



**Pontificia Universidad Católica de Valparaíso**

Fundación Isabel Caces de Brown  
Estación Experimental La Palma

Casilla 4□D, Quillota□Chile

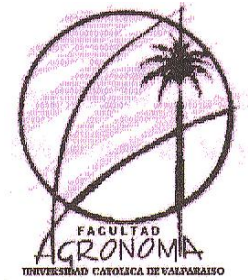
Teléfonos

56□32□274501□56□33□310524

Fax 56□32□274570,

56□33□313222

<http://www.agronomia.ucv.cl>



## COLORIS FÉRRICA EN ÁRBOLES FRUTALES: ACTUALIZACIÓN DE SUS CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES PROPUESTAS

Alumno: Pedro Felipe Astudillo Baeza

Profesor Guía: Alexander Neaman



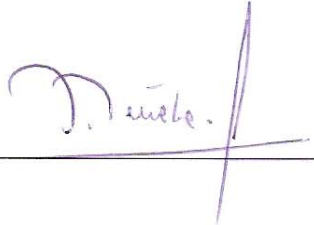
Profesor corrector: Ricardo Cautín

Quillota, 31 de marzo del 2008

**Título** : **CLOROSIS FÉRRICA EN ÁRBOLES FRUTALES:  
ACTUALIZACIÓN DE SUS CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES  
PROPUESTAS.**

**Tallerista** : **Sr. PEDRO FELIPE ASTUDILLO BAEZA**

### **APROBACIÓN DEL INFORME**

	<b>Nombre</b>	<b>Firma</b>
<b>Profesor Guía</b>	<b>: Sr. ALEXANDER NEAMAN Ciencias del Suelo, Ph.D.</b>	 _____
<b>Profesor Informante</b>	<b>: Sr. RICARDO CAUTIN M. Ingeniero Agrónomo</b>	 _____
<b>Jefe de Investigación</b>	<b>: Sra. PATRICIA PEÑALOZA A. Ingeniero Agrónomo</b>	 _____
<b>Fecha</b>	<b>: Quillota, mayo de 2008.</b>	

## Índice

## Resumen

## Summary

1.	Introducción.	1
2.	Hierro en el sistema suelo – planta.	3
2.1.	Hierro en la planta.	3
2.2.	Absorción radicular del hierro en el suelo	5
3.	Factores causantes de clorosis férrica en especies vegetales	9
3.1.	Deficiencia de hierro en el suelo.	9
3.2.	Carbonatos de calcio y clorosis férrica.	11
3.3.	Efecto de macro y micronutrientes.	14
3.4.	Efecto de la humedad del suelo.	17
4.	Deficiencia de hierro en árboles frutales.	18
4.1.	Frutales de hoja persistente	18
4.1.1.	Palto.	18
4.1.2.	Naranja ( <i>Citrus sinensis</i> ), limonero ( <i>Citrus limon</i> ) y otras especies del género <i>Citrus</i> .	19
4.1.3.	Olivo.	21
4.2.	Frutales caducifolios.	22
4.2.1.	Duraznero.	22
4.2.2.	Nogal	24
4.2.3.	Manzano y peral.	24
5.	Métodos de prevención y/o corrección de clorosis férrica.	26
5.1.	Métodos de diagnóstico.	26
5.2.	Influencia del factor genético.	28
5.3.	Manejos agronómicos.	28
5.3.1.	Estrategias culturales.	28
5.3.2.	Tratamientos dirigidos a las estructuras vegetales.	29
5.3.3.	Tratamientos dirigidos al suelo.	32
5.3.4.	Antecedentes de los quelatos de hierro.	37
6.	Análisis económico de dos alternativas de corrección utilizadas en Chile.	40
6.1.	Aplicación de ácido sulfúrico con fines neutralizantes de carbonatos.	40
6.2.	Aplicación de quelatos de hierro directo al suelo.	40
7.	Conclusiones.	41
8.	Literatura citada.	42
	Anexos	50

## Resumen

La clorosis férrica se distribuye ampliamente en los suelos del mundo, especialmente en los de tipo calcáreo. La multiplicidad de factores involucrados en la aparición de la deficiencia de hierro (Fe) ha determinado la inaplicabilidad de una solución global a este desorden.

Si bien los bicarbonatos son la principal causa de clorosis férrica en suelos calcáreos, en los demás tipos de suelos no existe un origen definido, pudiendo ser provocada por malos manejos agronómicos, competencia con otros nutrientes presentes en el suelo, como fósforo (P), cobre (Cu), cinc (Zn), nitrógeno (N), manganeso (Mn), entre otras causas.

El presente trabajo busca recopilar la información técnico – científica disponible respecto a las causas de la clorosis férrica en árboles frutales, sus efectos y soluciones propuestas.

La solución de la clorosis férrica se ha abordado desde dos ejes, como son la mejora en las técnicas preventivas de diagnóstico y el desarrollo de técnicas correctivas. En la primera instancia, la investigación ha propendido a mejorar el uso de extractantes utilizados en los análisis foliares, así como la utilización de nuevas estructuras (flores y brotes).

En relación a las técnicas correctivas, se ha descartado el uso de aplicaciones de ácidos mediante el riego en suelos calcáreos, debido a que requiere volúmenes impracticables actualmente. A nivel de suelo, los mejores resultados se han obtenido con el uso de quelatos de hierro, que gracias a su mayor estabilidad aumentan la disponibilidad de Fe en el suelo. En este sentido, es necesaria mayor investigación en la optimización de las formulaciones, disminución de los costos de fabricación y reducción de su impacto medioambiental.

Las aplicaciones foliares son muy variables en resultados, dadas las diferencias morfológicas entre las hojas de distintas especies, con un alto riesgo de daño a las estructuras vegetales.

## Summary

Iron chlorosis is widely spread in soils of the world, especially in calcareous soils. The multiple factors involved in the occurrence of iron (Fe) deficiency resulted in the ineffectiveness of a global solution to this disorder.

While bicarbonates are the most important cause of iron chlorosis in calcareous soil, in other soil types a defined origin has not been found. It may be caused by agronomic mismanagement, competition with other nutrients in soil such as phosphorus (P), copper (Cu), zinc (Zn), nitrogen (N), manganese (Mn), among other causes.

This paper intends to collect technical - scientific information available regarding the causes of iron chlorosis in fruit trees, its effects and solutions proposed.

The solution to iron chlorosis has been approached from two perspectives, such as improvements in the techniques of preventive diagnosis and development of remedial techniques. In the first stage, research has tended to improve the use of extractants used in foliar analysis, as well as the use of new plant structures (flowers and shoots).

In relation to the remedial techniques, the acid application to calcareous soils via irrigation has been discarded, because it requires very large volumes of acid. In soils, the best results have been obtained with the use of iron chelates, because their greater stability enhances the availability of Fe in soil. In this sense, more investigation is needed to improve formulations, as well as lowering of costs of production and reduction of their environmental impact.

The foliar applications give highly variable results, because of the morphological differences among the leaves of different species, with a high risk of damaging plant structures.

## 1. Introducción.

La deficiencia de hierro presenta una extensa distribución en especies vegetales ubicadas sobre suelos de diferentes características, estimándose que cerca de un 50% de los árboles frutales en las zonas mediterráneas sufre de clorosis férrica (Jaegger *et al.*, 2000).

A nivel de diagnóstico, Faust (1989) ha identificado la deficiencia de hierro como la correspondiente al nutriente de mayor importancia en la expresión de clorosis, por sobre la ausencia de otros micronutrientes (cinc y manganeso).

El presente trabajo busca recopilar la información técnico - científica disponible respecto a las causas de la clorosis férrica en árboles frutales, sus efectos y las soluciones propuestas.

La principal causa de la clorosis férrica no radica en la ausencia de este micronutriente en el suelo, ya que se considera al hierro (Fe) como el cuarto elemento más abundante en las rocas de la Tierra, con gran capacidad de formar numerosos compuestos estables con S, O y Si (Krauskopf, 1983; Loué 1988; Marschner, 1995). La clorosis férrica se produce por disminuciones en la disponibilidad de hierro activo en la planta, desencadenada por la interacción de factores químicos, físicos y biológicos presentes tanto en el suelo como dentro de la misma especie vegetal (Vose, 1982; Coulombe *et al.*, 1984; Loue, 1988; Marschner, 1995).

A nivel de corrección, se ha investigado una amplia variedad de compuestos férricos y enmiendas acidificadas que han sido propuestos como soluciones a la deficiencia nutricional de Fe, pero que no han logrado representar un manejo efectivo a un costo viable para los productores frutícolas a nivel mundial (Pestana *et al.*, 2003a).

Rodríguez *et al.* (1998) señalan que las acidificaciones de las soluciones fertilizantes aplicadas sobre los suelos mediante el riego, permitirían mejorar la solubilidad de muchos compuestos que contienen hierro (Fe), cinc (Zn), manganeso (Mn), calcio (Ca) y fósforo

(P) en suelos calcáreos. Otros autores dudan de la efectividad de éstas en campo (Miyamoto *et al.*, 1975; Imas; 2000), indicando que en suelos con altos niveles de carbonatos se requieren de elevadas cantidades de ácido, volviendo impracticable la medida. Todo esto determina que aún no exista una solución capaz de satisfacer a los productores, debido a la existencia de mucha información cruzada.

## 2. Hierro en el sistema suelo – planta.

### 2.1. Hierro en la planta.

El contenido de hierro (Fe) en las plantas varía considerablemente entre ellas, con un rango normal entre 60 – 300 ppm. Sólo bajo situaciones excepcionales de suelos ácidos con pobre drenaje y en continua reducción, como por ejemplo algunos arrozales, es posible encontrar toxicidades de Fe con niveles de 400 – 1000 ppm (Vose, 1982, Loue, 1988; Hagemeyer y Breckle, 1996).

Si se considera las formas iónicas de hierro  $Fe^{+2}$  y  $Fe^{+3}$ , donde la primera es la forma metabolitamente activa y de mayor solubilidad que el  $Fe^{+3}$  (Chen y Barak, 1982; Rowell, 1992; Navarro, 2003; Ruíz, 2006), las mediciones de Fe total no serían capaces de señalar el grado de funcionalidad del nivel de hierro existente en la planta. Por ello, es posible encontrar altas concentraciones de Fe total en hojas de plantas cloróticas, dado un proceso de inactivación del hierro dentro de la misma especie vegetal (Morales *et al.*, 1998; Bavaresco *et al.*, 1999; Römheld, 2000; Tagliavini y Rombolà, 2001; Benítez *et al.*, 2002; Nikolic y Römheld, 2002; Abadía, 2004; Álvarez – Fernández *et al.*, 2004 y 2005).

En suelos calcáreos, Tagliavini y Rombolà (2001) señalan que, por un mecanismo aún desconocido, parte del Fe proveniente de las raíces no es capaz de atravesar la membrana plasmática de las hojas, ubicándose en el apoplasto celular, situación que justificaría la existencia de Fe inactivo ( $Fe^{+3}$ ) en hojas cloróticas de uva vinífera (*Vitis vinifera* L).

A manera de consenso, varios autores han señalado que la presencia de cantidades significativas de  $Fe^{+3}$  en las hojas cloróticas, produciría una situación llamada “paradoja de la clorosis”, la cual sería determinante en la ineficacia de los análisis foliares para la evaluación de la clorosis férrica (Morales *et al.*, 1998; Bavaresco *et al.*, 1999; Römheld, 2000; Tagliavini y Rombolà, 2001; Benítez *et al.*, 2002; Nikolic y Römheld, 2002; Abadía, 2004; Álvarez – Fernández *et al.*, 2004 y 2005). En éste sentido, Nikolic y Römheld (2002)

identifican la existencia de esta situación sólo en mediciones realizadas en base a peso seco y cuando existe una fuerte inhibición del crecimiento de las hojas.

Ensayos realizados en raíces de *Helianthus annuus* L. sumergidas en diferentes soluciones, Kosegarten *et al.* (2004) observaron una gran sensibilidad de la capacidad reductora de  $\text{Fe}^{+3}$  en el apoplasto, respecto al pH de este último, determinando una disminución de la reducción del hierro al alcanzar valores de pH sobre 5,3.

Dentro de plantas de girasol (*H. annuus* L.) y haba (*Vicia faba* L.) cultivados en solución nutritiva, se comprobó el requisito de reducción del  $\text{Fe}^{+3}$  para su ingreso a las células de la hoja, y que el estado nutricional del Fe no afectaría dicho proceso (Nikolic y Römheld, 1999).

Desde el punto de vista funcional, el Fe forma parte estructural de algunos grupos hemo presentes en citocromos, peroxidasas y catalasas, interviniendo en la activación de varias enzimas, determinando la consiguiente reducción de actividad al existir deficiencias de hierro. Situación similar ocurre en algunas sulfoferroproteínas, como la ferredoxina, que actúa como un aceptor – donador de electrones en la fotosíntesis (Vose, 1982; Loue, 1988; Faust, 1989; Marschner, 1995; Navarro, 2003; Agustí, 2004).

Existe controversia respecto a la disminución en el contenido de cloroplastos en hojas deficientes de hierro, no así, es innegable una clara reducción en el contenido de clorofila de las mismas (Römheld, 1982; Vose, 1982; Chen y Barak, 1982; Loue, 1988; Faust, 1989; Marschner, 1995). El rol exacto del Fe en la síntesis de clorofila no está completamente esclarecido. Según Vose (1982), el hierro podría relacionarse a nivel de condensación del ácido succínico y glutámico, así como también, catalizar la síntesis final de clorofila. La importancia de esta relación radica en que de la condensación del ácido succínico y glutámico se forma el ácido  $\gamma$ -aminolevulínico, el cual luego de seguir una complicada ruta metabólica se transforma en protoporfirina IX, para unirse con Mg y formar la clorofila (Vose, 1982).

Mengel y Kirkby (2000) atribuyen esta última situación a la función más conocida del hierro, ser constituyente de grupos prostéticos. Sin embargo, aún no se conoce el punto

exacto en que la deficiencia de hierro produce una disminución de la producción de este pigmento.

## 2.2. Absorción radicular del hierro en el suelo

Actualmente, las especies vegetales sólo son capaces de regular su contenido de hierro total a través del consumo. Sin embargo, una parte del hierro total puede inactivarse bajo la forma  $\text{Fe}^{+3}$ , la cual debe ser reducida a  $\text{Fe}^{+2}$  para su utilización por la especies vegetales (Marschner, 1995).

En condiciones de suficiencia de hierro, las plantas utilizan un complejo sistema de autorregulación capaz de aumentar o disminuir el consumo de éste y otros micronutrientes en relación a factores como la concentración interna del elemento, tanto en raíces y brotes en crecimiento, la concentración y forma disponible en el medio, y la interacción con otros iones (Marschner, 1995). El hierro inorgánico debe ser preferentemente reducido a  $\text{Fe}^{+2}$  en la superficie de la raíz para ser absorbido (Chen y Barak, 1982).

Con la finalidad de aumentar la absorción de algunos nutrientes, las plantas pueden generar exudados radiculares. En el caso del hierro, es posible observar la acción del ácido piscídico, fuerte quelato de  $\text{Fe}^{+3}$ ; así como del ácido cítrico; y de fitosideróforos liberados sólo por especies gramíneas (Marschner, 1995).

En base al comportamiento y respuesta de las diferentes especies vegetales a la deficiencia de hierro, es posible distinguir dos estrategias (Figura 1), capaces de diferenciarse filogenéticamente. En todos los casos, las respuestas están relacionadas íntimamente a las zonas de crecimiento radicular, siendo suprimidas totalmente después de un día de suministrado el hierro (Marschner, 1995).

Según Marschner (1995), aún no existe claridad de cómo el nivel nutricional del hierro se transforma en una señal capaz de generar los mecanismos de respuesta de la membrana

plasmática, así como tampoco es conocida la forma en que la reductasa posee una proteína o se le adjuntaría una para el transporte del hierro reducido ( $\text{Fe}^{+2}$ ) en el citoplasma.

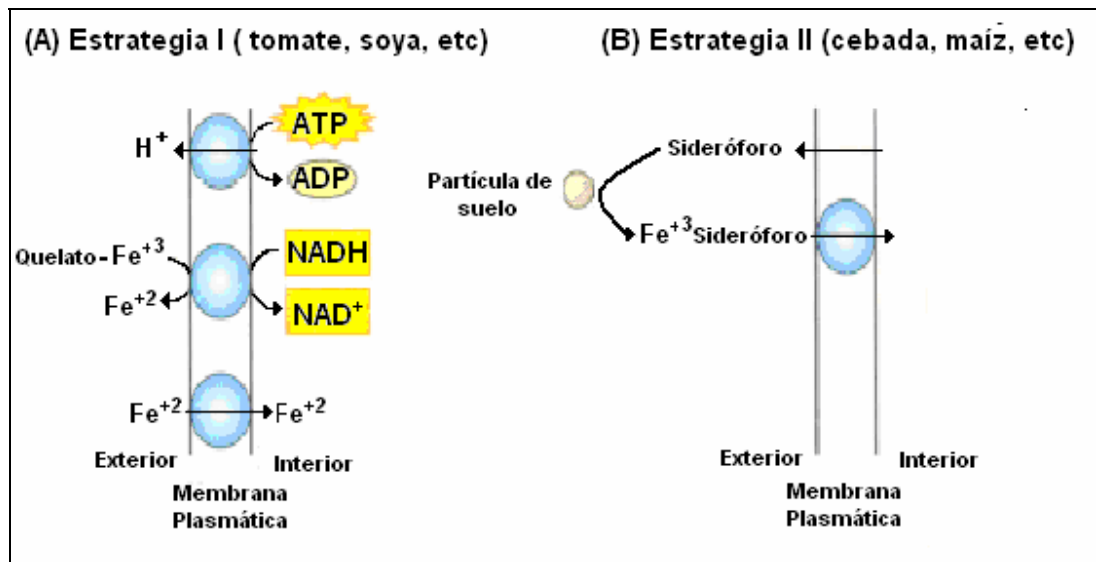


Figura 1. Estrategias de las especies vegetales en respuesta a la deficiencia de hierro. Modificado de Epstein y Bloom (2005)

La estrategia I, o también llamada estrategia de las plantas Fe – eficientes (Figura 1), se presenta de forma común en las especies dicotiledóneas y monocotiledóneas no gramíneas. Esta estrategia se caracteriza por la ejecución de al menos dos respuestas frente al detrimento de la nutrición férrica, situación en que son capaces de generar un incremento en la capacidad reductora y/o un aumento en la excreción de protones (Römheld *et al.*, 1982; Loue, 1988; Marschner, 1995; Wei *et al.*, 1998). En algunas especies, también es posible encontrar un aumento en la liberación de compuestos reductores y/o quelantes, especialmente los del tipo fenólico (Marschner, 1995).

Se presume que las plantas eficientes en el consumo de Fe, es decir aquellas con estrategia I, también pueden aumentar sus tasas de consumo de otros micronutrientes como el Mn y Zn al presentarse deficiencia de Fe, lo que se debería a un mecanismo complementario al aumento de la capacidad reductora de las raíces de estas plantas. Se ha propuesto que este mecanismo correspondería a la formación de sustancias quelantes capaces de incrementar el transporte de estos cationes a través del plasmalema de la

rizodermis de las raíces. Todo esto podría determinar una toxicidad por manganeso en condiciones de suelos calcáreos con baja disponibilidad de hierro (Römheld *et al.*, 1982).

La estrategia II, o estrategia de las plantas Fe – ineficientes, se encuentra presente en las monocotiledóneas gramíneas. Esta estrategia se caracteriza por la liberación de aminoácidos no proteinogénicos llamados fitosideróforos, los cuales son producidos en condiciones deficientes de hierro (Loue, 1988; Marschner, 1995).

Ensayos realizados sobre *H. annuus* cv. Sobrid demostraron que bajo condiciones deficientes de hierro las raíces de las plantas Fe – eficientes también presentarían un aumento en el diámetro de los ápices radiculares, así como también la estimulación de la formación de pelos radicales y de células de transferencia rizodermal, situaciones que no se observarían en aquellas plantas con estrategia II (Römheld *et al.*, 1982).

Las alteraciones descritas en la estructura radicular se deben al desarrollo de células de transferencia que aparecen en la rizodermis celular de plantas Fe - eficientes, las cuales son altamente específicas para el hierro durante el estrés férrico (Mengel y Kirkby, 2000). Según Marschner (1995), estas estructuras son semejantes a las producidas en deficiencia de fósforo, situación en que se forma un denso grupo de raicillas de crecimiento limitado, con una particularmente alta capacidad de reducir  $\text{Fe}^{+3}$  y excretar protones.

Otra diferencia se produce al encontrar iones bicarbonato en el suelo, como es el caso en los de tipo calcáreo, al aumentar el pH se genera una disminución de la concentración de hierro soluble inorgánico (Marschner, 1995). En esta situación, las especies Fe – eficientes (estrategia I) presentan una mayor disminución de la disponibilidad de hierro, mientras que las especies Fe - ineficientes (estrategia II) no se ven afectadas gracias a la liberación de fitosideróforos (Römheld *et al.*, 1982). La causa radica en que el bicarbonato actúa como tampón para los efectos de la acidificación de la zona de raíces generada por la bomba de protones utilizada en las plantas de estrategia I, reduciendo la disponibilidad del hierro (Coulombe *et al.*, 1984; Marschner, 1995).

Marschner (1995) señala que el bicarbonato es responsable directa e indirectamente de alterar el consumo, translocación y utilización del hierro por las plantas en al menos ocho formas. Para este autor, asumiendo los efectos ya mencionados, el  $\text{HCO}_3^-$  disminuiría tanto la liberación de fenoles como la reducción de  $\text{Fe}^{+3}$  en la membrana plasmática, así como también aumentaría la síntesis de ácidos orgánicos. Algunos de estos ácidos orgánicos serían responsables del secuestro del hierro en las vacuolas, impidiendo el transporte hacia los brotes y generando desuniformidad en su distribución hacia las hojas (Marschner 1995).

### 3. Factores causantes de clorosis férrica en especies vegetales.

En 1944 Lindner y Harley, señalaron cuatro orígenes para la clorosis férrica: deficiencia de hierro en el medio, trastorno en el balance fosfato/hierro (P/Fe), trastorno en el balance manganeso/hierro (Mn/Fe), y clorosis inducida por carbonatos. Desde entonces, la investigación respecto al tema ha descartado e incluido diferentes factores, sin aún poder esclarecer del todo este desorden nutricional.

#### 3.1. Deficiencia de hierro en el suelo.

Como se ha mencionado, el hierro es el cuarto mineral más abundante en las rocas de la Tierra (Krauskopf, 1983; Loué 1988; Marschner, 1995), por lo que la “ausencia” de este micronutriente se debe principalmente a su baja solubilidad, especialmente en suelos calcáreos (Rowell, 1992; Marschner, 1995; Brennan y Lindsay, 1998).

Como consecuencia de la descomposición de los minerales en el suelo producto de las reacciones de hidrólisis y oxidación con el agua y aire, la mayor parte del hierro liberado por esta descomposición se precipita bajo formas de óxidos e hidróxidos, siendo influenciadas por el pH tal como lo representa la Figura 2 (Loué, 1988).

El pH es uno de los principales determinantes en la disponibilidad de hierro hacia la planta (Anexo 1). Además, el valor del pH posee una gran variabilidad debido a los factores formadores del suelo: material parental, clima, topografía, actividad biológica, manejo, y tiempo (Rowell, 1992).

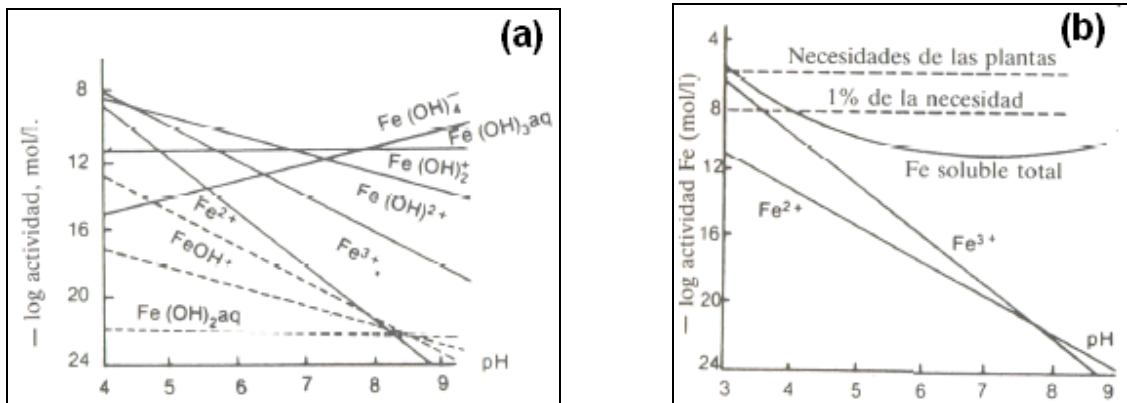
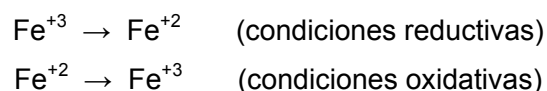


Figura 2. Principales formas de hierro en el suelo e influencia del pH sobre éstas: (a) Especies de Fe(III) en solución que se encuentran en equilibrio con óxidos férricos hidratados (Lindsay, 1979); (b) influencia del pH sobre Fe soluble total (Lindsay, 1974).

Si se considera sólo el hierro inorgánico presente en el suelo, es posible encontrar las formas  $\text{Fe}^{+2}$  como  $\text{Fe}^{+3}$ , donde la primera es la forma metabolitamente activa y con mayor solubilidad que el  $\text{Fe}^{+3}$  (Chen y Barak, 1982; Rowell, 1992; Brennan y Lindsay, 1998; Navarro, 2003; Ruíz, 2006); mientras que la segunda es la principal forma inorgánica presente en los suelos normalmente aireados (Vose, 1982; Loue, 1988).

Vose (1982) y Loue (1988) señalan que sobre un pH 4,0 existe una disminución en la actividad del  $\text{Fe}^{+3}$  en solución, en una magnitud cercana a unas mil veces por cada unidad de aumento en el pH, lo que afecta drásticamente la disponibilidad total del hierro. Por otro lado, disminuciones del orden de 0,5 unidades en el pH son capaces de generar un aumento en la disponibilidad del hierro en el suelo (Razeto *et al.*, 1984).

Las condiciones reductoras u oxidativas del suelo son las causantes de las variaciones en la proporción de las formas  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$  en solución, de acuerdo a Vose (1982):



Entonces, se podría esperar concentraciones insuficientes de hierro en las soluciones de los suelos agrícolas normales, si aquellas sólo dependieran de la química inorgánica del

hierro ( $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ ). Sin embargo, el Fe forma fácilmente complejos orgánicos que pueden elevar su solubilidad en solución, gracias a los agentes quelantes que se producen a partir de la descomposición de hojas en el suelo, de la mineralización del humus y de los exudados tanto radiculares como microbiales, aumentando la disponibilidad de este elemento (Chen y Barak, 1982; Loue, 1988; Rowell, 1992; Tagliavini y Rombolà, 2001; Jin *et al.*, 2006).

Para Ammari (2005), la actividad microbial del suelo juega un rol más importante que las propiedades químicas y físicas de éste en controlar la concentración de Fe soluble en el suelo. Este autor sustenta sus afirmaciones en el alto porcentaje de complejos de Fe encontrados en sus ensayos, los cuales fueron realizados sobre la base de un gran número de suelos (32 tipos) diferentes químicamente, físicamente y biológicamente.

Jin *et al.* (2006) proponen un rol sinérgico entre las raíces y la comunidad microbiana presente en las cercanías de la rizósfera, donde las primeras exudarían compuestos fenólicos selectivos sobre la flora microbiana existente bajo condiciones deficientes de hierro, desencadenando que los microorganismos predominantes liberen sideróforos capaces de incrementar la biodisponibilidad del Fe, y produzcan auxinas que acrecienten la absorción de hierro debida al aumento en la actividad de la reductasa de  $\text{Fe}^{+3}$ .

Existe una baja proporción de  $\text{Fe}^{+2}$  respecto del total de hierro soluble en suelos normalmente aireados, ya que éste precipita fácilmente con el oxígeno existente generando óxido férrico hidratado  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Sólo mientras las condiciones del medio no sean oxidantes y se mantengan ácidas, el estado ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) se encontrará mayoritariamente estable bajo la forma iónica o de complejos (Loue, 1988; Brennan y Lindsay, 1998).

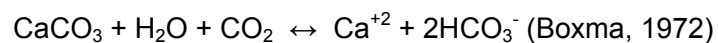
### 3.2. Carbonatos de calcio y clorosis férrica.

Un suelo calcáreo contiene carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), los que a pesar de ser relativamente insolubles, son capaces de controlar el pH del suelo mediante su hidrólisis,

alcanzando valores de entre 7,3 a 8,5; situación que puede generar deficiencias nutricionales tal como se expresa en el Anexo 1 (Foth, 1985; Vose, 1988; Loue, 1988; Faust, 1989; Rowell, 1992; Rodríguez *et al.*, 1998; Imas, 2000).

El efecto de los suelos calcáreos sobre el hierro se debe principalmente a la acción de la caliza activa, la cual es la parte de los carbonatos totales que posee un tamaño inferior a 20 micras, determinando así una alta área superficial activa capaz de interactuar fácilmente con los óxidos de hierro en el suelo (Chen y Barak, 1982; Rowell, 1992; Mendoza, 2000).

Los carbonatos de calcio, al igual que los de magnesio, se disuelven fácilmente en agua que contenga anhídrido carbónico, pero no lo hacen en agua pura (Porta *et al.*, 2003), mediante la siguiente reacción:



Se ha determinado que el bicarbonato formado en los suelos calcáreos es el factor más importante del suelo asociado con el desarrollo de clorosis férrica en manzano (*Malus pumila* Mill.), peral (*Pyrus communis* L.) y *V. vinifera* L., (Mengel *et al.*, 1984; Faust 1989; Nikolic y Kastori, 2000).

En suelos calcáreos que no están sujetos a sistemas de riego agronómico, la producción de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) se debe a la relación existente entre las bases del suelo por el equilibrio en la formación y descomposición de  $\text{HCO}_3^-$ , por lo que rara vez se alcanzarán niveles suficientemente altos capaces de generar mayores problemas en la absorción de Fe por las plantas (Faust, 1989).

En suelos calcáreos cultivados, la dinámica de formación del bicarbonato es mucho mayor y depende de altas presiones de  $\text{CO}_2$  en el suelo así como de la hidrólisis de los carbonatos (Boxma, 1972).

Mengel *et al.* (1994) y Mendoza (2000) plantean que la absorción de bicarbonatos por parte de la planta determina un aumento en el pH de los tejidos, especialmente a nivel de apoplasto, transformando el  $\text{Fe}^{+2}$  a  $\text{Fe}^{+3}$  para generar de esta forma la clorosis.

Contrario a Mengel *et al.* (1994) quienes obtuvieron sus resultados en base al uso de una solución de 10 mM de bicarbonato y colorante fluorescente para la infiltración de los trozos extirpados de hoja de *H. annuus* L., tanto Nikolic y Römheld (1999 y 2002) como Kasegarten *et al.* (1999) aportaron la misma concentración de bicarbonatos a las raíces de plantas intactas, sin encontrar incrementos en el pH del apoplasto de las hojas de girasol ni de haba, así como tampoco efectos demostrables sobre el pH del xilema al usar el bicarbonato como factor simple, concluyendo que una alta concentración de bicarbonato en la solución del suelo no disminuye la disponibilidad del Fe en el apoplasto de la hoja.

Navarro (2003), sugiere que los iones bicarbonato ejercen entre otras acciones, disminución en la respiración radicular, al igual que en la absorción y transporte de nutrientes, así como una reducción de la velocidad de acción de diversas reacciones enzimáticas.

La concentración de hierro en las raíces es normalmente superior a la presente en las hojas, lo que refleja la disponibilidad de Fe en el suelo (Mengel *et al.*, 1984). Pero a partir de soluciones alcalinas que contengan  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , el hierro se precipita en el suelo como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  siempre y cuando no estén presentes otros aniones con los que el  $\text{Fe}^{+2}$  forme compuestos más insolubles (Krauskopf, 1983). La acumulación de  $\text{HCO}_3^-$  en la rizósfera y apoplasto de las raíces produce la neutralización de los  $\text{H}^+$  generados por la bomba  $\text{H}^+$  - ATPasa en las células del plasmalema rizodermal, causando al mismo tiempo la disminución en la reducción de  $\text{Fe}^{+3}$  (Römheld *et al.*, 1982; Nikolic *et al.*, 1998).

En investigaciones realizadas sobre arabisopsis (*Arabidopsis thaliana* L.), arveja (*Pisum sativum* L.), tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y pepino (*Cucumis sativus* L.), se ha encontrado que el bicarbonato podría inducir la clorosis férrica mediante la inhibición de la expresión de la reductasa férrica, los transportadores de hierro, así como de los genes  $\text{H}^+$  - ATPasa en plantas con estrategia I, probablemente debido a la alteración de la

expresión de factores de transcripción necesarios para las reacciones de eficiencia de Fe (Lucena *et al.*, 2007).

### 3.3. Efecto de macro – y micronutrientes.

El comportamiento del hierro y de los diferentes macro – y micronutrientes presentes en el suelo, así como su disponibilidad, está determinada en gran medida por el pH existente en el medio (Anexo 1), desencadenando la consiguiente interacción entre sus formas disponibles (Truog, 1948; Lucas y Davis, 1961).

La expresión de la clorosis férrica puede ser confundida por la aparición simultánea de otras ausencias de micronutrientes, como cinc (Zn) o manganeso (Mn). Sin embargo, al inducir esas insuficiencias en especies vegetales como *M. pumila* Mill., la deficiencia de hierro es predominante, señalando su importancia por sobre las otras (Faust, 1989).

Vose (1982) presenta evidencia de que en suelos neutros o de condiciones medianamente ácidas, la deficiencia de Fe puede ser inducida por altos niveles de cobre, cinc o fósforo. Para Loue (1988), la absorción de Fe tiende a decrecer según la presencia de iones de cobre, cinc y manganeso en orden decreciente ( $Cu > Zn > Mn$ ).

#### 3.3.1. Manganeso (Mn).

La clorosis férrica puede ocurrir asociada a una toxicidad de manganeso (Mn) presente a pH ácido en un suelo arenoso. Se sabe que el Mn se encuentra más disponible a un pH 6,0 ó inferior, pero aún no está del todo claro si éste compite con el hierro por los sitios de absorción en las raíces, o si la competencia se produce a nivel de precursores de la clorofila, donde el manganeso desplazaría al hierro desde las enzimas que lo requieren (Vose, 1982; Loue, 1988). Un ejemplo de esta situación corresponde a la clorosis férrica observada en piña (*Ananas sativum* L. Lindl.) emplazada sobre las arenas ácidas de Hawai (Vose, 1982).

En otro sentido de la misma interacción, Römheld *et al.* (1982) señalan que la baja disponibilidad de Fe genera un aumento en la tasa de consumo de Mn y Zn en *H. annuus* cv. Sobrid (estrategia I), en menor medida que el incremento en la absorción de Fe propios de la estrategia de este tipo de plantas. Esta situación no fue observada en maíz (*Zea mays* cv. Velox) que posee una estrategia II de comportamiento a la deficiencia de hierro.

### 3.3.2. Fósforo (P).

Aún no existe claridad respecto a la relación entre el fósforo y el hierro, pues algunos autores (Mengel *et al.*, 1984; Loue, 1988), señalan la correspondencia entre altos contenidos de P en la planta y clorosis férrica, no así con los niveles de P existentes en el suelo, como fue planteado por Lindner y Harley (1944). De esta forma, Loue (1988) propuso que el P no intervendría a nivel de absorción de Fe, sino que disminuiría la movilidad del hierro presente en las especies vegetales.

Mengel *et al.* (1984) descartaron a los fosfatos como agentes causantes de clorosis férrica, tal como lo planteaba Lindner y Harley (1944), al señalar que el P en las hojas no es la causa de clorosis, sino un producto de la misma, debido a que el aumento en la excreción de  $H^+$  a nivel radical incrementaría la proporción de la forma  $H_2PO_4^-$ , la cual puede ser absorbida a tasas mayores. Mengel *et al.* (1984) respalda sus afirmaciones con ensayos realizados en plantas sobre contenedores que incluían diferentes soluciones de suelo, donde el P alcanzó niveles superiores a los indicados como inductores de clorosis ( $P/Fe$  foliar > 60), obteniendo síntomas de deficiencia de Fe en suelos con alto contenido de bicarbonato y mínimo de fosfato, y no al revés.

Para Marschner (1995), los altos niveles de fósforo en las especies vegetales deficientes de hierro se deben a la alteración en sus niveles de crecimiento.

### 3.3.3. Nitrógeno (N).

En situaciones de alto consumo de nitratos ( $NO_3^-$ ) por las plantas, se genera un exceso de aniones sobre cationes en las raíces, provocando la necesaria excreción de  $OH^-$  a la

rizósfera, situación que desencadena la formación de bicarbonato al mezclarse con agua y  $\text{CO}_2$  (Haynes y Goh, 1978; Chen y Barak, 1982; Loue, 1988). Además, Mengel *et al.* (1994) y Kosegarten *et al.* (1999 y 2004) relacionaron al nitrato con incrementos en el pH del apoplasto de las raíces, lo que determinaría conjuntamente una disminución en la capacidad reductora de hierro, y por lo tanto del consumo de hierro en el citosol.

Contrario a lo sucedido con excesos de aniones como el  $\text{NO}_3^-$ , al entregar una fuente nitrogenada en forma de cationes ( $\text{NH}_4^+$ , por ejemplo), el balance entre las cargas de los iones en la raíz se alteraría nuevamente, sólo que se produciría una reversión en la mencionada producción de bicarbonatos (Chen y Barak, 1982), así como también una disminución en el pH del apoplasto radicular (Kosegarten *et al.*, 2004). Según Pestana *et al.* (2003a), en el caso de suelos calcáreos, el amonio comúnmente usado sufre una rápida nitrificación, por lo que es necesario agregarle inhibidores de dicho proceso para hacer efectivos los resultados descritos.

#### 3.3.4. Cobre (Cu).

Según Loue (1988), excesos de cobre en el suelo determinan clorosis férrica con una factibilidad de ocurrencia mayor a la del manganeso, situación que ya había sido descrita por Thompson (1965) en suelos de Florida, Estados Unidos. El mismo autor, también señala un posible rol del Cu en el detrimento de la movilidad del Fe en el interior de la planta.

Para Zheng *et al.* (2005), la concentración de hierro en las raíces de plantas Fe eficientes (por ejemplo trébol común, *Trifolium pratense* L.) aumenta con la deficiencia de Cu, la causa no se encontraría en un incremento de la liberación de protones propio de la estrategia I, sino más bien, debido a la inducción de una nueva reductasa, distinta a la producida en deficiencia de Fe. Esta nueva reductasa sería estimulada en todo el sistema radicular y no sólo en los ápices, como es el caso de la reductasa del hierro.

### 3.3.5. Cinc (Zn).

Las deficiencias de cinc generan concentraciones más elevadas de Fe en las plantas. Por otro lado, dosis elevadas de Zn pueden generar clorosis férrica en algunas especies como el maíz, al afectar su absorción y transporte (Brown y Tiffin, 1962), sin embargo, estos resultados no fueron replicados por los autores en la totalidad de especies investigadas (14 especies vegetales distintas).

### 3.4. Efecto de la humedad del suelo.

Considerando el favorecimiento de la reacción de formación de bicarbonato en suelos calcáreos, producto del aumento en la humedad y contenido de CO<sub>2</sub> de la forma ya señalada anteriormente (Haas, 1942; Wallihan *et al.*, 1968; Inskeep y Bloom, 1986; Loue, 1988; Marschner, 1995), queda manifiesto el efecto directo de la humedad. Sin embargo, si el suelo presenta características ácidas, un exceso de humedad determinaría un aumento en la capacidad reductora de hierro en el suelo (al reducir el oxígeno presente), provocando una mayor disponibilidad de las formas de Fe<sup>+2</sup>, situación que podría ser aprovechada por especies vegetales tolerantes a la asfixia radical (Loue, 1988; Brennan y Lindsay, 1998).

Algunos autores han otorgado una condición estacional a lo efectos generados por factores ambientales como la humedad y temperatura sobre la aparición de los síntomas de deficiencia de hierro, pero sin obtener un patrón de comportamiento aplicable a todas las especies frutales (Ryan *et al.*, 1974; Tagliavini y Rombolà, 2001; Benítez *et al.*, 2002).

#### 4. Deficiencia de hierro en arboles frutales.

La respuesta de las especies vegetales a la deficiencia de hierro no sólo está basada en términos de estrategia de absorción, como fue analizado en sección 1.2, sino que también su grado de tolerancia a los factores predisponentes es dependiente de la especie, variedad e incluso cultivar.

##### 4.1. Frutales de hoja persistente.

###### 4.1.1. Palto (*Persea americana* Mill.).

Según Lahav y Whiley (2007), la clorosis férrica comienza a ser un problema al plantar paltos en suelos con un pH mayor a 7,0 ó en suelos ácidos con alto nivel de manganeso.

En el palto, al igual que en la mayoría de los frutales, la deficiencia de hierro se presenta con una clorosis intervenal muy marcada, afectando principalmente a las hojas más jóvenes (Gardiazabal, 2004; Lahav y Whiley, 2007). En condiciones de deficiencia avanzada, las hojas producidas durante la brotación de verano se vuelven pequeñas y delicadas, mientras que las hojas jóvenes se tornan pálidas o blancas; para luego desencadenar la quemadura de los ápices y márgenes foliares, finalizando en la abscisión de estos órganos si la deficiencia es aún mayor (Lahav y Whiley, 2007).

Gardiazabal (2004) señala que niveles superiores al 2 – 3% de cal activa en el suelo, son capaces de generar la deficiencia de hierro en hojas y frutos de *P. americana* Mill. Dependiendo de la severidad con que se produzca, puede afectar la producción y calibre de fruta. Palacios (2003), corrobora los efectos de la clorosis férrica sobre la producción y calibre de la fruta del palto, además de señalar la existencia de disminuciones en el contenido de aceite de los frutos bajo esta condición.

La deficiencia severa puede provocar desecación de brotes y cambio de color de los frutos, hacia verde pálido (Lahav y Whiley, 2007).

A pesar de los indicios que señalan que las aspersiones foliares de micronutrientes en floración pueden aumentar la producción, para Lahav y Whiley (2007), la morfología de la hoja de palto es adversa a este tipo de aplicaciones, ya que poseen una gruesa capa cerosa en la superficie adaxial de las hojas maduras, además de una zona abaxial igualmente protegida por depósitos de cera.

#### 4.1.2. Naranja (*Citrus sinensis*), limonero (*Citrus limon*) y otras especies del género *Citrus*.

Para las especies cítricas, la deficiencia de hierro tiende a observarse durante los meses de invierno y primavera, provocando una disminución o detención del crecimiento de la planta; amarilleamiento intervenal de las hojas y disminución en el grosor de estas últimas. En casos severos, la clorosis férrica puede generar una coloración marfil en el espacio intervenal de las hojas e incluso defoliación (Amorós, 1995; Agustí, 2003).

Los frutos también se ven afectados por la deficiencia severa de hierro, condición en que se paraliza su crecimiento poco después del cuajado, disminuye la concentración de sólidos solubles totales del zumo y adquieren un color amarillento inesperado (Amorós, 1995; Agustí, 2003).

Pestana *et al.* (2003b) evaluó diferentes portainjertos cítricos en soluciones nutritivas calcáreas, encontrando una sensibilidad semejante a la expresada por Imas (2000), la cual se presenta en el Cuadro 1.

Como herramienta de diagnóstico, Pestana *et al.* (2004) recomienda utilizar la relación de concentración de Mg/Zn de flores de cítrico obtenidas en plena floración, donde un valor bajo 100, señalaría la incidencia futura de clorosis férrica, mientras que sobre 200 las hojas permanecerían verdes dentro de la misma temporada.

Para revertir la deficiencia de hierro, Amorós (1995) recomienda tratamientos con sulfato de hierro a razón de 2 kg por árbol o el uso de quelatos. Este autor, señala que es necesario realizar las aplicaciones durante los meses de febrero – abril en el hemisferio norte, donde en algunas variedades como *Fortune* sería necesario repetirlas en el mes de agosto en el mismo hemisferio.

Cuadro 1. Nivel de susceptibilidad a clorosis férrica de portainjertos cítricos. Modificado de Obreza *et al.* (1993)

Susceptibilidad	Portainjertos
Baja	Naranja amarga ( <i>Citrus aurantium</i> L.)
	Limón rugoso ( <i>Citrus jambhiri</i> Lush.)
	Mandarino cleoatra ( <i>Citrus reticulata</i> Blanco)
	<i>Citrus macrophylla</i> Wester
	<i>Citrus volkameriana</i> Pasq.
Media	Naranja dulce ( <i>Citrus sinensis</i> L.)
	Citrango carrizo y troyer ( <i>Citrus sinensis</i> L. x <i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf.)
	<i>Citrus taiwanica</i> Tan
Alta	<i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf.
	Citrumelo swingle ( <i>Poncirus trifoliata</i> (L.) Raf. x <i>Citrus paradisi</i> Maca)

Para Agustí (2003), la eficacia de los sulfatos ferrosos y férricos esta condicionada a suelos ácidos, pues no funcionarían en suelos alcalinos, recomendando diferentes fertilizantes según se señala en el Anexo 2.

En el caso de limones (*Citrus limon*) cloróticos ubicados en macetas de 8 L de suelo calcáreo, Rivera *et al.* (2007) reportaron que no se presentaría corrección de su clorosis (medida con SPAD) al realizar aplicaciones de sulfato ferroso (0,1 % Fe) a las raíces, ni tampoco al inyectarlo a las ramas secundarias, debido a su precipitación en raíces o xilema, interrumpiendo el transporte del Fe hacia el mesófilo de las hojas. Por otro lado, estos autores indican que tanto las aplicaciones de quelatos (FeEDDHA) a las raíces, como las inyecciones de citrato a las ramas secundarias corregirían la clorosis en *C. limon*, no así al agregar citrato a las raíces.

Agustí (2003), también es contrario a las aplicaciones foliares de Fe en cítricos, debido a su ineficacia y las manchas oscuras que generan sobre las hojas, las que pueden desencadenar necrosis.

#### 4.1.2. Olivo (*Olea europea* L.).

Esta especie es menos sensible que durazneros y membrilleros. Al evaluar en invernadero las diferencias varietales en la tolerancia a clorosis férrica, se obtuvo que algunas de las más susceptibles serían: Leccino, Arbequina, Lechín de Sevilla, y Galega, intermedia Cornezuelo de Jaén y más tolerante Nevadillo Negro, Pajarero y Manzanilla de Sevilla, situación que a nivel de plantas injertadas estaría determinada por el portainjerto (Alcántara *et al.*, 2003).

Al igual que en la mayoría de las especies frutales, el análisis foliar no es un buen indicador de las deficiencias de hierro, siendo necesaria la guía a través de la sintomatología visual. En esta especie, además de la clorosis intervenal desarrollada en las hojas, la deficiencia de hierro también se puede generar una disminución en el crecimiento de los brotes y una drástica reducción en la producción de fruta (Fernandez – Escobar, 1998).

Como solución correctiva, Fernandez – Escobar (1998) recomienda inyecciones al tronco como el único tratamiento capaz de reducir la deficiencia de hierro por cuatro años, aún en olivos fuertemente afectados.

En otro camino investigativo, el olivo podría ser la especie donde mejores resultados ha obtenido la aplicación de vivianita al suelo para corregir esta deficiencia. Allí, Rosado *et al.* (2002), indican que el efecto beneficioso de este fosfato de hierro octahidratado (vivianita) se mantendría por al menos dos años, luego de agregar entre 0,5 a 2,0 kg árbol<sup>-1</sup> de suspensión de vivianita (0,05 kg dm<sup>-3</sup> de agua), dependiendo de la variedad.

## 4.2. Frutales caducifolios.

### 4.2.1. Duraznero (*Prunus persicae* (L) Bastch).

Durazneros, ciruelos y cerezos parecen ser afectados severamente por la clorosis férrica (Vose, 1982). En durazneros, los síntomas observables constan de una clorosis (pérdida de pigmentación, hacia un tono amarillo) intervenal en toda la lámina foliar, alcanzando colores blanquecinos e incluso necrosis en situaciones de deficiencias extremas, desarrollándose más acusadamente en hojas jóvenes que en adultas (Ruíz, 1993).

La producción comercial de durazneros puede verse resentida fuertemente tanto en cantidad como en la calidad de fruta obtenida. Además, la clorosis férrica produciría un retraso en la madurez y toma de color de variedades rojas como Babygold 7, así como una disminución de la relación azúcar/acidez (Ruíz, 1993; Álvarez – Fernández *et al.*, 2003).

A nivel de diagnóstico, se ha encontrado correlación directa entre el contenido de Fe en las flores de durazneros (*Prunus persica* L. Batsch) y nectarines (*Prunus persicae* var. Nucipersica) respecto del contenido de clorofila de las hojas (Belkhodja *et al.*, 1998; Toselli *et al.*, 2000; Pestana *et al.*, 2003a). Por el contrario, la concentración de Fe en hojas y en brotes no estaría significativamente correlacionado con el contenido de clorofila de las hojas (Razeto y Valdés, 2006).

Ruíz (1993) plantea que como método correctivo, las aplicaciones foliares de hierro se muestran ineficientes en durazneros, causando principalmente un manchado verde irregular en las hojas. También se han descartado las inyecciones al tronco, debido al riesgo de toxicidad inherente en la factibilidad de tránsito de la solución por una única rama dentro del árbol frutal (Ruíz, 1993).

Contrario a lo señalado por Ruíz (1993) respecto de las aplicaciones a las hojas, Fernández *et al.* (2006) evaluaron el uso de 20 formulaciones foliares que contenían un

compuesto de hierro [20 mM de  $\text{Fe(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe(III)}$  – citrato,  $\text{Fe(III)}$  – EDTA,  $\text{Fe(III)}$  – DTPA o  $\text{Fe(III)}$  – IDHA], un adyuvante (1% glicerol, 5% metanol o 5 g L<sup>-1</sup> glicina – betaina), y 1 g L<sup>-1</sup> de alquil (8-16) – glucosido como surfactante, sobre el contenido de clorofila (con SPAD) y el porcentaje de área foliar verde (vía análisis de imagen) en duraznero. Los resultados obtenidos señalaron un incremento del contenido de clorofila foliar en todos los compuestos de Fe usados en las formulaciones, tal como se detalla en la Figura 3, además de un efecto beneficioso de los tres adyuvantes, en diferente medida dependiendo de la formulación utilizada.

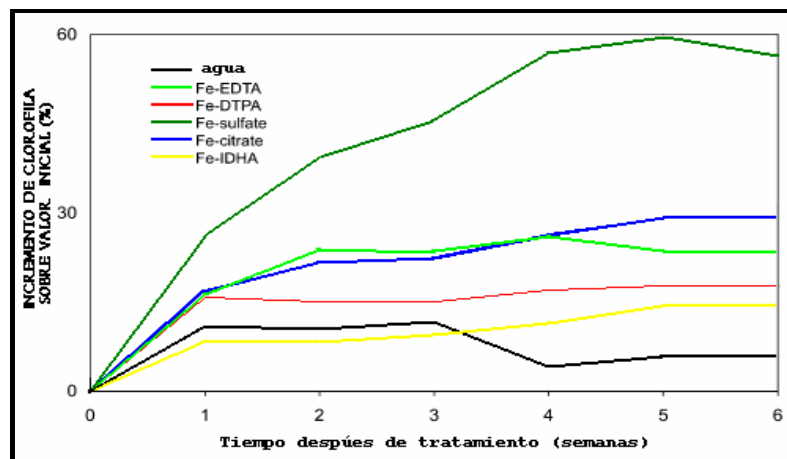


Figura 3. Evolución del incremento de clorofila en hojas de duraznero Fe deficiente después de la aplicación de cinco formulaciones foliares de hierro [ $\text{Fe(II)SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe(III)}$  – citrato,  $\text{Fe(III)}$  – EDTA,  $\text{Fe(III)}$  – DTPA, y  $\text{Fe(III)}$  – IDHA] más 0,1% de alquil(8-16) – glucósido. Modificado de Fernández *et al.* (2006).

Razeto *et al.* (1984) evaluaron diferentes tratamientos destinados al control de la deficiencia de hierro en durazneros cv. Nemaguard de 10 años de edad ubicados sobre suelo del tipo franco (pH 7,8), encontrando que dosis de 8 L por árbol de ácido sulfúrico concentrado, aplicado directamente en 10 parcialidades de 800 ml una vez a la semana, causaron disminución del grado relativo de clorosis férrica en el follaje de los árboles.

A nivel de corrección, los quelatos parecen ser la forma más efectiva, pues serían capaces de solucionar deficiencias extremas de hierro, siendo rehuidos por su alto costo (Razeto *et al.*, 1984; Ruíz, 1993).

#### 4.2.2. Nogal (*Juglans regia* L.).

La sintomatología característica de esta especie consta de una coloración amarilla limón en las hojas jóvenes, pudiendo alcanzar las más adultas. Estos síntomas se vuelven más intensos durante los meses de julio y agosto en el hemisferio norte (Luna, 1990).

Para reducir la incidencia de la clorosis férrica, los manejos de prevención siempre obtendrán los mejores resultados. Luna (1990) fomenta el uso de gramíneas asociadas durante los meses de invierno, así como la aplicación de abonos ácidos y evitar el exceso de humedad en el suelo. De forma correctiva, el mismo autor señala la eficacia del uso de quelatos de hierro, aplicado durante los meses de marzo – abril en el hemisferio norte, para que pueda ser absorbido por las raíces antes de iniciarse la brotación.

#### 4.2.3. Manzano (*Malus pumila* Mill) y peral (*Pyrus communis* L.).

Para Vose (1982) los manzanos serían más tolerantes a la clorosis férrica que las especies de carozos antes mencionadas.

Faust (1989), indica que se presenta una disminución del tamaño de los cloroplastos de las hojas de *M. pumila* Mill. afectado por clorosis férrica, además, estas hojas presentarían estomas poco desarrollados, es decir, sin su estructura característica.

Shahabi *et al.* (2005), señalaron a las variedades de manzanos: Red Delicious, Golden Delicious y Golab – e – Kohanz como resistentes a 5 meq/L de bicarbonatos en el agua de riego, al considerar sus efectos sobre el desarrollo de la clorofila. Además, estos mismos autores identificaron que el efecto del contenido de bicarbonato sobre ésta especie no sería inmediato, indicando que las neutralizaciones de bicarbonato serían necesarias a largo plazo.

Álvarez – Fernández *et al.* (2004) evaluaron aplicaciones foliares de sulfato ferroso, así como de ácido cítrico, sulfúrico y ascórbico, ya sea solos o acompañados de sulfato ferroso en *P. communis* L., cv. Blanquilla injertado sobre membrillero. En sus resultados,

estos autores encontraron que en situaciones de deficiencia de hierro, las aplicaciones foliares no ofrecerían una solución efectiva al control total de la clorosis férrica, incluso si se agregan compuestos de Fe(III) – DTPA más surfactantes. Además, los mismos autores encontraron una mayor efectividad al aplicar los tratamientos en el lado abaxial de las hojas que al realizarlos en la cara adaxial, lo que se explicaría por el mayor contenido de estomas presentes en esa ubicación específica en *P. communis* L.

Neilsen y Neilsen (2003), indican que si se considera el alto costo de los quelatos de Fe y su efecto variable sobre *M. pumila* Mill. al aplicarlos al suelo, sería más recomendable realizar este tratamiento foliarmente con varios quelatos de hierro (1,1 a 2,25 kg ha<sup>-1</sup>) o con FeSO<sub>4</sub>, de forma reiterada durante el año; al igual que utilizar inyecciones al tronco de soluciones al 1 % de citrato o sulfato, con la finalidad de obtener resultados más duraderos y que no produzcan daños severos al tronco.

## 5. Métodos de prevención y/o corrección de clorosis férrica.

### 5.1. Métodos de diagnóstico.

En una revisión realizada sobre este tema, Pestana *et al.* (2003a) señalan la importancia de utilizar análisis de suelo en que se incluye mediciones de la disponibilidad de hierro obtenidas mediante extractantes capaces de quelatar el metal, así como pruebas que determinen el contenido de cal activa en la determinación de clorosis férrica inducida por carbonatos.

A nivel de planta, la observación de los síntomas visuales es la forma más rápida y económica de encontrar el problema en las diferentes especies (Malo, 1966; Vose, 1982; Faust, 1989; Luna, 1990; Ruíz, 1993; Amorós, 1995; Barranco *et al.*, 1998; Mengel y Kirkby, 2000; Agustí, 2003; Pestana *et al.*, 2003a; Gardiazabal, 2004; Lahav y Whiley, 2007).

Se han desarrollado otros parámetros biométricos capaces de evaluar la deficiencia de hierro a nivel de laboratorio, como determinar el área foliar, el peso radicular y el peso foliar, sin embargo, todos éstos aún no han sido evaluados completamente en condiciones de campo (Álvarez – Fernández *et al.*, 2005).

Algunos instrumentos han sido fabricados para facilitar el diagnóstico, como por ejemplo el SPAD, el cual es capaz de entregar una medición cuantitativa objetiva de la clorosis foliar asociada a la deficiencia de hierro (Peryea y Kammereck, 1997).

Los análisis químicos de diferentes estructuras vegetales (hojas, flores, brotes y otras) pretenden determinar la concentración de Fe total, Fe extractable, relaciones entre micronutrientes u otros compuestos capaces de predecir o diagnosticar la clorosis férrica.

A nivel foliar, se ha descartado el uso de mediciones de Fe total debido a la comprobada existencia de Fe inactivo en el apoplasto de la hoja de especies vegetales sobre suelos calcáreos (Morales *et al.*, 1998; Bavaresco *et al.*, 1999; Römheld, 2000; Tagliavini y Rombolà, 2001; Benítez *et al.*, 2002; Nikolic y Römheld, 2002; Abadía, 2004; Álvarez – Fernández *et al.*, 2004 y 2005).

Recientemente, Neaman y Aguirre (2007) compararon tres métodos extractivos de hierro para la determinación de la deficiencia de Fe en suelo calcáreo, al evaluar hojas jóvenes (dos meses de edad) de palto cv. Hass cultivado en un suelo calcáreo. Estos autores concluyeron que el uso de fenantrolina 1,5% (pH 3) en hojas frescas permite obtener la mejor correlación con el estatus nutricional de hierro en palto, respecto de la utilización de HCl 1N en hojas frescas y secas de esta misma especie. Estas conclusiones se deberían a que la fenantrolina formaría complejos más estables con  $Fe^{+2}$  que con el  $Fe^{+3}$ , por lo que se podría considerar a este compuesto como específico para el  $Fe^{+2}$ .

Respecto a otras estructuras vegetales, los análisis de flores se encuentran en un fuerte proceso de investigación, ya que éstos permitirían obtener información anticipada respecto del estado nutricional de hierro en las diferentes especies vegetales, tal como se ha señalado para cítricos y durazneros (Belkhodja *et al.*, 1998; Toselli *et al.*, 2000; Martinez *et al.*, 2003; Pestana *et al.*, 2003a y 2004).

Según Belkhodja *et al.* (1998) y Pestana *et al.* (2003a), el patrón de acumulación de Fe en los árboles frutales es estacional, siendo mayor el contenido de Fe en flores que en hojas de las especies caducas, dada la fenología de producción de dichos órganos. Para las especies persistentes, como es el caso de las flores de naranjo (*Citrus sinensis* L. Osb. Cv. Valencia late sobre Citrange Troyer), éstas deben competir con el crecimiento vegetativo por el uso de los nutrientes (Pestana *et al.*, 2003a, 2004).

## 5.2. Influencia del factor genético.

Según Vose (1982) y Marschner (1995), el alelo para la eficiencia en el uso del Fe sería dominante, por lo que el uso de algunas técnicas de mutación para incrementar el rango de tolerancia presentaría el inconveniente de generar individuos con características recesivas respecto a su alelo original, reduciendo las posibilidades de mejorar las especies por ésta vía.

Otro inconveniente radicaría en el bajo atractivo agronómico de las especies desarrolladas, principalmente portainjertos (Tagliavini y Rombolà, 2001) y del largo plazo que involucraría su obtención (Pestana *et al.*, 2003a).

## 5.3. Manejos agronómicos.

### 5.3.1. Estrategias culturales.

Algunos autores como Loue (1988), Tagliavini *et al.* (2000) y Pestana *et al.* (2003a) se han encargado de señalar los beneficios de las praderas y abonos verdes sobre casos de clorosis férrica moderada, producto de las mejoras en la infiltración del suelo y la liberación de sideróforos y fitosideróforos; concluyendo la importancia de reducir la labranza.

Siguiendo el mismo concepto, en ensayos realizados en medio hidropónico con portainjertos de cítricos sensibles a la deficiencia de hierro (*Poncirus trifoliata*, *Citrus paradisi*, citrumelo “swingle”) así como con algunos de tolerancia moderada a esta deficiencia (*Citrus aurantium* L.), se ha observado el efecto beneficioso del uso de gramíneas asociadas (*Z. mays* L., festuca - *Festuca rubra* L.- y pasto mallín - *Poa pratensis* L.-) en condiciones Fe deficientes, principalmente en las especies más sensibles. Esta situación se produce debido a que las especies gramíneas liberan fitosideróforos capaces de incrementar la disponibilidad de hierro en suelos calcáreos, situación aprovechada por las especies cítricas asociadas (Cesco *et al.*, 2006).

Cesco *et al.* (2002) estudiaron plantas de *C. sativus* L. cv. Serpiente cinese con estrategia I y de cebada (*Hordeum vulgare* L., cv. Europa) de estrategia II, para evaluar el consumo de Fe desde complejos realizados con la fracción húmica soluble al agua (WEHS, “water-soluble humic fraction”) extraída desde turba. Los resultados de la investigación indicaron que las plantas de pepino (estrategia I) utilizan los complejos de  $Fe^{+3}$  – WEHS, presumiblemente gracias a la reductasa de la membrana plasmática, mientras que las plantas de cebada (estrategia II) utilizan un mecanismo indirecto que involucraría un ligando entre la WEHS y fitosideróforos (Cesco *et al.*, 2000 y 2002).

Ammari y Mengel (2006) comprueban la importancia de la materia orgánica en su relación con la disponibilidad del hierro presente el suelo. Estos autores evaluaron 32 soluciones de suelo diferentes en textura y pH, mezcladas en razón de 1:1 con arena de cuarzo (humedad 80%) e incubados durante tres días. Los resultados obtenidos indicaron que entre un 50 a un 90% del Fe encontrado estaba formando complejos con moléculas orgánicas (por ejemplo, sideróforos), donde además, el porcentaje de complejos orgánicos de Fe tendría una alta correlación con el pH ( $r = 0,93$ ).

### 5.3.2. Tratamientos dirigidos a las estructuras vegetales

Las aplicaciones foliares se basan en el ingreso de los compuestos a través de grietas e imperfecciones en la cutícula, estomas, tricomas u otras células epidérmicas especializadas (Eichert y Burkhardt, 2001; Eichert *et al.*, 2002; Fernández y Ebert, 2005). Sin embargo, la penetración de los compuestos aplicados foliarmente no sólo depende de la morfología foliar, sino que también de factores fisiológicos, ambientales, así como el tipo de fuente de hierro y sus propiedades físico – químicas, tal como se esquematiza en la Figura 4 (Chen y Barak, 1982; Fernández y Ebert, 2005).

Uno de los compuestos foliares más utilizados es el sulfato ferroso, dado que su solubilidad permite la aplicación mediante una pulverizadora, variando el número de aplicaciones según la especie en cuestión (Thompson, 1965; Tagliavini *et al.*, 2000).

Según Fernández y Ebert, 2005, la efectividad en la corrección de clorosis férrica mediante el uso de sales de  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$  resultaría poco probable, debido a que las primeras producen compuestos insolubles, por lo que deben ser preparadas óptimamente y aplicadas a un pH muy ácido, el cual podría generar daños en los tejidos vegetales. Por otro lado, los mismos autores indican que las sales de  $\text{Fe}^{+2}$  (como el sulfato ferroso) tienen una rápida oxidación al contacto con el aire, precipitando y generando un daño oxidativo.

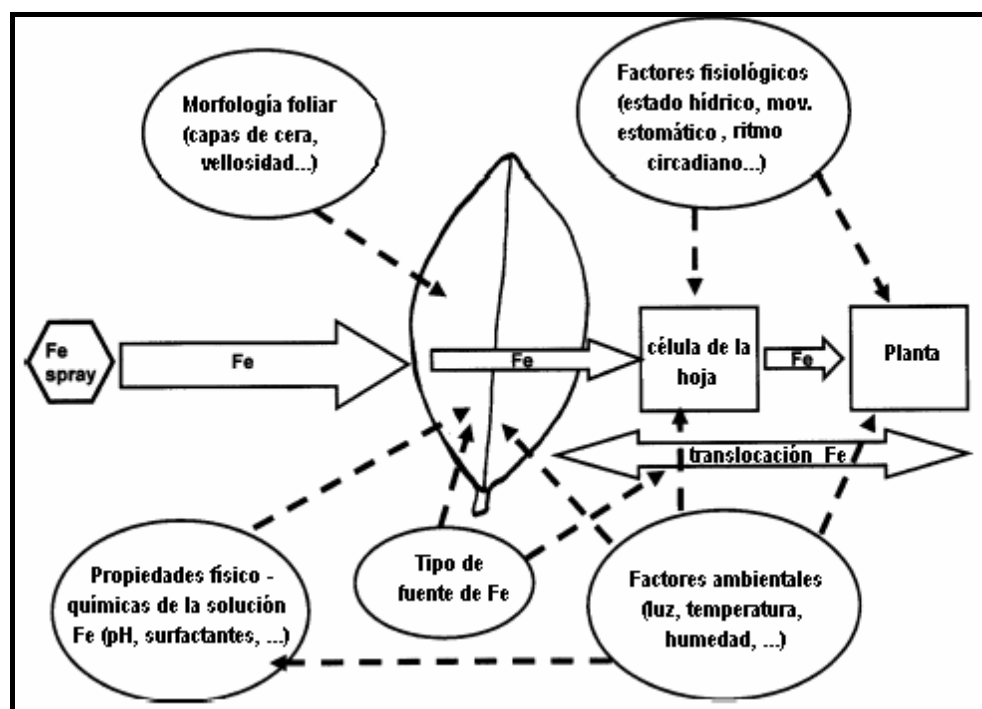


Figura 4. Esquema resumido de los factores que influyen las aplicaciones de *sprays* de Fe. Las mayores interacciones son representadas con flechas. Modificado de Fernández y Ebert (2005).

Agustí (2003), no recomienda estas aplicaciones para la corrección de las deficiencias de hierro en cítricos, ya que sus sales provocarían manchas oscuras sobre las hojas, generando necrosis. En el mismo sentido, Malo (1966) y Gardiazabal (2004) descartan este tipo de aplicaciones en palto, debido al escaso y débil follaje presente en aquellos individuos cloróticos, por lo que utilizan dosis menores a las usadas en cítricos, pero que son incapaces de generar resultados significativos.

Con el fin de mejorar las aplicaciones foliares, se ha investigado una serie de compuestos de Fe alternativos al sulfato de Fe, así como de adyuvantes y surfactantes capaces de potenciar el efecto al incluirlos dentro de las formulaciones. Fernández *et al.* (2006) evaluaron alrededor de 80 combinaciones entre compuestos de Fe [Fe(II)SO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, Fe(III) – citrato, Fe(III) – EDTA, Fe(III) – DTPA, Fe(III) – IDHA], surfactantes [Mistol, capryl – glucoside o alquil(8 – 16) – poliglucosido] y adyuvantes (metanol, glicerol o glicina betaina), en relación a su capacidad de mojamiento y tensión superficial, concluyendo la existencia de una significativa interacción entre los componentes de las formulaciones foliares, logrando diferentes grados de mejora en el nivel de clorofila presentes en las hojas.

Estos autores obtuvieron una conclusión similar a la obtenida por Álvarez – Fernández *et al.* (2004), al evaluar diferentes aplicaciones foliares sobre *P. communis* L., consistente en que aún falta investigación respecto a los mecanismos de penetración del hierro en las hojas y del consumo de éste por las células, capaz de permitir el desarrollo de mejores formulaciones foliares.

Pestana *et al.* (2001 y 2003a) indica que no habría una relación directa entre las aplicaciones foliares de sulfato de Fe<sup>+2</sup> y el aumento de la producción y calibre, debido a que la translocación del Fe aplicado hacia las hojas nuevas o frutos podría ser mínima.

Las aplicaciones foliares de Fe no son populares entre los productores del mediterráneo, debido a su efecto limitado, la baja persistencia de las aplicaciones, el riesgo de generar quemaduras de hojas y frutos, y la variabilidad en el grado de respuesta (Abadía *et al.*, 2004; Fernández y Ebert, 2005).

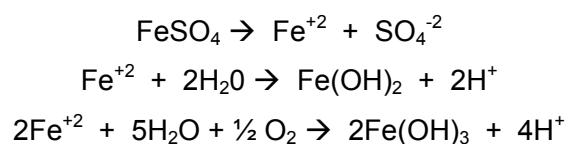
Otra forma de aplicación del sulfato ferroso es mediante inyecciones al tronco, que si bien ha mostrado resultados positivos, posee un alto costo y riesgo de toxicidad y/o contaminación bacterial o viral (Ruíz, 1993; Pestana *et al.*, 2003a). Rivera *et al.* (2007), supone que la ineficacia de este tratamiento en limon (*Citrus lemon*) clorótico radica en su precipitación en el xilema, impidiendo su transporte al mesófilo de la hoja.

### 5.3.3. Tratamientos dirigidos al suelo.

Son variados los compuestos que han sido evaluados con la finalidad de corregir la deficiencia de hierro, desde subproductos de algunas industrias (ácido sulfúrico, humato de hierro, harina de sangre, biosólidos enriquecidos con Fe, entre otros), a compuestos especialmente diseñados como los quelatos, pero aún ninguno de ellos ha logrado una total aplicabilidad a bajo costo (Pérez – Sanz *et al.*, 2002; De Santiago y Delgado, 2007)

La importancia de las raíces en este tipo de tratamientos queda demostrada en las conclusiones de Wallihan *et al.* (1968), quienes indicaron que antes de adicionar cualquier sustancia al suelo con el objetivo de controlar la clorosis férrica de paltos variedad Hass y Rincón en suelo calcáreo de la zona de Santa Barbara, California (USA), es necesario asegurar un buen desarrollo radicular capaz de captar dichos aportes a través del manejo adecuado del riego.

La aplicación de sulfatos ferrosos directamente al suelo ha sido una herramienta muy usada, ya que éste libera iones  $\text{Fe}^{+2}$  que al entrar en contacto con el agua se hidrolizan liberando iones  $\text{H}^+$ , aumentando la acidez del suelo. Luego, el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) se oxida a hierro ferrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) produciendo más  $\text{H}^+$ , como se expresa a continuación: (modificado de Sadzawka, 2006):

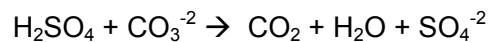


Este método de corrección es poco efectivo en suelos calcáreos, ya que el hierro se insolubiliza en el suelo al transformarse en hidróxido ferroso (Gardiazabal, 2004). En el mismo sentido, Ruíz (1993) califica las aplicaciones de sulfato ferroso (2 kg por árbol) y de azufre (15 – 20 kg por árbol) como ineficientes en la corrección de clorosis férrica de duraznero. Según Tagliavini *et al.* (2000) y Pestana *et al.* (2003a), es necesario adicionar materia orgánica al sulfato de hierro para incrementar su efectividad.

Para Lindsay (1991), la influencia más importante de la materia orgánica sobre la solubilidad del hierro en los suelos alcalinos se debe a la reducción, ya que la respiración de la materia orgánica produce microsítios de reducción, capaces de incrementar los niveles de  $\text{Fe}^{+2}$  por sobre las especies hidrolizadas de  $\text{Fe}^{+3}$  durante largos períodos de tiempo, aumentando su disponibilidad para las plantas.

También se ha planteado la acidificación del suelo para disminuir temporalmente el pH de una zona específica, activando la disponibilidad de algunos nutrientes y mejorando algunas de las características físicas de los suelos, como su capacidad de infiltración. Para este objetivo, se han utilizado ácidos (nitrítico, fosfórico, sulfúrico) o precursores de ácido, como el azufre (Mendoza, 2000).

La aplicación de compuestos ácidos y acidificantes al suelo se basa en que cada equivalente de bicarbonato se destruirá con un equivalente de ácido y cada equivalente de carbonato necesitará de dos equivalentes de ácido para poder ser eliminado del agua de riego. Así, por ejemplo, la reacción de eliminación de bicarbonatos por el ácido sulfúrico es (Mendoza, 2000):



Recientemente, Sierra *et al.* (2007) incubó suelos representativos de la actividad agrícola de las regiones de Atacama y Coquimbo de Chile, a fin de evaluar los efectos del azufre elemental ( $\text{S}^\circ$ ) en dosis de entre 500 y 1000  $\text{mg kg}^{-1}$  de suelo, señalando que la respuesta del suelo a la aplicación de  $\text{S}^\circ$  depende del contenido de calcita (mineral más común del carbonato en el suelo) y materia orgánica, capaces de aumentar la capacidad tampón de los suelos. Esto determina que en suelos calcáreos no se incrementará fuertemente la disponibilidad de algunos micronutrientes (por ejemplo hierro) al aplicar  $\text{S}^\circ$ , mientras que en suelos no calcáreos ésta puede incrementarse.

La capacidad tampón es definida por Porta *et al.* (2003) como un mecanismo de protección frente a modificaciones bruscas del pH, por lo que al añadirle un ácido o una base presenta variaciones muy lentas en su pH.

En soluciones con bajo contenido de bicarbonato, las aplicaciones de ácido sulfúrico incrementan ligeramente la conductividad eléctrica (CE) (Mendoza, 2000). Por el contrario, a mayores concentraciones de bicarbonatos en solución, el ajuste del pH requiere un mayor volumen de ácido sulfúrico, incrementando la concentración del ión sulfato, y por consiguiente de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), que corresponde a una sal de poca movilidad capaz de disminuir la CE.

Ryan *et al.* (1974) señalaron la eficiencia de las aplicaciones de 3% de ácido sulfúrico en el agua de riego sobre el contenido de clorofila de pasto bermuda (*Cynodon dactylon* L.), en suelo calcáreo (pH 8,0), respecto de tratamientos con  $\text{FeSO}_4$  ó Fe – EDDHA.

Se ha demostrado que dosis bajas de ácido sulfúrico acompañado de hierro (Fe), cinc (Zn) o manganeso (Mn) en el agua de riego serían más económicas y de menor riesgo en su manejo, que aplicar altas dosis directamente al suelo (Rodríguez *et al.*, 1998). Así, en *V. vinifera* L. las aplicaciones de ácido sulfúrico diluido (1:4) agregado al suelo calcáreo, aumentó el contenido de clorofila, la concentración de  $\text{Fe}^{+2}$  (hierro activo), así como su presencia en raíces y brotes (Nikolic *et al.*, 1998).

En ensayos bajo invernadero, Thorne (1944) determinó el pH de tres suelos calcáreos (con 1 a 40% de carbonatos totales) mediante un electrodo de vidrio inmerso a 3 cm en contenedores de 3,79 L. Luego de ocho semanas de acidificar los riegos aplicados a plantas de tomate mediante ácido sulfúrico a pH determinados (3, 4, 5 y 6), señaló haber encontrado disminuciones significativas en el pH de todos los tratamientos, a excepción del agua de riego pH 6 para los tres tipos de suelo (Figura 5). Sin embargo, no se especifica la frecuencia y caudal de los riegos, lo cual, complementado con las características volumétricas de los contenedores pudo determinar un incremento en la reacción del ácido sulfúrico en el suelo tratado.

Según Khorsandi (1994), la adición de ácido sulfúrico al suelo genera un incremento en su acidez, salinidad, Fe extraíble por DTPA y fósforo disponible por método Olsen en suelos calcáreos con entre 24 y 68 g/kg de  $\text{CaCO}_3$ , afectando significativamente la disponibilidad de Fe (extractable por DTPA) con aplicaciones a tasas superiores al 21,6% ATB.

A modo aclaratorio de la metodología utilizada por Khorsandi (1994), el DTPA o ácido dietilentriamino pentaacético, es un análisis de suelo desarrollado para identificar suelos calcáreos o neutros con insuficiente disponibilidad de Zn, Cu, Fe o Mn para los máximos rendimientos de cosecha (Lindsay y Norwell, 1978). Por otro lado, los resultados entregados por este autor en términos de % ATB expresan un índice de la habilidad del suelo para absorber y neutralizar los compuestos ácidos, como el ácido sulfúrico (Miyamoto et al, 1973).

Para Porta *et al.* (1993) y Khorsandi (1994), la capacidad de intercambio catiónico del suelo permite que este último presente variaciones lentas en su pH al agregar el ácido (o base), sirviendo como defensa frente a cambios bruscos, lo que señala la presencia de otros factores capaces de condicionar la respuesta del suelo frente a la aplicaciones acidificadas, como los presentados por Ryan *et al.* (1974), Tagliavini y Rombolà (2001) y Benítez *et al.* (2002) concernientes a la estacionalidad de la clorosis producto de la humedad y temperatura del suelo.

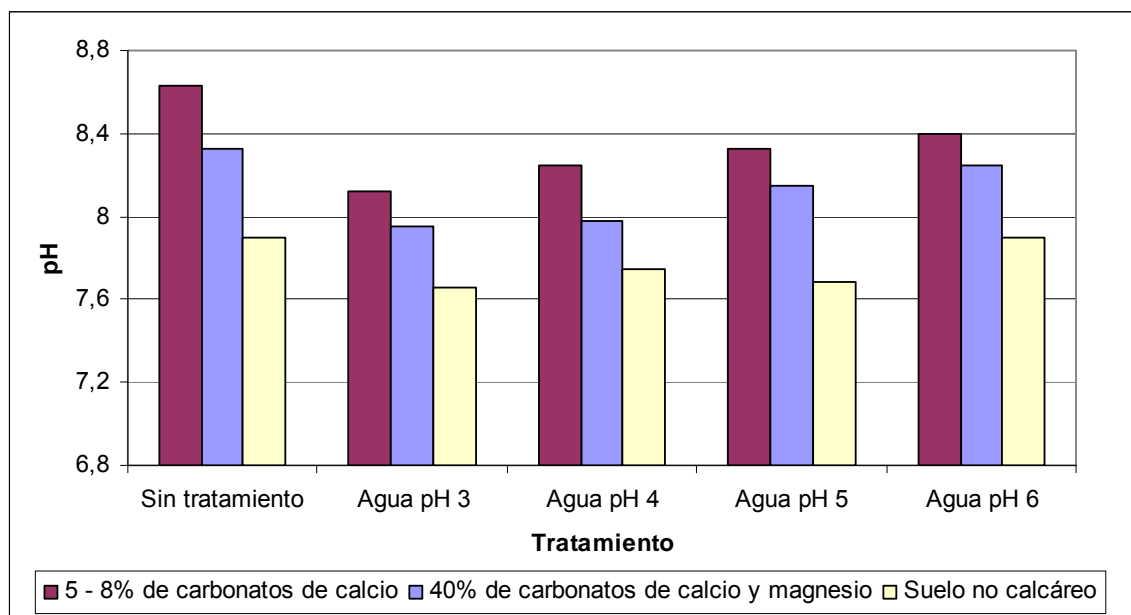


Figura 5. Valores de pH en tres suelos con agua de riego acidificada. Extraído de Thorne (1944).

Por lo tanto, los efectos de los tratamientos ácidos dependen de las propiedades del suelo, especie cultivada, método de aplicación y proporción de éste. Miyamoto *et al.* (1975) indican que en los suelos calcáreos del suroeste de California que poseen un fuerte poder tampón, las cantidades de ácido sulfúrico requeridas para tratar la zona radicular completa son impracticables, indicando que los tratamientos en bandas o localizados tienen mejores resultados que aquellos aplicados directamente al suelo o suministrados vía sistema de riego, contraponiéndose a los resultados de Thorne (1944).

Ruíz (2006) intenta aproximarse a la situación nacional, al entregar una estimación de la cantidad necesaria de ácido sulfúrico en el riego que permita lograr un pH 5,5 en el suelo (Cuadro 3), señalando una elevada demanda de ácido sulfúrico para suelos con mas de 5% de carbonatos.

Cuadro 3. Estimación de la cantidad teórica de ácido sulfúrico (al 85 %), necesaria para alcanzar un pH de 5,5 en suelos de distinto contenido calcáreo de la Región de Valparaíso, Chile (Ruíz, 2006).

Suelo	Profundidad (cm)	Ác. sulfúrico (g/kg)	Ác. sulfúrico (t/ha)	pH original	CaCO <sub>3</sub> (%)
<b>San Lorenzo</b>	0 – 30	22,7	91,9	8,2	5,5
	30 – 60	25,5	103,2	8,2	5,5
<b>La Calera</b>	0 – 30	2,76	11,1	7,9	0,2
	30 – 60	1,90	7,7	7,9	0,2
<b>La Ligua</b>	0 – 30	3,08	12,5	7,6	0,7
	30 – 60	3,12	12,7	7,5	0,7

A nivel general, y siendo ratificado por Imas (2000), el uso de estos ácidos no es recomendable tanto en suelos con alto, como con bajo nivel de carbonatos, pues en ambos se hacen necesarias dosis elevadas de ácido sulfúrico durante largos períodos a fin de lograr una disminución consistente en el pH, a través de la neutralización de los carbonatos (Anexo 3).

La investigación también se ha desarrollado en el uso de otros compuestos, como la vivianita, que corresponde a un fosfato de hierro octahidratado (Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 8H<sub>2</sub>O). El uso

de vivianita ha sido promovido gracias a su alto contenido de hierro, también por el ión ferroso que liberaría bajo condiciones reducidas, así como por el menor costo que involucra su síntesis (Einard *et al.*, 1992; Rosado *et al.*, 2002).

Se ha demostrado la efectividad de la vivianita por sobre otros fosfatos de hierro (por ejemplo fosfato de  $\text{Fe}^{+3}$ ) en la corrección de clorosis férrica en garbanzo (*Cicer arietinum* L.), pero sin mostrar una diferencia significativa respecto de la aplicación de quelatos (FeEDDHA), indicando además que su eficacia sería independiente del contenido de  $\text{Fe}^{+2}$  (Einard *et al.*, 1992).

#### 5.3.4. Antecedentes de los quelatos de hierro.

Un quelato corresponde a un compuesto orgánico combinado con ciertos cationes metálicos, como hierro, manganeso, cinc y cobre, a las cuales priva de algunas de sus características iónicas usuales, como su tendencia a precipitar en forma de hidróxidos insolubles (Buckman y Brady, 1993).

Los quelatos de hierro han sido los compuestos con mejores resultados en el control de clorosis férrica, siendo su uso restringido por el alto costo que involucran. Ortega-Blu y Molina-Roco (2007), señalan que las fuentes queladas de hierro, al igual que las de Zn, producen rendimientos ligeramente más altos en materia seca de ballica perenne (*Lolium perenne* L.), al utilizar dosis 20% más bajas respecto al uso de sulfatos de hierro y Zn. Sin embargo, su mayor eficiencia no es suficiente para superar su mayor costo, derivando en una menor relación beneficio/costo en comparación con las sales simples de sulfato.

Las formas férricas quelatadas más utilizadas son las de Fe-EDDHA, cuyo nombre comercial puede ser: Sequestrene 138 Fe o Bolikel Hierro, u otros productos que contengan Fe-EDDHA. Estos productos al ser aplicados al suelo permanecen solubles logrando resultados satisfactorios (Gardiazabal, 2004).

En aplicaciones directas al suelo, es importante pulverizarlo sobre la superficie, seguido de un riego abundante que permita una rápida penetración en profundidad, normalmente en primavera, entre el comienzo de la floración y plena flor (Loué, 1988; Pestana *et al.*, 2003a). Otra forma de aplicación al suelo es mediante fertirriego (Pestana *et al.*, 2003a).

Al comparar la efectividad de los quelatos sobre suelos alcalinos, se produce una ineficacia del Fe – EDTA, el cual sobre pH 7,5 pierde toda estabilidad liberando el Fe quelatado al medio. El Fe – EDDHA es mucho más estable a pH alcalino, destacándose el isómero *orto* EDDHA y no el *para*, el cual es de baja estabilidad. Actualmente, varias de las formulaciones comerciales contienen ambas formas isoméricas, debido a los recientes hallazgos de sinergia en ese tipo de mezclas, aunque aún falta bastante por investigar (Chen y Barak, 1982; Mendoza, 2000; Pestana *et al.*, 2003a; García – Marco *et al.*, 2006).

Las dosis recomendadas de quelatos son variables. Comúnmente se recomienda dosis de 30 a 50 g de quelato EDDHA por árbol, equivalentes a 1,8 a 3,0 g de Fe por árbol, considerando un contenido de Fe de 6% (Abadía *et al.*, 2004). En Israel han obtenido una buena cura de clorosis en suelo calcáreo sobre el duraznero con 100 g por árbol de EDDHA de Fe, pero debe duplicarse como mínimo en suelos más arcillosos, mientras que en Francia, las dosis varían entre 50 a 200 g del producto por árbol (Loué, 1988).

Por otro lado, en suelos con altos contenidos de caliza activa y/o regados con aguas ricas en bicarbonatos, las aplicaciones de hierro quelatado, al suelo o al follaje no dan una solución definitiva al problema, pues son observables aumentos en los niveles de hierro en las hojas, pero éste corresponde a  $Fe^{+3}$  producto de la inactivación del  $Fe^{+2}$  (forma activa) que se puede producir bajo estas condiciones (Mendoza, 2000).

Se han desarrollado varios quelatos nuevos con el objetivo de solucionar las deficiencias de micronutrientes como el Fe, así, Álvarez – Fernández *et al.* (2002a) evaluaron Fe – EDDHSA y Fe-EDDCHA en condiciones de laboratorio, los que comparados con Fe – EDDHA y Fe – EDDHMA (quelatos usados comercialmente) mostraron una estabilidad similar entre pH 4,0 y 9,0 en el suelo. Por otro lado, los nuevos quelatos poseían una mayor estabilidad frente a óxidos de hierro (ferrihidrita) y materia orgánica (turba ácida) que Fe – EDDHA y Fe – EDDHMA, siendo una posible recomendación en suelos con

características semejantes a las mencionadas. En recientes investigaciones de campo, Álvarez – Fernández *et al.* (2005) encontraron una mayor solubilidad del Fe – EDDHSA en el suelo, presentando una baja retención de éstos en el medio, aunque su dosis, frecuencia, persistencia y efectos en el ambiente faltan aún por investigar.

Para Álvarez – Fernández *et al.* (2005), la efectividad de los quelatos Fe – EDDHA y Fe – EDDHMA en condiciones de campo sobre clorosis férrica en *P. persica* L. Batsch, cv Sundanell y *P. communis* cv. Conference es similar, más aún, si se realiza considerando una igualdad en las dosis, al comparar los ingredientes activos y no las indicaciones de Fe soluble presentes en sus etiquetas comerciales.

Otro inconveniente a la utilización de quelatos tiene relación con su aparente agresividad al medio ambiente, debido a la baja biodegradación que presenta en el suelo (Nörtemann, 1999; Álvarez – Fernández *et al.*, 2002b).

Se ha buscado alternativas más eficientes y amigables al medio ambiente, dado que los quelatos sintéticos serían poco biodegradables, dificultando su eliminación de las aguas residuales y ecosistemas. Según Sillanpää (1997), los EDTA y DTPA pueden generar la desorción de metales pesados vinculados a los sedimentos, así como también evitar la sedimentación de metales pesados, aumentando su ciclo en el agua.

Nörtemann (1999) señala que el agente quelante EDTA no es degradado por métodos biológico y fisicoquímicos convencionales usados para el tratamiento de aguas residuales y/o la purificación de agua potable, siendo necesarios tratamientos con cultivos enriquecidos de bacterias especiales. Para solucionar este problema, se han evaluado formulaciones nuevas, como el uso de sideróforos microbianos en este tipo de aplicaciones, pero aún de manera muy incipiente (Fernández *et al.*, 2005).

## 6. Análisis económico de dos alternativas de corrección utilizadas en Chile.

Tomando el caso de un cultivo de palto, en una marco de plantación de 6 x 4 m, sobre suelo calcáreo con 5 % de cal activa y un valor del dolar igual a \$524 pesos chilenos (27/08/2007), se puede estimar el costo relativo de la materia prima de los siguientes tratamientos.

Suponiendo además, que todos los árboles presentan un nivel general medio de deficiencia, en que todos presentarían algún grado de clorosis, así como una correcta aplicación de los tratamientos.

### 6.1. Aplicación de ácido sulfúrico con fines neutralizantes de carbonatos.

Considerando un valor aproximado del ácido sulfúrico, US\$ 90 por tonelada<sup>-1</sup>, es decir, \$47.182 pesos chilenos por tonelada<sup>-1</sup>. Si la densidad de este ácido es de 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Es posible estimar la cantidad necesaria capaz de neutralizar el 5 % de cal activa existente en una hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm (Anexo 3).

Entonces, para un suelo calcáreo con 5% de cal activa, se necesita 105 m<sup>3</sup> de ácido sulfúrico, es decir, aproximadamente 189 toneladas de este ácido, determinando un costo aproximado de \$8.917.398 sólo en ácido por hectárea.

### 6.2. Aplicación de quelatos de hierro directo al suelo.

Utilizando un quelato EDDHA (Bioestrene® 60 PS), con un valor aproximado de \$ 36.600 + IVA por envase de 5 kg, aplicando la dosis recomendada por fabricante para esta especie de 100 g por planta, con una frecuencia de aplicación que varía entre dos a cuatro veces al año, según el nivel de deficiencia de hierro implicaría un costo anual aproximado de \$ 951.600 + IVA por hectárea (Anexo 4).

## 7. Conclusiones.

El bicarbonato es la principal causa de clorosis férrica en suelos calcáreos, mientras que en los suelos no calcáreos, la presencia de clorosis férrica dependerá de los niveles de manganeso, cobre o cinc que son capaces de competir con el hierro en la absorción por la planta, así como de los manejos agronómicos realizados.

La clave del control de la clorosis férrica radica en el diagnóstico prematuro, el cual requiere mayor investigación.

Las aplicaciones de ácidos para neutralizar los carbonatos de los suelos calcáreos demandan volúmenes superiores a los comúnmente recomendados, incrementando los riesgos para los operarios, la infraestructura y las plantas, así como un aumento en el costo involucrado. En suelos no calcáreos, las aplicaciones de ácidos serán en función del tipo de suelo y sus constituyentes principales.

Respecto a los tratamientos foliares, aún se requiere mayor investigación de los factores ambientales y fisiológicos inherentes a este proceso para poder obtener formulaciones correctivas eficientes, ya que las existentes involucran un elevado riesgo de daño en las estructuras vegetales y una incierta translocación.

Dentro de las incorporaciones de compuestos al suelo, el uso de vivianita debe ser evaluado en un mayor número de tipos de suelo y especies vegetales, a fin de considerar la conveniencia en su uso.

A nivel mundial, el factor económico ya no es el único impedimento en la utilización de quelatos, sino que su elevada persistencia en el ambiente ha generado un escenario de incertidumbre respecto a su uso futuro, situación que debiese quedar zanjada en los próximos años.

## 8. Literatura citada.

- Abadía, J., A. Álvarez – Fernández, A. Rombolà, M. Sanz, M. Tagliavini, and A. Abadía. 2004. Technologies for the diagnosis and remediation of Fe deficiency. *Soil Science and Plant Nutrition* 50 (7): 965 – 971.
- Agustí, M. 2003. *Citricultura*. 422 p. 2da Ed. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Agustí, M. 2004. *Fruticultura*. 493 p. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Alcántara, E., A. Cordeiro, and D. Barranco. 2003. Selection of olive varieties for tolerance to iron chlorosis. *Journal of Plant Physiology* 160: 1467 – 1472.
- Álvarez – Fernández, A., M. Sierra, and J. Lucena. 2002a. Reactivity of synthetic Fe chelates with soils and soil components. *Plant and Soil* 241: 129 – 137.
- Álvarez – Fernández, A., M. Cremonini, M. Sierra, G. Placucci, and J. Lucena. 2002b. Nature of impurities in fertilizers containing EDDHMA/Fe<sup>+3</sup>, EDDHSA/Fe<sup>+3</sup> and EDDCHA/Fe<sup>+3</sup> chelates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 284 - 290.
- Álvarez – Fernández, A., P. Paniagua, J. Abadía, and A. Abadía. 2003. Effects of Fe deficiency chlorosis on yield and fruit quality in peach (*Prunus persica* L. Batsch) *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 5738 – 5744.
- Álvarez – Fernández, A., P. García – Lavaña, C. Fidalgo, J. Abadía, and A. Abadía. 2004. Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Plant and Soil* 263: 5 – 15.
- Álvarez – Fernández, A., S. García – Marco, and J. Lucena. 2005. Evaluation of synthetic iron(III) – chelates (EDDHA/Fe<sup>+3</sup>, EDDHMA/Fe<sup>+3</sup>) and the novel EDDHSA/Fe<sup>+3</sup>) to correct iron chlorosis. *European Journal of Agronomy* 22: 119 – 130.
- Ammari, T. 2005. Total soluble iron in the soil solution of physically, chemically and biologically different soils. 120 p. Ph.D. thesis, Justus Liebig University, Agricultural and Nutritional Sciences, Home Economics and Environmental Management, Giessen, Germany.
- Ammari, T. and K. Mengel. 2006. Total Fe soluble in soil solutions of chemically different soils. *Geoderma* 136 (3 – 4): 876 – 885.
- Amorós, M. 1995. *Producción de agríos*. 286 p. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Bavaresco, L., E. Giachino, and R. Colla. 1999. Iron chlorosis paradox in grapevine. *Journal of Plant Nutrition* 22 (10): 1589 – 1597.

- Belkhodja, R., F. Morales, M. Sanz, A. Abadía, and J. Abadía. 1998. Iron deficiency in peach trees: effects on leaf chlorophyll and nutrient concentrations in flowers and leaves. *Plant and Soil* 203: 257 – 268.
- Benítez, M., V. Pedrajas, M. del Campillo, and J. Torrent. 2002. Iron chlorosis in olive in relation to soil properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62: 47 – 52.
- Boxma, R. 1972. Bicarbonate as the most important soil factor in the lime induced chlorosis in the Netherlands. *Plant and Soil* 37, 233 – 243.
- Brennan, E. and W. Lindsay. 1998. Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Science Society of America Journal* 62: 930 – 937.
- Brown, J. and L. Tiffin. 1962. Zinc deficiency and iron chlorosis dependent on the plant species and nutrient – element balance in Tulare clay. *Agronomy Journal* 54: 356 – 358.
- Buckman, H. and N. Brady. 1993. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. 590 p. UTEHA, México D.F., México.
- Cesco, S., V. Römheld, Z. Varanini, and R. Pinton. 2000. Solubilization of iron by water – extractable humic substances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 163 (3): 285 – 290.
- Cesco, S., M. Nikolic, V. Römheld, Z. Varanini, and R. Pinton. 2002. Uptake of Fe from soluble Fe – humate complexes by cucumber and barley plants. *Plant and Soil*. 241(1): 121 – 128.
- Cesco, S., A. Römola, M. Tagliavini, Z. Varanini, and R. Pinton. 2006. Phytosiderophores released by graminaceous species promote Fe uptake in citrus. *Plant and Soil*. 287 (1 – 2): 223 – 233.
- Chen, Y., and P. Barak. 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Advances in Agronomy*. 35: 217 – 240.
- Coulombe, B., R. Chaney, and W. Wiebold. 1984. Bicarbonate directly induces iron chlorosis in susceptible soybean cultivars. *Soil Science Society of America Journal*. 48: 1297 – 1301.
- De Santiago, A. and A. Delgado. 2007. Effect of humic substances on iron nutrition of lupin. *Biology and Fertility of Soils* 43 (6): 829 – 836.
- Eichert, T and J. Burkhardt. 2001. Quantification of stomatal uptake of ionic solutes using a new model system. *Journal of Experimental Botany* 52 (357): 771 – 781.
- Eichert, T., J. Burkhardt, and H.E. Goldbach. 2002. Some factors controlling stomatal uptake. *Acta Horticulturae* 594: 85 – 90.

- Einard, A., M. Campillo, V. Barron, and J. Torrent. 1992. Use of vivianite ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) to prevent iron chlorosis in calcareous soils. *Fertilizer Research* 31: 61 – 67.
- Epstein, E., and A. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plants: principles and perspectives. 400 p. 2da Edición. Sinauer Associates, Massachusetts, USA.
- Faust, M. 1989. Physiology of temperate zone fruit trees. 338 p. Wiley – Interscience Publication, New York, USA.
- Fernández, V., G. Ebert, and G. Winkelmann. 2005. The use of microbial siderophores for foliar iron application studies. *Plant and Soil* 272: 245 – 252.
- Fernández, V. and G. Ebert. 2005. Foliar iron fertilization: a critical review. *Journal of Plant Nutrition* 28: 2113 – 2124.
- Fernández, V., V. del Río, J. Abadía, and A. Abadía. 2006. Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* (L.) Batsch): effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. *Plant Soil* 289: 239 – 252.
- Fernandez – Escobar, R. 1998. Fertilización. p. 237 – 257. In: D. Barranco, R. Fernández – Escobar, y L. Rallo (eds). *El cultivo del olivo*. 651p. 2da ed. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Foth, H. 1997. Fundamentos de la ciencia del suelo. 433 p. Séptima edición. Compañía Editorial Continental, México D.F., México.
- García – Marco, S., N. Martínez, F. Yunta, L. Hernández – Apaolaza, and J. Lucena. 2006. Effectiveness of ethylenediamine – *N*(*o* – hydroxyphenylacetic) – *N*(*p* – hydroxyphenylacetic) acid (*o,p* – EDDHA) to supply iron to plants. *Plant and Soil* 279: 31 – 40.
- Gardiazabal, F. 2004. Clima suelo y agua fertilización y riego. p 1-25. In Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda.. 2º Seminario Internacional de paltos, Viña del Mar, 29, 30 y 1 de octubre de 2004. Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda, Viña del Mar, Chile.
- Haas, A. 1942. Lime – induced chlorosis of citrus in relation to soil factors. *Plant Physiol.*, 17(1): 27 – 51.
- Hagemeyer, J. and S. Breckle. 1996. Growth under trace elements stress. p 415 – 433. In Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi (eds). *Plant roots, the hidden half*. Marcel Dekker. Nueva York, Estados Unidos.
- Haynes, R. and K. Goh. 1978. Ammonium and nitrate nutrition of plants. *Biological Reviews* 53: 465 – 510.
- Imas, P. 2000. Integrated nutrient management for sustaining crop yields in calcareous soils. In GAU – PRII – IPI National Symposium on: Balanced nutrition of groundnut and other field crops grown in calcareous soils of India. Junagadh, Gujarat, India. 19 – 22

september 2000. International Potash Institute. Available at <http://www.ipipotash.org/presentn/inmfscy.html> . Accessed June 12, 2007.

Inskeep, W. and P. Bloom. 1986. Effects of soil moisture on soil  $p\text{CO}_2$ , soil solution bicarbonate, and iron chlorosis in soybeans. *Soil Science Society of America Journal* 50: 946 – 952.

Jaegger, B., H. Goldbach, and K. Sommers. 2000. Release from lime induced iron chlorosis by CULTAN in fruit trees and its characterisation by analysis. *Acta Horticulturae* 531: 107 – 113.

Jin, C., Y. He, C. Tang, P. Wu, and S. Zheng. 2006. Mechanisms of microbially enhanced Fe acquisition in red clover (*Trifolium pratense* L.). *Plant, Cell and Environment* 29: 888 – 897.

Khorsandi, F. 1994. Sulfuric acid effects on iron and phosphorus availability in two calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 17(9):1611-1623.

Kosegarten, H., B. Hoffmann, and K. Mengel. 1999. Apoplastic pH and  $\text{Fe}^{+3}$  reduction in intact sunflower leaves. *Plant Physiology*. 121: 1069 – 1079.

Kosegarten, H., B. Hoffman, E. Rroco, F. Grolig, K. Glüsenkamp, and K. Mengel. 2004. Apoplastic pH and  $\text{Fe}^{+3}$  reduction in young sunflower (*Helianthus annuus* L.) roots. *Physiologia Plantarum* 122 (1): 95 – 106.

Krauskopf, K. 1983. Geoquímica de los micronutrientes. p. 7 – 43. In: J. Mortvedt, P. Giordano, and W. Lindsay (eds) *Micronutrientes en Agricultura*. Editorial A.G.P, México D.F., México.

Lahav, E., y A. Whiley. 2007. Riego y nutrición mineral. p. 241 - 274. In A. Whiley, B. Schaffer, and B. Wolstenholme (eds). *El palto: botánica, producción y usos*. Ediciones Universitarias de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

Lindner, R., and C. Harley. 1944. Nutrient interrelations in lime – induced chlorosis. *American Society of Plant Biology*, 19: 420 – 439

Lindsay, W. 1974. Role of chelation in micronutrient availability. p 506 – 524. In: E. Carson (ed). *The plant root and its environment*. University Press of Virginia, Virginia , USA.

Lindsay, W. and W. Norwell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal* 42: 421 – 428.

Lindsay, W. 1979. *Chemical equilibria in soils*. 449 p. John Wiley & Sons, New York, USA.

Lindsay, W. 1991. Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant and Soil* 130 (1 – 2): 27 – 34.

- Loue, A. 1988. Microelementos en agricultura. 354 p. Mundiprensa, Madrid, España.
- Lucas, R. and J. Davis. 1961. Relationships between pH values of organic soils and availability of 12 nutrients. *Soil Science* 92:177-182.
- Lucena, C., F. Romera, C. Rojas, M. García, E. Alcántara, and R. Pérez – Vicente. 2007. Bicarbonate blocks the expresión of several genes involved in the physiological responses to Fe deficiency of Strategy I plants. *Functional Plant Biology*. 34 (11): 1002 – 1009.
- Luna, F. 1990. Nogal: producción de fruto y madera. 155p. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 888 p. 2da ed. Academic Press Limited, Londres, UK.
- Malo, S. 1966. Correction of iron chlorosis of avocado avocados growing in calcareous soils. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 79: 386 – 390.
- Martinez, H., R. Souza, J. Abadía, V. Alvaréz, and M. Sanz. 2003. Coffee – tree floral analysis as a mean of nutritional diagnosis. *Journal of Plant Nutrition* 26 (7): 1467 – 1482.
- Mendoza, H. 2000. Alcalinidad y salinidad: diagnóstico, efecto sobre la producción y soluciones. 17 p. In *Bioamerica* (ed.) 1° Simposium Internacional Fertirrigación y control en frutales y viñas, Santiago, agosto 2000. Bioamerica, Santiago, Chile.
- Mengel, K., M. Breininger, and W. Bübl. 1984. Bicarbonate, the most important factor inducing iron chlorosis in vine grapes on calcareous soils. *Plant and Soil* 81: 333 – 344.
- Mengel, K., R. Planker, and B. Hoffmann. 1994. Relationship between leaf apoplast pH and iron chlorosis of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Plant Nutrition*. 17(6): 1053 – 1065.
- Mengel, K., and E. Kirkby. 2000. Principios de nutrición vegetal. 692 p. 4ª ed. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Miyamoto, S., H. Bohn, and J. Renthal. 1973. Determining the acid –titratable basicity of calcareous soils. *Soil Science Society of American Procedure* 37: 657 – 658.
- Miyamoto, S., J. Ryan, and L. Stroehlein. 1975. Potentially beneficial uses of sulfuric acid in southwestern agriculture. *J. Environ. Quality* 4: 431-437.
- Morales, F., R. Grasa, A. Abadía, and J. Abadía. 1998. Iron chlorosis paradox in fruit trees. *Journal of Plant Nutrition* 21 (4): 815 – 825.
- Navarro, G. 2003. Química Agrícola. 487 p. Ediciones Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Neaman, A. and L. Aguirre. 2007. Comparison of different methods for diagnosis of iron deficiency in avocado. *Journal of Plant Nutrition* 30: 1097 – 1108.

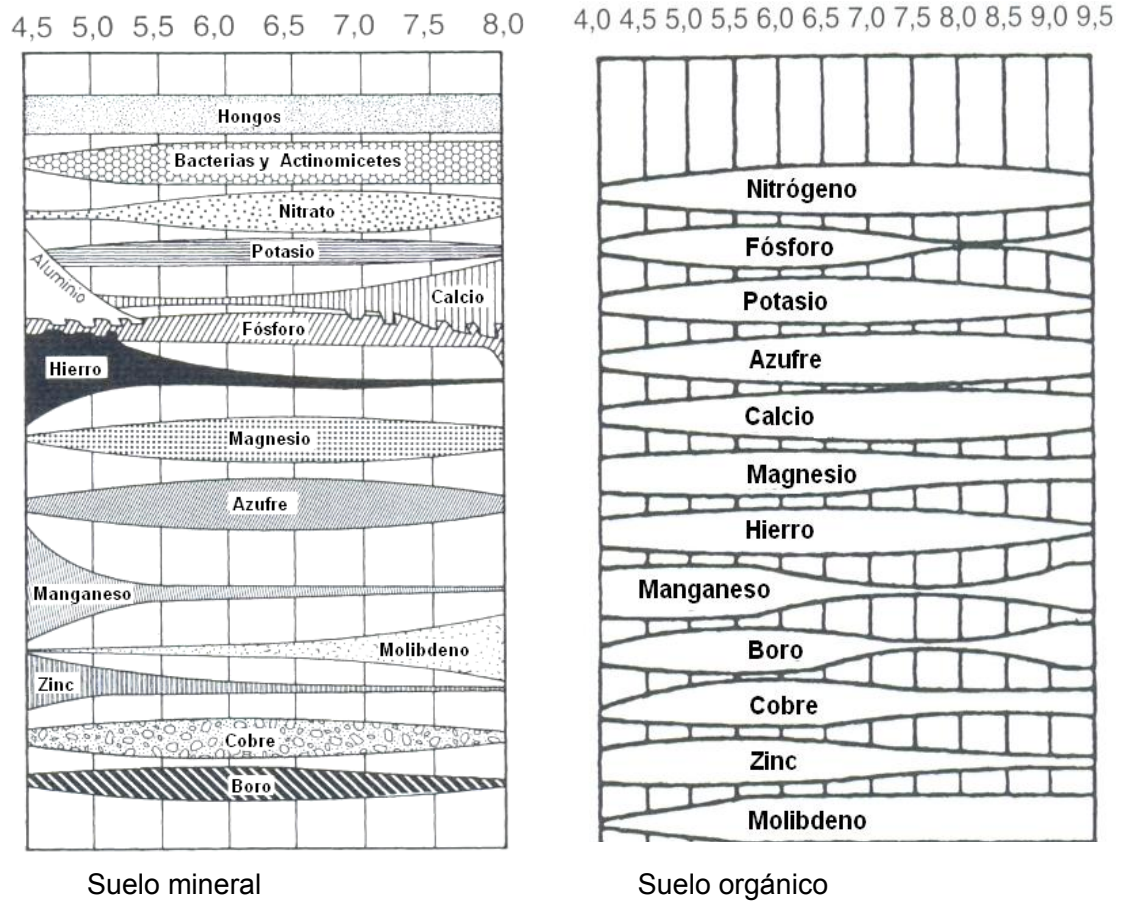
- Neilsen, G., and D. Neilsen. 2003. Nutritional requirements of apple. p. 267 – 302, 7<sup>a</sup> ed. In. D. Ferree, and I. Warrington (eds). Apples: botany, production and uses.. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Nikolic, M., R. Dzamic, and D. Stevanovic. 1998. Use of sulfuric acid to prevent iron chlorosis in grapevine grafts on calcareous soil. *Acta Horticulturae* 477: 153 – 158.
- Nikolic, M., and R. Kastori. 2000. Effect of bicarbonate and Fe supply on FE nutrition of grapevine. *Journal of Plant Nutrition* 23 (11 – 12): 1619 – 1627.
- Nikolic, M., and V. Römheld. 1999. Mechanism of Fe uptake by the leaf symplast: is Fe inactivation in leaf a cause of Fe deficiency chlorosis?. *Plant and Soil* 215 (2): 229 – 237.
- Nikolic, M., and V. Römheld. 2002. Does high bicarbonate supply to roots change availability of iron in the leaf apoplast?. *Plant and Soil* 241: 67 – 74.
- Nörtemann, B. 1999. Biodegradation of EDTA. *Applied Microbiology Biotechnology* 51: 751-759.
- Obreza, T.A., A. K. Alva and D.V. Calvert. 1993. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Circular 1127, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Available at [http://edis.ifas.ufl.edu/BODY\\_CH086](http://edis.ifas.ufl.edu/BODY_CH086). Accessed 15 June 2007.
- Ortega – Blu, R. y M. Molina – Roco. 2007. Comparación entre sulfatos y compuestos quelados como fuentes de zinc y hierro en suelos calcáreos. *Agrociencia* 41: 491-502.
- Palacios, J. 2003. Clorosis férrica y su relación con el nivel de clorofila y hierro en diferentes órganos en palto (*Persea americana* Mill.). 22p. Tesis Ing. Agr. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Peréz – Sanz, A., A. Álvarez – Fernández, T. Casero, F. Legaz, and J. Lucena. 2002. Fe enriched biosolids as fertilizers for orange and peach trees grown in field conditions. *Plant and Soil* 241: 145 – 153.
- Peryea, F., and R. Kammereck. 1997. Use of SPAD meter to quantify the effectiveness of mid- summer trunk injection of iron on iron deficient pear trees. *Acta Horticulturae*. 448:359-360.
- Pestana, M., P. Correia, A. Varennes, J. Abadía, and E. Araújo. 2001. Effectiveness of different foliar iron applications to control iron chlorosis in orange trees grown on a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 24 (4 – 5): 613 -622.
- Pestana, M., A. de Varennes, and E. Araújo. 2003a. Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees: a review. *Food, Agriculture & Environment* 1(1): 46 – 51.
- Pestana, M., A. Varennes, J. Abadía, y E. de Araújo. 2003b. Evaluación de la tolerancia a la clorosis férrica de portainjertos de cítricos en solución nitritiva. *Todo CITRUS* 22: 5 – 9.

- Pestana, M., A. de Varennes, M. Goss, J. Abadía, and E. Araújo. 2004. Floral analysis as a tool to diagnose iron chlorosis in orange trees. *Plant and Soil* 259: 287 – 295.
- Porta, J., M. Lopez – Acevedo, y C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 929 p. Ediciones Mundiprensa, Madrid, España.
- Razeto, B., G. Sellés, C. Stockle, y J. Cobo. 1984. Tratamiento de la deficiencia de hierro en durazneros regados por goteo. *Agricultura Técnica* 44 (1): 89 – 91.
- Razeto, B. 1993. *La Nutrición Mineral de los Frutales. Deficiencias y Excesos*, 105 p SOQUIMICH, Santiago, Chile.
- Razeto, B. y G. Valdés. 2006. Análisis de hierro soluble en tejidos para diagnosticar el déficit de hierro en nectarino. *Agricultura Técnica* 66 (2): 216 – 220.
- Rivera, P., B. Castro, F. de la Garza, G. Mendoza, and J. Etchevers. 2007. Evaluation of different iron compounds in chlorotic Italian lemon trees (*Citrus lemon*). *Plant Physiology and Biochemistry* 45: 330 – 334.
- Rodríguez, V., M. Beltrán, J. Lerma, y M. Licón. 1998. Aplicación de ácido sulfúrico en el riego corrige la clorosis férrica de los cultivos en suelos calcáreos. *Terra* 16 (2): 149 – 161.
- Römheld, V., H. Marschner, and D. Kramer. 1982. Responses to Fe deficiency in roots of “Fe – efficient” plant species. *Journal of Plant Nutrition* 5 (4 – 7): 489 – 498.
- Römheld, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *Journal of Plant Nutrition* 23 (11 – 12): 1629 – 1643.
- Rosado, R., M. Campillo, M. Martínez, V. Barrón, and J. Torrent. 2002. Long – term effectiveness of vivianite in reducing iron chlorosis in olive trees. *Plant and Soil* 241: 139 – 144.
- Rowell, D. 1992. Acidez y alcalinidad del suelo. p 885 – 940. In: E. Russell, y A. Wild (eds). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Mundi – Prensa, Madrid, España.
- Ruíz, R. 1993. Nutrición. p 151 – 173. In: Lemus, G. (ed.). *El duraznero en Chile*. Editorial Los Andes, Santiago, Chile.
- Ruíz, R. 2006. Manejo de suelo y nutrición en suelos con problemas de aireación. p. 20. In. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Seminario Manejo del riego y suelo en el cultivo del palto, Quillota, 27 – 28 de septiembre de 2006. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuaria, Santiago, Chile.
- Ryan, J., J. Stroehlein, and S Miyamoto. 1974. Sulfuric acid applications to calcareous soils: Effects on Growth and Chlorophyll content of common bermuda grass in the greenhouse. *Agronomy Journal* 67: 633 – 637.

- Sadzawka, A. 2006. Propiedades físico – químicas de los suelos I: reacción (pH), acidez y alcalinidad. pp 91 – 127. In: W. Luzio y M. Casanova (eds.). Avances en el Conocimiento de los Suelos de Chile. Santiago, Chile. 393 p.
- Shahabi, A., M. Malakouti, and E. Fallahi. 2005. Effects of bicarbonate content of irrigation water on nutritional disorders of some apple varieties. *Journal of Plant Nutrition* 28 (9): 1663 – 1678.
- Sierra, C., A. Lancelloti, y I. Vidal. 2007. Azufre elemental como corrector del pH y la fertilidad de algunos suelos de la III y IV región de Chile. *Agricultura Técnica* 67(2): 173 – 181.
- Sillanpää, M. 1997. Environmental fate of EDTA and DTPA. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology* 152: 85 – 111.
- Tagliavini, M., J. Abadía, A. Rombolà, A. Abadía, C. Tsipouridis, and B. Marangoni. 2000. Agronomic means for the control of iron deficiency chlorosis in deciduous fruit trees. *Journal of Plant Nutrition* 23 (11 – 12): 2007 – 2022.
- Tagliavini, M., and A. Rombolà. 2001. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *European Journal of Agronomy* 15 (2): 71 – 92.
- Thompson, L. 1965. El suelo y su fertilidad. 412 p. Ediciones Reverté, Zaragoza, España.
- Thorne, D. 1944. The use of acidifying materials on calcareous soils. *Journal of the American Society of Agronomy*. 36 (10): 815 -828.
- Toselli, M., B. Marangoni, and M. Tagliavini. 2000. Iron content in vegetative and reproductive organs of nectarine trees in calcareous soils during the development of chlorosis. *European Journal of Agronomy* 13 (4): 279 – 286.
- Truog, E. 1948. Lime in relation to availability of plant nutrients. *Soil Science* 65: 1 – 7.
- Vose, P. 1982. Iron nutrition in plants: A world overview. *Journal of Plant Nutrition*, 5 (4 – 7): 233 – 249.
- Wallihan, E., G. Goodall, and T. Embleton. 1968. Iron chlorosis in relation to irrigation practices. *California Avocado Society*. 52: 120 - 124
- Wei, L., R. Loeppert, and W. Ocumpaugh. 1998. Analysis of iron – deficiency induced hydrogen release by plant roots using chemical equilibrium and pH – stat methods. *Journal Of Plant Nutrition* 21(7): 1539 – 1549.
- Zheng, S., Y. He, Y. Arakawa, and Y. Masaoka, C. Tang. 2005. A copper – deficiency – induced root reductase is different from the iron – deficiency – induced one in red clover (*Trifolium pratense* L.). *Plant and Soil* 273: 69 – 76.

## **ANEXOS**

Anexo 1. Disponibilidad de hierro y otros elementos según pH del medio, para suelo mineral (Truog, 1948) y orgánico (Lucas y Davis, 1961).



## Anexo 2. Corrección de la deficiencia de hierro en cítricos.

Nivel foliar	pH del suelo	Tipo de fertilizante	Edad del árbol (años)	Dosis a suelo (g/árbol)	Forma de aplicación <sup>(1)</sup>	Dosis
Bajo	< 6.5	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	< 4	50 – 100	Continua <sup>(2)</sup>	0.02 – 0.05 g/día
			4 – 8	100 – 200		0,05 – 0,1 g/día
			> 8	200 – 500		0,1 – 0,15 g/día
	> 6.5	EDDHA – Fe ó EDDHMA - Fe	< 4	5 – 15	Discontinua <sup>(3)</sup>	0,1 – 0,15 g/día
			4 – 8	15 – 30		3 x 3 g
			> 8	30 – 50		3 x 6 g
Muy bajo	< 6.5	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	< 4	100 – 200	Continua <sup>(2)</sup>	0,05 – 0,1 g/día
			4 – 8	200 – 500		0,1 – 0,2 g/día
			> 8	500 – 1000		0,2 – 0,3 g/día
	> 6.5	EDDHA – Fe ó EDDHMA - Fe	< 4	15 – 30	Discontinua <sup>(3)</sup>	3 x 6 g
			4 – 8	30 – 60		3 x 12 g
			> 8	60 - 100		3 x 18 g

Fuente: Agustí (2003).

(1) Independiente del pH debido al suministro directo y a voluntad.

(2) diaria entre marzo y septiembre en el H.N.

(3) . en tres aplicaciones: primavera, verano y otoño.

### Anexo 3. Calculo teórico de requerimientos de ácido sulfúrico

#### Características del suelo:

- 5% de cal activa
- DA (densidad aparente)=  $1,2 \text{ g/cm}^3 = 1200 \text{ kg/m}^3$
- 30 cm de profundidad
- $PM_{\text{CaCO}_3} = 100 \text{ g mol}^{-1}$
- Molaridad de  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 17 \text{ mol l}^{-1}$

#### Desarrollo:

$$\text{PHA (peso de hectárea arable)} = \text{DA} * \text{área} * \text{profundidad}$$

$$\text{PHA} = 10000 \text{ m}^2 * 0,3 \text{ m} * 1.200 \text{ kg/m}^3 = 3.600.000$$

Si existe un 5% de cal activa, entonces:

$$3.600.000 \text{ kg de suelo} * 0,05 = 180.000 \text{ kg} = 180.000.000 \text{ g de cal activa}$$

$$\text{Mol} = \text{g} \text{ PM}^{-1}$$

Considerando un peso molecular (PM) del  $\text{CaCO}_3 = 100 \text{ g mol}^{-1}$ , entonces habrá 1.800.000 moles de  $\text{CaCO}_3$ . Entonces, al asumir lo descrito por Mendoza (2000), que 1 mol de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) neutraliza 1 mol de  $\text{CaCO}_3$ , se necesitarán 1.800.000 moles de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

$$M (\text{molaridad}) = (\text{n}^\circ \text{ moles de soluto}) / (\text{l de solución})^{-1}$$

Determinando los litros de ácido sulfúrico necesarios gracias a la molaridad de éste, igual a  $17 \text{ mol L}^{-1}$ , de la siguiente forma:

$$1.800.000 \text{ moles de } \text{H}_2\text{SO}_4 : 17 \text{ mol L}^{-1} \text{ de } \text{H}_2\text{SO}_4 = 105 \text{ m}^3 \text{ de } \text{H}_2\text{SO}_4.$$

#### Anexo 4. Calculo de costos

##### Aplicación de ácido con fines neutralizantes

Valor tonelada ácido sulfurico: US\$ 90

US \$ 90 x 524 = \$ 47.182 pesos chilenos la tonelada de ácido sulfúrico.

Densidad de ácido sulfúrico = 1,8 g/cm<sup>3</sup>

1 tonelada = 1.000.000 g

1 m<sup>3</sup> = 1.000.000 cm<sup>3</sup>

Si por Anexo 2 se estimó una necesidad de 105 m<sup>3</sup> de ácido sulfúrico para las condiciones descritas, entonces:

Gramos de ácido sulfúrico requeridos = 1,8 g/ cm<sup>3</sup> x 105.000.000 cm<sup>3</sup> = 189.000.000 g  
= 189 toneladas

189 toneladas de ácido sulfúrico x \$ 47.182 = \$ 8.917.398 pesos chilenos por hectárea sólo en ácido

##### Aplicación de quelatos de hierro directo al suelo

Quelato de hierro (envase de 5 kg) = \$ 36.600 + IVA

100 g/planta x 417 plantas x 3 aplicaciones anuales= 125.100 g ha<sup>-1</sup> al año de quelato de hierro

Aproximados a 126 kg de quelato de hierro, es decir, 26 envases e 5 kg de quelato a comprar:

26 kg x \$ 36.600 = \$ 951.600 + IVA por hectárea