez que se pulverice con pesticidas.