

Diseño de índices espectrales
en el diagnóstico nutrimental de

HUERTAS MANZANERAS

basado en el NDVI: Chihuahua, México

Jesús Pilar Amado Álvarez
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Sonia Miramontes Beltrán

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Ricardo Duarte Jáquez
RECTOR

David Ramírez Perea
SECRETARIO GENERAL

Manuel Loera de la Rosa
SECRETARIO ACADÉMICO

Luis Enrique Gutiérrez Casas
COORDINADOR GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Juan Ignacio Camargo
INSTITUTO DE CIENCIAS SOCIALES Y ADMINISTRACIÓN

Ramón Chavira
DIRECTOR GENERAL DE DIFUSIÓN CULTURAL Y DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Diseño de índices espectrales
en el diagnóstico nutrimental de
HUERTAS
MANZANERAS

basado en el NDVI: Chihuahua, México

Jesús Pilar Amado Álvarez
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Sonia Miramontes Beltrán

PUBLICACIÓN ESPECIAL NÚM. 1

DIVISIÓN MULTIDISCIPLINARIA DE LA UACJ EN CUAUHTÉMOC, CHIHUAHUA
LICENCIATURA EN GEOINFORMÁTICA

D.R. © Jesús Pilar Amado Álvarez, Luis Carlos Alatorre Cejudo,
Sonia Miramontes Beltrán

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Avenida Plutarco Elías Calles #1210, Fovissste Chamizal C.P. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Tel : +52 (656) 688 2100 al 09

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua. Carr. Cuauhtémoc-Anáhuac km 61.5; calle Ejército Nacional núm. 5220, Col. Ejido Cuauhtémoc Anáhuac; C. P. 31600

Diseño de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de huertas manzaneras basado en el NDVI: Chihuahua, México / Jesús Pilar Amado Álvarez, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Sonia Miramontes Beltrán. — Primera edición.-- Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua, 2014.— (Publicación especial ; 1)

114 páginas; 21 centímetros.

ISBN:

El objetivo de esta investigación fue examinar la viabilidad de usar técnicas de teledetección apoyadas en imágenes satelitales, satélite Landsat TM y ETM+, para obtener información en tiempo real durante la fase de menor variación en la concentración de elementos esenciales en las hojas de manzano para el diagnóstico nutrimental.

La meta de este proyecto es el diseño de índices espectrales de manzano, considerando la concentración de los nutrimentos más importantes para establecer una adecuada evaluación de los mismos en tiempo real del árbol por región productora más importante del país: Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Manzano – Nutrición – Chihuahua, México

Nutrición del manzano – Diagnóstico – Imágenes satelitales – Chihuahua, México

Nutrición del manzano – Diagnóstico – Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

LC: SB742 M57 2014

Primera edición, 2014

Impreso en México / *Printed in Mexico*

<http://www2.uacj.mx/publicaciones/>

Apoyado con recursos PIFI

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvo a cargo de la Dirección General de Difusión Cultural y Divulgación Científica, a través de la Subdirección de Publicaciones

Diseño de cubierta y diagramación: Tania Pineda Jerónimo

Contents

Resumen	7
Introducción	11
<i>Situación general de la producción de manzano en los contextos regional y local</i>	11
<i>Diagnóstico nutrimental y técnicas de teledetección</i>	14
<i>Elementos minerales y su interacción con el desarrollo de la planta y productividad</i>	16
Materiales y métodos	25
<i>Fertilización de las huertas de manzano</i>	29
<i>Fechas de muestreo y análisis de los tejidos</i>	35
<i>Obtención y depuración de los datos de teledetección</i>	36
<i>Infraestructura usada en el desarrollo del proyecto</i>	40
Resultados y discusión	67
<i>Características de los parámetros de crecimiento</i>	67
<i>Parámetros de rendimiento</i>	70
<i>Diagnóstico nutrimental y Diseño de índices espectrales de manzano</i>	72

<i>Nitrógeno</i>	72
<i>Fósforo</i>	75
<i>Potasio</i>	77
<i>Calcio</i>	80
<i>Magnesio</i>	83
<i>Fierro</i>	86
<i>Manganeso</i>	89
<i>Cobre</i>	92
<i>Zinc</i>	95
<i>Boro</i>	98

Conclusiones y Recomendaciones	101
---	------------

Agradecimientos	102
------------------------------	------------

Literatura citada.....	103
-------------------------------	------------

Es de gran relevancia obtener la respuesta de las plantas al medio ambiente, a fin de concentrar esfuerzos en la creación de situaciones necesarias para asegurar el crecimiento, desarrollo, así como la elevada producción de la calidad y cantidad de su rendimiento. En las plantas superiores, la mayor parte del material vegetal está constituido por agua, la cual alcanza valores entre 80 y 95%. También requieren de varios elementos minerales como: nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio, magnesio, fierro, boro, manganeso, zinc, cobre, níquel y molibdeno. La cuantificación del contenido de nutrimentos usando mediciones físicas es costosa, porque demanda recursos económicos y personal especializado. El objetivo de esta investigación fue examinar la viabilidad de utilizar técnicas de teledetección (imágenes SPOT 5) apoyadas en imágenes satelitales, para el diagnóstico en tiempo real durante la fase de menor variación en la concentración nutrimental de las hojas de manzano. Se seleccionaron 25 huertas del mencionado frutal, todas en producción, estratégicamente localizadas dentro de los cinco municipios más importantes del estado de Chihuahua, las cuales fueron debidamente caracterizadas. Se tomaron seis muestreos foliares de los crecimientos vegetativos del ciclo 2012 para su análisis correspondiente, de acuerdo a los procedimientos del Laboratorio de Fertilidad del Colegio de Posgraduados (Colpos), determinando la concentración nutrimental de:

nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, fierro, boro, manganeso, zinc y cobre. Los resultados fueron correlacionados mediante técnicas de teledetección con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), a fin de registrar modelos con base en la respuesta espectral del follaje de manzano, lo cual permitió efectuar el diagnóstico nutrimental de la planta en tiempo real, de manera sencilla, rápida, económica y antes de la percepción visual. Se reportaron deficiencias de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y fierro en 88% de las huertas, las cuales fueron correlacionadas adecuadamente mediante ecuaciones lineales y cuadráticas entre la concentración de los elementos en las hojas de manzano con el NDVI. Estos resultados reflejan las condiciones que prevalecen en el campo chihuahuense, principalmente por la tendencia regional de una parte de los fruticultores hacia la producción de manzano de manera orgánica, lo cual implica una baja en la incorporación de fertilizantes químicos al suelo. El uso de las imágenes de satélite en el diagnóstico nutrimental del manzano resultó ser una herramienta factible de ser implementada con grandes ventajas, respecto a la fertilización tradicional de este frutal.

Palabras clave: nutrición del manzano, SPOT 5, índices espectrales, NDVI.

Abstract

It is very important the response of plants to the environment in order that efforts should focus on creating the necessary conditions to ensure growth, development and production of high quality and quantity of performance. In higher plants, most of the vegetal material is water which reaches values between 80 and 95%. They also require various mineral elements such as nitrogen, phosphorus, sulfur, potassium, calcium, magnesium, iron, boron, manganese, zinc, copper, nickel, and molybdenum. Quantification of nutrients

content using physical measurements is expensive because requires financial resources and specialized personnel. The objective of this research was to examine the feasibility of using remote sensing techniques (SPOT 5 images) supported by satellite images, for real-time diagnosis during the phase of less variation in nutrient concentration in the leaves of the apple tree. There were selected 25 apple tree orchards, all in production, strategically located within five of the most important municipalities of the state of Chihuahua which were properly characterized. Six leaf samples about the natural growth cycle of 2012 were taken for its corresponding analysis according to procedures of the Laboratory of Fertility of the Graduate College, determining the nutrients concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron, boron, manganese, zinc and copper. The results were correlated using remote sensing techniques with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to record models based on the spectral response of the foliage of the apple tree which allowed the plant nutrient diagnosis in real time, easily, quickly, inexpensively, and before visual perception. Furthermore were reported deficiencies of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and iron in 88% of the orchards which were adequately correlated by linear and quadratic equations between the elements concentrations in the leaves of the apple tree with NDVI. These results reflect the conditions in the Chihuahuan field mainly by the regional trend of part of the fruit growers to get organically apple tree production which means a decrease in the incorporation of chemical fertilizers to the soil. The use of satellite images in the nutritional diagnosis of the apple tree is a tool that can be implemented with great advantages over traditional fertilization of this fruit.

Keywords: apple tree nutrition, SPOT 5, spectral indexes, NDVI.

Situación general de la producción de manzano en los contextos regional y local

En México, el manzano se produce en 23 estados, en una superficie total de 60 229 ha, destacando Chihuahua con 25 690 ha, seguido de Durango, donde se cosechan 10 397 ha, y Zacatecas con 1300 ha, bajo condiciones de riego con agua que proviene del acuífero, las cuales están sobreexplotadas, a excepción de Canatlán, que cuenta con agua suficiente de excelente calidad. De igual manera, bajo condiciones de temporal se produce en el estado de Puebla, que presenta 8531 ha; e Hidalgo con 1025 ha.

En el estado de Chihuahua, la producción de manzana se establece de la siguiente manera: en Guerrero, 7036 ha; Cuauhtémoc, 6527 ha; Namiquipa, 3733 ha; Bachíniva, 2916 ha; Casas Grandes, 1245 ha; Cusihiuriachi, 1140 ha; y en otros municipios, 3770 ha (INEGI, 2012).

Los suelos de la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, se caracterizan por ser pobres, con bajos contenidos de materia orgánica y deficiencias nutrimentales de nitrógeno, calcio, magnesio, manganeso, cobre, fierro y zinc, principalmente, lo que repercute en una baja producción media (9.85 ton ha⁻¹), a sabiendas de que el potencial de producción

puede llegar a 60 ton ha⁻¹, y donde el principal factor es el nitrógeno y su interrelación con otros agentes minerales.

Los elementos nutritivos ejercen funciones específicas en la vida de las plantas y estas articulaciones pueden ser clasificadas en tres grandes grupos:

- a) Estructural. El elemento forma parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos; por ejemplo, nitrógeno, aminoácidos y proteínas; calcio, pectato (sal de ácido poligalacturónico) de la lámina media de la pared celular; magnesio, que ocupa el centro del núcleo tetrapirrólico de las clorofilas; fósforo, como parte integral de los nucleótidos y ácidos nucleicos;
- b) Constituyente de enzima. Esta función trata de un caso particular del primer grupo, ya que se refiere a elementos, generalmente metales o elementos de transición (como el molibdeno), que forman parte del grupo prostético de enzimas y que son esenciales en las actividades de las mismas. Éste es el caso del cobre, hierro, manganeso, zinc y níquel, que participan como cofactores (activadores) de numerosas reacciones enzimáticas;
- c) Transporte y regulación osmótica. El nutrimento forma enlaces de baja energía (generalmente iónicos) con moléculas orgánicas de bajo peso molecular, para favorecer su movilidad de un órgano a otro. Se almacena en vacuolas para procesos de osmorregulación, como el potasio, que cumple ambas funciones como catión acompañante de carboxilatos (Fageira *et al.*, 1997).

En árboles frutales como el manzano, el momento y la forma de aplicación de la fertilización nitrogenada pueden influenciar tanto el crecimiento como el rendimiento de los cultivos para el año siguiente, y afectar, además, las diferentes formas de almacenamiento y movilización de nitrógeno en el árbol (Neilsen *et al.*, 2006; Cheng, Ma y Ranwala, 2004; Guak *et al.*, 2003; Quartieri, Millard y Tagliavini, 2002).

Durante las aplicaciones realizadas a fines del verano y principios del otoño, el nitrógeno es principalmente transferido a los órganos de almacenamiento, lo cual incrementa las concentraciones de las reservas del mismo. Como consecuencia, para la temporada siguiente habrá mayores niveles de nitrógeno rápidamente disponibles para el crecimiento inicial de las hojas, flores y frutos (Dong *et al.*, 2005; Quartieri, Millard y Tagliavini, 2002; Toselli *et al.*, 2000).

A la inversa, el nitrógeno aplicado a principios de la primavera es aportado preferentemente hacia órganos vegetativos y frutos (Racskó, Szabó y Nyéki, 2005; Weinbaum *et al.*, 1984; Sánchez *et al.*, 1990 b; Toselli *et al.*, 2000; Fallahi *et al.*, 2002; Cheng, Ma y Ranwala, 2004; Dong *et al.*, 2005), lo cual lleva a un mayor sombreado en el área interior de la canopia (Barrit *et al.*, 1991), y a la obtención de frutos con mayores concentraciones de nitrógeno. Esto puede afectar en forma negativa algunos parámetros de calidad como el color, en las manzanas rojas, y la capacidad de almacenamiento (De Angelis, Sánchez y Tognetti (2011); Warg, Merwin y Watkind, 2003; Neilsen *et al.*, 2006; Nava, Dechen y Nachtigall, 2008; Faust, 1989).

Existe una fuerte correlación lineal positiva entre el nitrógeno y la clorofila, la fotosíntesis, la síntesis proteica y el contenido de nitrógeno foliar, como fuera demostrado por diferentes autores (Boussadia *et al.*, 2010; Meziane y Shipley, 2001; Vos, Van Der Putten y Birch, 2005; Evans, 1989). Las concentraciones de proteínas, azúcares, clorofila y nitrógeno total comienzan a disminuir en tejidos foliares cuando el proceso de senescencia comienza (Spencer y Titus, 1972); por lo tanto, es posible esperar que la fertilización nitrogenada durante el periodo de poscosecha afecte, de alguna forma, este proceso.

En regiones donde la temporada de otoño es extensa, como el área de Cuauhtémoc, Chihuahua, México (la principal zona de cultivo de manzanas en el país), los árboles pueden continuar realizando el proceso de la fotosíntesis por un

periodo adicional tras la cosecha de la fruta y pueden, entonces, restablecer sus reservas de carbohidratos, siempre y cuando el contenido de nitrógeno de las hojas sea suficiente como para sostener la fotosíntesis. Por lo tanto, la aplicación de nitrógeno durante el periodo de poscosecha, en vez de hacerlo en primavera, podría permitir una mayor actividad fotosintética, lo cual, a su vez, resultaría en mayores cantidades disponibles de fotosíntesis asimiladas, utilizados en la floración y cuajado del fruto para la siguiente temporada.

La influencia del momento y forma de aplicación de la fertilización nitrogenada en la partición de nutrimentos en especies de árboles frutales de hojas caducas, han sido analizadas en diversos estudios. Sin embargo, existe falta de información acerca de los efectos diferenciales de estas prácticas agrícolas sobre procesos fisiológicos esenciales como la senescencia foliar.

Diagnóstico nutrimental y técnicas de teledetección

El diagnóstico nutricional de cultivos es una herramienta que permite determinar el origen de las anomalías en el estado nutrimental, por medio del análisis y la interpretación de las características morfológicas, físicas y químicas presentes en la plantas. La importancia de su determinación es que es un factor para que los cultivos expresen su potencial en una producción de alto rendimiento y calidad (Jiménez, 2009).

Tradicionalmente, los procedimientos para realizar un diagnóstico nutricional se pueden clasificar en técnicas de campo y laboratorio. Las primeras comprenden tanto diagnóstico visual como pruebas rápidas semicuantitativas, en tanto que las segundas engloban análisis químicos y solución del suelo, tejido vegetal, savia y agua de riego.

El diagnóstico visual presenta una desventaja al identificar desórdenes nutrimentales de forma tardía, es decir, cuando éstos ya afectaron el crecimiento y la producción, lo cual limita su uso. Por otra parte, las pruebas rápidas se-

micuantiativas sólo ofrecen aproximaciones gruesas de las concentraciones de algunos nutrimentos en el tejido vegetal y requieren la compra de equipo especializado y costoso, como medidores ionómetros o de clorofila o equipos portátiles de reactivos, y de material de laboratorio para efectuar las pruebas químicas (Jiménez, 2009).

Por el contrario, las técnicas de laboratorio son precisas y existen para todos los nutrimentos; sin embargo, también tienen las siguientes desventajas:

- i) El tiempo que conlleva el muestreo, traslado, preparación, análisis e interpretación de los resultados;
- ii) Los costos del análisis; y
- iii) La escasez de laboratorios que expidan resultados confiables.

Todas estas técnicas descritas anteriormente poseen sus ventajas y desventajas particulares, lo que hace difícil elegir la que cumpla con los requisitos deseables de precisión, rapidez, reproductividad y bajo costo.

Desde el siglo pasado, se han hecho estudios que se han apoyado en técnicas de sensor remoto, para determinar la interacción del espectro electromagnético con el tejido vegetal. Dichas investigaciones han dado pauta a investigaciones recientes y alentadoras, que relacionan la reflectancia del espectro electromagnético en distintos tipos de cultivo.

Las técnicas de percepción remota proporcionan una plataforma para que las condiciones nutrimentales de las plantas y la respuesta de crecimiento puedan ser evaluadas. Los sensores remotos han sido desarrollados para medir la reflectancia de la luz incidente en diferentes longitudes de onda y se han relacionado con el crecimiento y la cubierta vegetales.

El uso de índices vegetativos ha permitido a los usuarios relacionar las diferencias en la reflectancia de los cambios en las características del dosel (Hatfield, Gitelson y Schepers,

2008). Hay numerosos índices derivados de relaciones basadas en la reflexión de la luz incidente en longitudes de onda específicas.

El NDVI, que combina las señales de reflectancia de la banda del espectro electromagnético del infrarrojo cercano (NIR) y de la roja (RED) ($NDVI = [NIR - RED] / [NIR + RED]$) (Tucker y Sellers, 1986), ha ganado una amplia aceptación con base en su facilidad de uso, que sólo requiere dos longitudes de onda y las características de la planta que se ha correlacionado también. El NDVI se ha utilizado para evaluar el estado de la planta, contenido de nitrógeno y clorofila, biomasa de hojas verdes y rendimiento de grano (Shanahan *et al.*, 2001; Shanahan *et al.*, 2003; Solari *et al.*, 2008).

En general, la información espectral se ha empleado para evaluar el estrés de micronutrientes, la detección de la infestación de insectos y la infección de la enfermedad de las plantas (Pinter *et al.*, 2003), entre otros.

Elementos minerales y su interacción con el desarrollo de la planta y productividad

Nitrógeno

De acuerdo con Salsac *et al.* (1987), las plantas superiores, en general, tienen la capacidad de asimilar las diversas formas de nitrógeno (N) inorgánico, principalmente NH_4 y NO_3 ; sin embargo, estas dos representaciones muestran sólo una pequeña fracción de la cantidad total de N que se encuentra en el planeta. Estas pequeñas cantidades presentes en el suelo —y en la mayoría de los casos de origen orgánico—, no son suficientes para abastecer satisfactoriamente los requerimientos de la cubierta vegetal de la superficie de la tierra.

La verdadera reserva potencial de este elemento en la naturaleza está representada por N_2 molecular de la atmósfera, que según estimaciones (Salsac *et al.*, 1987) es del orden de $4.5 * 10^{15}$ ton, lo que equivale a $\pm 40 * 10^6$ veces la

cantidad presente en el ciclo biológico del N. Sin embargo, y desafortunadamente, las plantas superiores no son capaces de asimilar directamente el N₂ del aire.

El N se encuentra en moléculas tan importantes como las purinas y las pirimidinas de los ácidos nucleicos, esenciales para la síntesis de proteínas; también en porfirinas de las clorofilas y en los citocromos, que son esenciales para que la fotosíntesis y la respiración se lleven a cabo. Trabajos al respecto han sido verificados experimentalmente por Meza y Blackburn, 2003; Gilbert *et al.*, 2002; y Yoshioka *et al.*, 2000.

Fósforo

Las plantas absorben el fósforo (P) en forma de fosfatos inorgánicos, principalmente como aniones H₂PO₄⁻ y HPO₄²⁻; no obstante, la planta puede también, a través de sus enzimas, desprender los grupos fosfatos de los compuestos orgánicos y posteriormente absorberlos. Este elemento, a diferencia del N y el azufre (S), no es reducido en la planta al ser asimilado por ella, sino que es incorporado a los compuestos orgánicos en su mismo estado de oxidación (Ayala y Sandmann, 1988).

El P se localiza, entre muchos otros compuestos, en los fosfolípidos, que son derivados del ácido fosfoglicérico y sus principales representantes (lecitinas y cefalinas), que se encuentran ampliamente distribuidos en las plantas. Este grupo de compuestos presentan en sus moléculas una parte hidrófila y otra lipófila, característica que los capacita para actuar como eslabones entre la estructura lipófila de las células, participando activamente en la formación de las membranas, tanto a nivel mitocondrias y cloroplastos como del plasma lema y otros orgánulos.

Otro importante éster fosfórico se encuentra en los ácidos nucleicos. Entre dichos nucleótidos es particularmente importante el ácido adenílico monofosfato (adenosina monofosfato) (AMP), sustancia origen de la adenosina difosfato (ADP) y de la adenosina trifosfato (ATP), las cuales a su vez son

precursoras de las coenzimas nicotinamida adenina dinucleótido (NAD) y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP).

El P también se presenta en otros compuestos “ricos en energía” como: guanina trifosfato (GTP), uridina trifosfato (UTP) y citosina trifosfato (CTP), los cuales funcionan como eslabones comunes uniendo procesos endergónicos a procesos exergónicos (intercambio de energía). Principalmente la estructura del pirofosfato, con su unión de alta energía, determina el carácter y con ello, la cantidad de fuerza de estos compuestos.

La fotosíntesis, la glicólisis, el ciclo de Krebs, la b-oxidación, la oxidación directa de la glucosa y la descomposición de los carbohidratos (reacciones de carga) son procesos que involucran reacciones de fosforilación. El P se encuentra, además, como constituyente de nucleoproteínas, y participa también en la división celular y en la transferencia de las características hereditarias a través de los cromosomas como constituyente del ácido desoxirribonucleico (ADN) y del ácido ribonucleico (ARN).

Las coenzimas más importantes que contienen P son: la NAD, la NADP, el flavín mononucleótido (FMN) y el flavín adenina dinucleótido (FAD), indispensables en numerosas reacciones *redox* (Belikov y Dmitrieva, 1984).

Potasio

El potasio (K^+) representa al catión que es absorbido en mayor cantidad por las plantas, por lo que en la mayoría de los vegetales el contenido de este elemento sobrepasa considerablemente a los otros cationes alcalinos y alcalinotérreos. Entre los diversos tipos de vegetales, las gramíneas, principalmente, son conocidas como acumuladoras de K^+ .

Este nutrimento es tomado por la raíz de las plantas como ión metálico de la solución del suelo o directamente del complejo de adsorción de los coloides del suelo (Hickman, 1969).

A pesar de la gran importancia de este elemento en la nutrición vegetal, no es del todo claro cómo este elemento se encuentra unido. En el caso de estar combinado con las principales biomoléculas, una parte considerable del K^+ total en la planta se presenta como ión libre a nivel de vacuolas y citoplasma, el cual en conjunto con los demás productos en solución genera una presión osmótica, lo que propicia que el agua de los vasos del xilema, debido al gradiente osmótico, penetre en la célula y origine así turgencia en ella, siendo ésta una de las principales funciones del K^+ en la planta.

La importancia de este nutrimento en la producción agrícola, ha sido reconocida solamente desde principios del siglo XIX, aun cuando los beneficios producidos por las materias orgánicas o inorgánicas que lo contienen fueron registrados muchos años antes. Como elemento esencial para el crecimiento de las plantas, el K^+ presenta un serio problema para establecer un rol, ya que normalmente se registra en forma de sales solubles orgánicas e inorgánicas (Lawton y Cook, 1984).

Es de particular interés que tanto la fosforilación fotosintética como la oxidativa (en respiración) requieren de K^+ para realizarse (Wu, Peters y Berkowitz, 1991). Lo anterior, es un ejemplo de cómo un mismo proceso es favorecido por este nutrimento en dos estructuras diferentes: cloroplastos y mitocondrias.

El K^+ promueve una eficiente traslocación de fotosintatos desde las hojas y por otro lado, la fotosíntesis disminuye cuando los asimilados se acumulan en las hojas, por lo que una rápida exportación de fotosintatos, unidos al potasio, podría ser importante para mantener una alta tasa de fotosíntesis neta en las hojas (Kilmer *et al.*, 1968).

De acuerdo con Pier y Berkowis (1987), una disminución rápida de la presión de *turgor* en las plantas abastecidas deficientemente con K^+ , influye negativamente en el metabolismo general de las mismas y con ello, el rendimiento del cultivo. Aunque este nutrimento no es el único ión res-

ponsable de la presión osmótica en la célula, este elemento contribuye de manera significativa.

Además de su participación como regulador de la presión osmótica, el K^+ desempeña numerosas funciones en la planta; por ejemplo, existen evidencias de que se acumula en la superficie de los cloroplastos y que durante el proceso de la fotosíntesis penetra en ellos.

Calcio

El calcio (Ca^{2+}) se puede presentar en las plantas como ión libre o en forma absorbida, aunque además se conocen varias sales de este elemento, las cuales se encuentran en la vacuola o como incrustaciones en la pared celular.

En general, las necesidades de este nutrimento son bajas en comparación con el K^+ , donde la concentración varía en un intervalo de 0.1-1.2 μM de Ca^{2+} libre (Marschner, 2002).

En contraste con el K^+ , el Ca^{2+} desempeña sobre todo funciones estructurales, lo cual es especialmente cierto durante la reproducción celular. Así, el pectato de Ca^{2+} debe ser considerado en esta forma, ya que es un elemento formativo de la lamela media, estructura sobre la cual se construye la propia pared celular.

Se admite también que el Ca^{2+} es importante en la formación de membranas celulares y estructuras lipídicas; por ejemplo, la sal cálcica de fosfolípidos lecitina puede intervenir en la formación u organización de las membranas celulares.

Además, este nutrimento es requerido por el mecanismo selectivo de absorción del plasma lema, ya que aparentemente mantiene la integridad de la membrana (Hewitt, 1983). Se ha reportado que son necesarias pequeñas cantidades de este elemento para que la mitosis se realice.

A diferencia de otros cationes, se conocen muy pocas enzimas que sean activadas por el Ca^{2+} y éste puede ser reemplazado en su acción por otros cationes divalentes, principalmente el Mg^{2+} y el Mn^{2+} . Recientemente, este nutrimento

ha atraído un gran interés por su función como segundo mensajero en la conducción de señales entre factores del ambiente y la respuesta de la planta en términos de crecimiento y desarrollo. En esta función, este elemento se une a la calmodulina, proteína que se localiza en el citosol de las células vegetales (Hanson, 1984).

El Ca^{2+} puede participar notablemente en el equilibrio electrostático de la célula, debido a la alta cantidad que normalmente se encuentra en las vacuolas, donde contribuye al balance aniones-cationes, actuando como ión acompañante de aniones orgánicos e inorgánicos.

Como nutrimento indispensable, al igual que el K^+ , el Ca^{2+} tiene funciones fisiológicas que van más allá de simples procesos de hidratación y deshidratación. Cabe resaltar la tendencia del ión Ca^{2+} a formar compuestos quelatados; por ejemplo, el incremento en la elasticidad de las paredes celulares favorecido por este elemento, se debe a que éste forma un complejo quelatado muy estable unido a los pectatos de la lamela media (Marschner, 2002).

Además, la elongación y la multiplicación celular en los tejidos meristemáticos son activadas por este nutrimento. Cuando se suspende su suministro, en unas cuantas horas se detiene el crecimiento de la raíz (Marschner y Richter, 1973).

En general, el Ca^{2+} ejerce una acción favorable sobre el crecimiento radical y es necesario para la germinación y el crecimiento de los tubos polínicos.

Magnesio

En general, el magnesio (Mg^{2+}) es absorbido y acumulado por las plantas en cantidades menores que el Ca^{2+} o el K^+ y similares al P y S. En los vegetales, este nutrimento forma principalmente enlaces de tipo iónico, aunque también tiene un papel importante como elemento puente formando complejos de diferentes estabilidades. Las sales del Mg^{2+} participan de forma significativa en la regulación del pH celular y del balance anión-catión.

Sin duda, su función principal como elemento constituido de la clorofila es la más importante. La biosíntesis de la clorofila requiere de la inserción de Mg^{2+} en la estructura de la porfirina para formar la Mg-protoporfirina, reacción que es, además, catalizada por la enzima Mg-quelatasas (Walker y Weinstein, 1991).

El Mg^{2+} es un cofactor de acercamiento de todas las enzimas que actúan sobre sustratos fosforilados (cinasas), favoreciendo el acoplamiento de tipo quelatante (enlaces coordinativos) entre la estructura pirofosfatada y la enzima o bien, el sustrato y es, por lo tanto, de gran importancia en el metabolismo energético (fotosíntesis, glicólisis, ciclo de Krebs).

Con frecuencia, el Mg^{2+} puede ser sustituido por el manganeso, aunque la eficiencia de este último respecto a las fosfoquinasas (enzimas que transfieren grupos fosfatos con elevado intercambio de energía) no es tan grande como la del Mg^{2+} (Hewitt, 1983).

Fierro

La tendencia del fierro (Fe) a formar complejos quelatados y su capacidad para cambiar de valencia, son características importantes en las que radican sus numerosas funciones fisiológicas. Este nutrimento es absorbido por la planta como Fe^{3+} o Fe^{2+} , pero también puede serlo como quelato. Es posible que la misma planta forme sus propias sustancias quelatantes, las cuales atrapan los iones de este elemento y los transportan al interior.

Como moléculas transportadoras de Fe^{2+} han sido identificadas: ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y flavonas. Únicamente una pequeña parte del Fe total en la planta es soluble en agua, mientras que del 80 al 90% se encuentra unido fuertemente a estructuras orgánicas.

El Fe se presenta en numerosos grupos prostéticos en forma de hemina o de hematina. Los citocromos, la citocromo oxidasa, la peroxidasa y la catalasa son algunos ejemplos de proteínas que lo contienen. Su funcionamiento se

basa en el cambio de valencia de este elemento, por lo que está capacitado para ganar y entregar electrones en reacciones *redox* (Moog y Bruggemann, 1994).

Manganeso

El manganeso (Mn) se puede presentar en las plantas en diversos estados de oxidación, pero, sin duda, la forma predominante es como Mn^{2+} . De manera semejante al Mg, también este nutrimento es capaz de activar numerosas enzimas. El mecanismo de acción de ambos es similar en las reacciones de fosforilación, ya que establecen un puente entre el pirofosfato y el sustrato o con la enzima.

El Mn tiene una función muy importante en los procesos *redox*. A pesar de que numerosas enzimas (alrededor de 35) son activadas por este elemento, hasta ahora solamente se han reportado dos enzimas que lo poseen como constituyente: Mn proteína del fotosistema II (PS II) y peróxido dismutasa (Mn-SOD).

Muchas de las enzimas activadas por este nutrimento catalizan reacciones de oxidación-reducción, descarboxilación y rompimientos hidrolíticos. El Mn tiene un papel central en el ciclo de los ácidos tricarbónicos (TCA) y en las reacciones de descarboxilación oxidativas o no oxidativas (Burnell, 1988).

Cobre

El cobre (Cu^{2+}) es absorbido por las plantas en cantidades muy pequeñas. Es un elemento metálico que, como el Fe, forma complejos muy estables y fácilmente acepta y transfiere electrones.

En la célula, este nutrimento se encuentra principalmente en forma divalente, ya que como ión monovalente es muy inestable. Los contenidos de Cu^{2+} del material vegetal son, en general, de 5 a 20 $\mu g g^{-1}$ de materia seca, aproximadamente 10 veces menos que los del Mn^{2+} .

La principal función de este elemento en los vegetales es asociada con enzimas de la clase oxidoreductasa. En

la oxidación terminal de la célula vegetal, enzimas con Cu^{2+} (metal-proteínas) son las que reaccionan directamente con el oxígeno molecular (Marschner, 2002).

En los cloroplastos se encuentra cerca de 70% del Cu^{2+} total. A diferencia de otros cationes, la mayor parte de este nutrimento (más de 90%) se localiza en las células en forma de complejos, por lo que la concentración de Cu^{2+} libre generalmente es muy baja. Lo anterior, se explica por su alta afinidad con grupos peptídicos, sulfhidrilos, fenoles y carboxilos (Graham, 1979).

La plastocianina es un componente central de la cadena transportadora de electrones del fotosistema y unido a ella, se encuentra más de 50% del Cu^{2+} total que se localiza en los cloroplastos. Esta proteína contiene un átomo de Cu^{2+} por molécula y, generalmente, en los cloroplastos se encuentran de 3 a 4 moléculas de plastocianina por cada 1000 moléculas de clorofila (Sandmann y Boguer, 1983).

Zinc

El zinc (Zn^{2+}) es absorbido en cantidades muy pequeñas por las plantas, principalmente en forma de catión divalente. Su función metabólica se basa en su tendencia a formar complejos tetraédricos de oxidorreducción; más bien, se basa en su tendencia a formar complejos tetraédricos con el N, oxígeno (O) y S, por lo que su papel en las reacciones enzimáticas es tanto funcional (catalítico) como estructural (Valee y Auld, 1990).

Estos autores también señalan que en las Zn-enzimas, el Zn^{2+} tiene tres funciones: a) Catalítica, b) Cocalitica (coactiva) y c) Estructural. Algunos ejemplos de estas Zn-enzimas son: la anhidrasa carbónica y la carboxipeptidasa (Coleman, 1992).

Boro

Según Salisbury y Ross (1994), el boro (B) es absorbido por las plantas casi en su totalidad como: H_3BO_3 o $\text{B}[\text{OH}]_3$, sin disociar a pH cercano a 7. A valores de pH mayores, el H_3BO_3

acepta iones hidroxilos del agua y forma un anión borato tetraédrico.

En su función fisiológica, el B se diferencia de los micronutrientes en que no dirige, como el Cu, Mn o Zn, la unión por quelatación de enzimas, y sustrato, y no puede, como el Fe, Mn o molibdeno (Mo), mediante un cambio de valencia, inducir un proceso; más bien, el ión borato se asemeja en su mecanismo de acción al del ión fosfato, ya que es capaz de formar con los grupos hidroxilos (OH⁻), principalmente de los azúcares, ésteres de ácido bórico.

Posiblemente una fracción considerable del ácido bórico, se une para formar complejos de borato cis-diol con grupos hidroxilo cercanos, provenientes de la manosa y con algunos otros azúcares de los polisacáridos de la pared celular.

Objetivos y metas

El objetivo de esta investigación fue examinar la viabilidad de usar técnicas de teledetección apoyadas en imágenes satelitales, SPOT-5, para obtener información en tiempo real durante la fase de menor variación en la concentración de elementos esenciales en las hojas de manzano para el diagnóstico nutricional.

La meta de este proyecto es el diseño de índices espectrales de manzano, considerando la concentración de los nutrientes más importantes para establecer una adecuada evaluación de los mismos en tiempo real del árbol por región productora más importante del país.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región manzanera de Cuauhtémoc, Chihuahua, México, la cual se encuentra entre las coordenadas 28°13'19" y 28°59'35" de latitud norte, así

como los meridianos 106°34'39" y 107°10'33" de longitud oeste (figura 1), con un área total de 2035 km².

Según la Comisión Nacional del Agua (CNA) (2010), el lugar presenta una precipitación media anual de 415.7 mm, con clima semiseco templado y una temperatura media anual de 14.6° C a lo largo del año. En general, se caracteriza por tener una planicie cerrada de forma irregular por las sierras de Pedernales, San Juan, Salitrera, Chuchupate, Sierra Azul y Rebote, por lo cual la única aportación de agua es la que proviene de la lluvia.

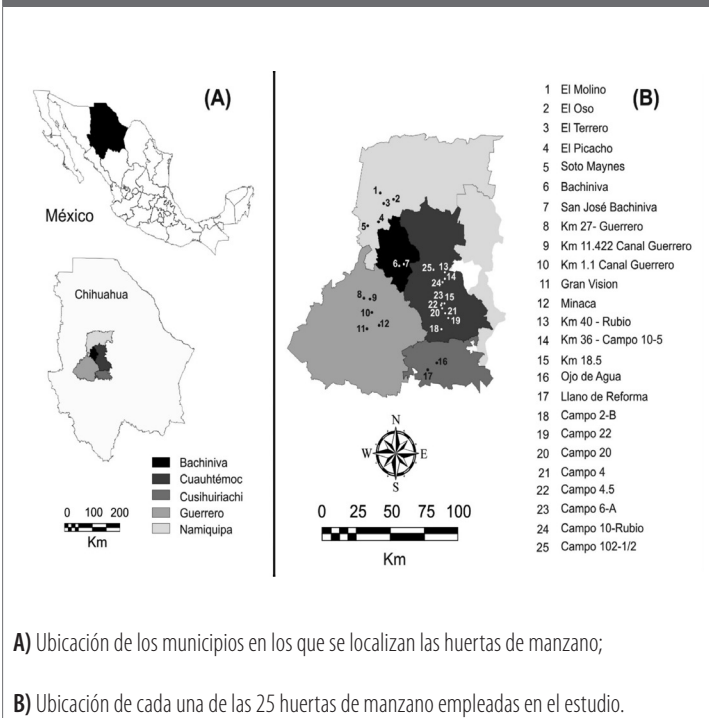
A lo largo de esta superficie, la dinámica existente ha provocado que se afecte considerablemente la explotación de los recursos hídricos. Más específicamente, se extraen anualmente 569.4 Hm³ repartidos en 92.7% para utilización agrícola, 4% para uso público urbano, mientras que 3.3% se emplea en actividades pecuarias. Estas acciones han llevado considerablemente a la sobreexplotación del acuífero, ya que en comparación con la recarga natural anual de 115 Hm³, es más recurso el retirado que el devuelto (CNA, 2010).

Durante los ciclos 2012-2013, se seleccionaron, caracterizaron y estudiaron 25 huertas de manzano. En el cuadro 1, se muestran las principales características de las huertas citadas. La distribución espacial de las 25 huertas estudiadas, se muestra en la figura 1, donde se puede apreciar que se consideraron los cinco municipios más importantes para la producción de manzano en el estado de Chihuahua.

Cabe mencionar que los criterios para la selección de las 25 huertas de manzano consideraron tres aspectos básicos:

- i) La importancia de la superficie plantada con árboles de manzano por cada municipio en el estado de Chihuahua;
- ii) La presencia de un amplio gradiente en la concentración nutrimental, que va desde alto, mediano y bajo en las hojas de manzano; y, finalmente
- iii) El presupuesto para las campañas de campo, la recolección de hojas y el análisis nutrimental en el laboratorio.

Figura 1. Localización general del área de estudio:



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Cuadro 1. Características generales de las huertas estudiadas en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la uacj en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Variedad	Años de plantación	Distancia de plantación (m)
Características generales					
Namiquipa					
1	El Molino	Gravedad	Golden D.	20	M. R. 3.3 * 4.0
2	El Oso	Microaspersión	Golden D.	15	T. B. 5.1 * 4.1
3	El Terrero	Microaspersión	Golden D.	20	T. B. 5.6 * 4.9
4	El Picacho	Microaspersión	Golden D.	25	T. B. 5.1 * 6.0
5	Soto Máynez	Gravedad	Golden D.	18	T. B. 4.3 * 2.3
Bachíniva					
6	Bachíniva	Gravedad	Golden D.	25	M. R. 4.0 * 3.7
7	San José Bachíniva	Gravedad	Golden D.	26	M. R. 6.3 * 4.5
Guerrero					
8	km 27 Carr. M.	Microaspersión	Red Delicious	15	T. B. 5.0 * 5.0
9	km 11.4 Can.	Microaspersión	Golden D.	25	C. N. 4.4 * 2.6
10	km 1.1 Can.	Gravedad	Golden D.	25	M. R. 4.0 * 4.0
11	Gran Visión	Microaspersión	Golden D.	30	T. B. 5.0 * 4.4
12	Miñaca	Microaspersión	Golden D.	20	T. B. 5.0 * 4.5
Cuauhtémoc					
13	Rubio (km 40)	Gravedad	Golden D.	20	T. B. 4.7 * 6.0
14	Campo 10-A	Gravedad	Golden D.	15	M. R. 2.2 * 4.3
15	km 18.5 Rubio	Microaspersión	Golden D./R. D.	10	M. R. 1.5 * 4.3

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Variedad	Años de plantación	Distancia de plantación (m)
Características generales					
Cusihuirachi					
16	Ojo de Agua Llanos de	Microaspersión	Golden D./R. D.	20	M. R. 5.5 * 5.5
17	Reforma	Gravedad	Golden D./R. D.	20	M. R. 2.5 * 3.1
Cuauhtémoc					
18	Campo 2-B	Microaspersión	Red Delicious	15	M. R. 2.9 * 4.7
19	Campo 22	Microaspersión	Golden D.	10	T. B. 5.2 * 3.7
20	Campo 20	Microaspersión	Golden D.	12	T. B. 4.4 * 2.4
21	Campo 4	Microaspersión	Golden D.	20	T. B. 5.0 * 6.2
22	Campo 4 ½	Gravedad	Golden D./R. D.	25	T. B. 5.3 * 5.9
23	Campo 6-A	Microaspersión	Golden D.	6	M. R. 4.6 * 3.0
24	Campo 10	Gravedad	Red Delicious	8	T. B. 4.6 * 3.1
25	Campo 102 ½	Gravedad	Golden D.	30	M. R. 6.1 * 6.1

Interpretación: Golden D. = Golden Delicious; R. D. = Red Delicious; M. R. = Marco real; T. B. = Tresbolillo;

C. N. = Curvas a nivel.

Fuente: Amado 2013.

Fertilización de las huertas de manzano

La nutrición del manzano es muy diferente en todas las huertas, debido a una gran cantidad de factores: fertilidad natural de los suelos, cultura y educación del productor, enfoque entre la fertilización orgánica y química. Sólo 40% de los productores consideraron aspectos técnicos para la nutrición de las huertas estudiadas. En el cuadro 2, se puede apreciar la gran variación que se presenta en la alimentación de este frutal para la sierra de Chihuahua.

Cuadro 2. Épocas, tiempos de aplicación y dosis de fertilizantes en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la uacj en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Época de aplicación	Tiempo de aplicación	Dosis de fertilización
Namiquipa					
1	El Molino	Gravedad	Prebrotación (marzo) Aplicaciones foliares durante mayo y junio, espaciadas cada 15 días	1 t día ⁻¹	* 5 t ha ⁻¹ de estiércol bobino + 5 aplicaciones de Bayfolan Forte al follaje (1 L del fertilizante químico por 1000 L de agua para 1 ha)
2	El Oso	Microaspersión	No aplicó	-	-
3	El Terrero	Microaspersión	No aplicó	-	-
4	El Picacho	Microaspersión	No aplicó	-	-
5	Soto Máynez	Gravedad	Diferenciación floral (junio)	5 ha día ⁻¹	* 202 kg ha ⁻¹ de fosfato diamónico
Bachíniva					
6	Bachíniva	Gravedad	No aplicó	-	-
7	San José Bachíniva	Gravedad	No aplicó	-	-
Guerrero					
8	km 27 Carr. M.	Microaspersión	Prebrotación (febrero-marzo)	12 h de riego + ½ h de fertirrigación	404 kg ha ⁻¹ de fosfato diamónico + 100 kg ha ⁻¹ de urea
9	km 11.4 Can.	Microaspersión	Tres eventos (marzo, mayo y junio)	18.5 h de riego + 0.5 h de fertirrigación	560 kg ha ⁻¹ , de una mezcla de 262 kg ha ⁻¹ de sulfato de amonio + 87 kg ha ⁻¹ de sulfato de K + 176 kg ha ⁻¹ de fosfato monoamónico + 35 kg ha ⁻¹ de Humiplex

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Época de aplicación	Tiempo de aplicación	Dosis de fertilización
Guerrero					
10	km 1.1 Can.	Gravedad	No aplicó	-	-
11	Gran Visión	Microaspersión	Prebrotación (febrero-marzo)	6 ha día ⁻¹	150 kg ha ⁻¹ de fosfato diamónico + 100 kg ha ⁻¹ de urea
12	Miñaca	Microaspersión	Diferenciación floral (mayo-junio)	10 ha día ⁻¹	* 888 kg ha ⁻¹ , de una mezcla de 274 kg ha ⁻¹ de urea + 274 kg ha ⁻¹ de fosfato monoamónico + 274 kg ha ⁻¹ de sulfato de K + 66 kg ha ⁻¹ de Granubor
Cauhtémoc					
13	Rubio (km 40)	Gravedad	No aplicó	-	-
14	Campo 10-A	Gravedad	No aplicó	-	-
15	km 18.5 Rubio	Microaspersión	Floración (abril)	2 h de fertirrigación	800 L de UAW-28, en un caudal de 36 L por segundo (100 L ha ⁻¹) + una mezcla de 1 ml de metalosato de Zn multimineral + 1 ml de Zn plus + 1 ml de cobre por 1 L de agua asperjado al follaje (1 L de fertilizantes químicos por 1000 L de agua para 1 ha)
Cusihuirachi					
16	Ojo de Agua	Microaspersión	No aplicó	-	-
17	Llanos de Reforma	Gravedad	Prebrotación (febrero-marzo)	1 t día ⁻¹	* 10 t ha ⁻¹ de estiércol bobino

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Época de aplicación	Tiempo de aplicación	Dosis de fertilización
Cuauhtémoc					
18	Campo 2-B	Microaspersión	Una en floración (abril); segunda en poscosecha (30 de agosto)	4 h de riego + 1 h de fertirriego + 5 h de riego	80 kg ha ⁻¹ de UAN-32 + 8 aspersiones foliares con fertilizantes base de nitrato de Ca y fertilizante quelatado de Mg, Fe, Zn, Mn, Cu y B (1.9 L ha ⁻¹)
19	Campo 22	Microaspersión	Desarrollo del fruto (mayo-julio)	10 h de riego + 2 h de fertirrigación	480 unidades ha ⁻¹ , de una mezcla de 80 kg ha ⁻¹ + 150 kg ha ⁻¹ de nitrato de Ca + 100 kg ha ⁻¹ de urea de lenta liberación + 10 kg ha ⁻¹ de ultraazufre + 15 kg ha ⁻¹ de Solubor + 50 kg ha ⁻¹ de sulfato de Mg + 10 kg ha ⁻¹ de sulfato de Cu + 20 kg ha ⁻¹ de sulfato de Zn + 26 kg ha ⁻¹ de Promesol de Ca + 20 L ha ⁻¹ de melaza
20	Campo 20	Microaspersión	Crecimiento del fruto (mayo-junio)	36 h de riego + 0.5 h de fertirrigación	51.5 unidades ha ⁻¹ , de una mezcla de 47 L ha ⁻¹ de Fertiagro + 3 kg ha ⁻¹ de Kelatex multinutricional + 1.5 kg ha ⁻¹ de Solubor + 3 L ha ⁻¹ de Bayfolan Forte al follaje + 4.7 kg ha ⁻¹ de Nutricel al follaje

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Época de aplicación	Tiempo de aplicación	Dosis de fertilización
Cauhtémoc					
21	Campo 4	Microaspersión	Prebrotación (marzo)	1 ha día ⁻¹	* 626 kg ha ⁻¹ , de una mezcla de 100 kg ha ⁻¹ de nitrato de amonio + 130 kg ha ⁻¹ de sulfato de amonio + 126 kg ha ⁻¹ de nitrato de Ca + 94 kg ha ⁻¹ de fosfato diamónico + 82 kg ha ⁻¹ de sulfato de K + 30 kg ha ⁻¹ de sulfato de Fe + 40 kg ha ⁻¹ de sulfato de Zn + 10 kg ha ⁻¹ de sulfato de Mg + 15 kg de Granubor
22	Campo 4 ½	Gravedad	No aplicó	-	-
23	Campo 6-A	Microaspersión	En floración (abril)	Al voleo, en 4 h	* 1328 kg ha ⁻¹ , de una mezcla de 290 kg ha ⁻¹ de fosfato monoamónico + 95 kg ha ⁻¹ de Solubor + 150 kg ha ⁻¹ de sulfato de amonio + 240 kg ha ⁻¹ de fosfonitrato + 47 kg ha ⁻¹ de sulfato de Zn + 45 kg ha ⁻¹ de Nutrisol + 71 kg ha ⁻¹ de Promesol + 150 kg ha ⁻¹ de sulfato de Fe + 240 kg ha ⁻¹ de nitrato de Ca

Núm. de huerta	Localidad	Sistema de riego	Época de aplicación	Tiempo de aplicación	Dosis de fertilización
Cuahtémoc					
24	Campo 10	Gravedad	Brotación (marzo)	2 ha día ⁻¹	* 370 kg ha ⁻¹ , de una mezcla de 150 kg ha ⁻¹ de urea + 75 kg ha ⁻¹ de superfosfato triple de Ca + 75 kg ha ⁻¹ de nitrato de Ca + 50 kg ha ⁻¹ de nitrato de K + 10 kg ha ⁻¹ de sulfato de Zn + 10 kg ha ⁻¹ de sulfato de Mg
25	Campo 102 ½	Gravedad	Floración (abril)	4 ha día ⁻¹	* 400 kg ha ⁻¹ de nitrato de amonio + 150 kg ha ⁻¹ de nitrato de Ca

* La aplicación de los nutrimentos se hizo directamente al suelo, sin utilizar el sistema de riego.

Fuente: Amado 2013.

De acuerdo a lo observado en el cuadro 2, los fruticultores hacen las aplicaciones de los nutrimentos de manera muy heterogénea, aplicando desde fertilizantes orgánicos, como el estiércol bovino, y diferentes fertilizantes químicos en fechas y cantidades muy distantes de lo recomendado por Peters (1994) (cuadro 3).

Cuadro 3. Guía de aplicación por épocas durante el año y dosis de nutrimentos para obtener un rendimiento potencial de hasta 60 t ha⁻¹ con fertirrigación (Peters, 1994).

<i>Tiempo</i>	<i>Elementos nutritivos (kg ha⁻¹)</i>							
Febrero								
		P		Ca				
Marzo		P		Ca	Mg			
Abril	N			Ca	Mg			Cu, Fe, Mn y Zn
Mayo	N			Ca	Mg	B		Cu, Fe, Mn y Zn
Junio	N		K	Ca	Mg	B		Cu, Fe, Mn y Zn
Julio	N		K				Mo	Cu, Fe, Mn y Zn
Agosto	N		K				Mo	Cu, Fe, Mn y Zn
<i>Total</i>	90	25	150	80	45	15	8	5

Fuente: Peters 1994.

Fechas de muestreo y análisis de los tejidos

Para descartar la alta variación de los valores de la concentración de los elementos esenciales en las hojas de manzano presentes en el periodo de crecimiento vegetativo, se decidió tomar las muestras de las hojas durante el lapso de mínima variación de la concentración nutrimental.

Se realizaron seis campañas de campo para tomar las muestras de las hojas durante el ciclo 2012, de la sección media de los dardos vegetativos en árboles seleccionados al azar (a una altura entre 1 y 2 metros) cada 15 días durante las tres temporadas, desde fines de mayo hasta mediados de agosto.

Para estudiar la defoliación natural, se marcaron cinco brotes por árbol y se registró el número de hojas cada quince

días, de acuerdo con la metodología de Yuri (2002). La determinación de las concentraciones totales de los elementos (N, P, K, Ca, Mg, Fe, B, Mn, Zn y Cu), se llevó a cabo en el Colegio de Posgraduados, de acuerdo a la metodología propuesta por Etchevers *et al.* (1992).

Obtención y depuración de los datos de teledetección

Una de las limitaciones que las imágenes de satélite plantean, es que se encuentran afectadas por una serie de perturbaciones radiométricas: la iluminación solar y las condiciones atmosféricas, las cuales dificultan su utilización.

Este tipo de problemas se solucionaron en las imágenes de baja resolución espacial y alta frecuencia temporal (por ejemplo, NOAA-AVHRR) mediante la creación de compuestos multitemporales y filtrados (Gutman *et al.*, 1995).

En el caso de imágenes de alta resolución espacial, como las Landsat y SPOT, en las que la frecuencia temporal es baja, resulta necesario llevar a cabo procedimientos de corrección más complejos.

En este trabajo, se emplearon imágenes del satélite SPOT 5, las cuales fueron proporcionadas por el Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo, coordinador de la Licenciatura en Geoinformática, quien es gestor ante la Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena) de imágenes SPOT 5. Las características de los modelos empleadas, se muestran en el cuadro 4.

Este tipo de imágenes es uno de los programas de teledetección más novedoso, frente al estándar marcado por el programa Landsat: el proyecto SPOT (Système pour l'Observation de la Terre). Una de las principales ventajas es la resolución espacial, lo cual hace que las imágenes SPOT sean idóneas para realizar tareas de análisis visual.

Cuadro 4. Características principales de las imágenes spot 5 utilizadas.

<i>Banda</i>	<i>Amplitud de la banda (μm)</i>	<i>Región espectral</i>	<i>Resolución espacial</i>
SPOT-B1	0,50-0,59	Verde	10
SPOT-B2	0,61-0,68	Roja	10
SPOT-B3	0,78-0,89	Infrarroja cercana	10
SPOT-B4	1,58-1,75	Infrarroja media	20

Fuente: Amado 2013.

Cada una de las imágenes empleadas, se corrigieron geoméricamente mediante puntos de control y el algoritmo desarrollado por Pala y Pons (1996), implementado en el *software* MiraMon, en el que se tiene en cuenta la distorsión topográfica mediante la incorporación de un modelo digital del terreno (MDT).

El efecto atmosférico sobre la señal electromagnética se corrigió mediante el modelo de transferencia radiativa 6S (Vermote *et al.*, 1997). Posteriormente, se eliminó el efecto que introducen las condiciones de iluminación para compensar las diferencias causadas por la irregularidad del terreno, para lo cual se utilizó un modelo de reflectividad anisotrópico o no lambertiano, ya que ofrece una mayor robustez que los modelos lambertianos (Riaño *et al.*, 2003).

Finalmente, a partir de las imágenes corregidas atmosférica y topográficamente, y normalizadas, se procedió a localizar las huertas de manzano seleccionadas para el presente estudio (figura 1), de donde se extrajo la información espectral en cada una de las bandas de espectro electromagnético (SPOT-B1, SPOT-B2 y SPOT-B3), así como los valores medios del NDVI, cuyo proceso de la derivación se describe a continuación.

Valores del NDVI en cada una de las huertas de manzano

Los valores del NDVI se obtuvieron a partir de las imágenes SPOT 5, con el propósito de monitorizar la actividad vegetal. El NDVI fue calculado (Rouse et al., 1974) como:

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R}$$

Ecuación 1

Donde ρ_{IR} es la reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y ρ_R , es la reflectividad en la región del rojo (visible).

El NDVI es una medida de la capacidad fotosintética de las plantas (Ruimy, Sangier y Dediu, 1994) y la resistencia estomática con respecto a la transferencia de vapor de agua (Tucker y Sellers, 1986); por lo tanto, altos valores del NDVI son indicativos de la actividad de la vegetación secundaria.

Análisis estadístico

Para la determinación del modelo predictivo de las concentraciones de los elementos nutrimentales en hojas de manzano, se utilizaron como variables predictivas los valores medios de reflectividad en las bandas SPOT-B1, SPOT-B2 y SPOT-B3, así como los valores medios del NDVI en cada una de las huertas del frutal seleccionado.

Esta información correspondió a la media de los valores de contenidos dentro de cada una de las huertas, es decir, se seleccionaron todos los píxeles incluidos dentro del polígono que delimita cada huerta en cada una de las imágenes del satélite SPOT.

Para determinar las relaciones estadísticamente significativas entre los valores de concentración de los elementos

nutrimentales registrados *in situ* y la información espectral de cada una de las bandas y el NDVI, se aplicó un modelo de regresión lineal, a fin de medir la magnitud de la relación y su significancia estadística.

Posteriormente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, usado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), donde se mide el grado de covarianza entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos “variables relacionadas linealmente”. Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas pero no de forma lineal, en cuyo caso no procede la aplicación de la correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Digamos, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tenemos dos variables, x e y , y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como: r_{xy} , entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1.$$

Ecuación 2

Se han especificado los términos “valores absolutos”, ya que en realidad se contempla que el signo del coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y +1. No obstante, ha de indicarse que la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de +1 como de -1.

En el primer caso, la relación es perfecta positiva y en el segundo, perfecta negativa. Cabe mencionar que en la sección de resultados no hacemos referencia al análisis estadístico sobre la relación entre los elementos nutrimentales registrados *in situ* y la información espectral de cada una de las bandas y el NDVI, así que se decidió mostrar directa-

mente la relación de mayor significancia estadística y se ha corroborado cada relación con el valor del coeficiente de determinación (R^2).

El R^2 es un coeficiente importante en regresión. Se deduce que la elevación al cuadrado de R , es representativo del grado de relación entre dos variables. Así, un R^2 de 0.97 significa que el valor de la probabilidad de estimar la concentración media de cada uno de los elementos nutrimentales analizados, podrá ser predicho en 97% de las veces de forma correcta.

Por lo tanto, el valor de R^2 indica el porcentaje de variabilidad de los valores de y (concentración de elementos nutrimentales en hoja de manzano), que pueden ser explicados en función de la variabilidad de los valores de x (valores medios de las bandas espectrales de SPOT 5 y el NDVI).

Infraestructura usada en el desarrollo del proyecto

El desarrollo de este proyecto, se apoyó en la infraestructura del Laboratorio de Análisis Urbano-Territorial (LAUT) de la UACJ, cuya capacidad técnica y recursos para el procesamiento de bases de datos geográficas y productos de sistemas de percepción remota, es de los más avanzados actualmente en la región.

Entre los insumos más relevantes con los que el LAUT cuenta para el desarrollo de la presente investigación, se encuentran componentes del sistema de información geográfica regional, que se ha desarrollado en la UACJ a lo largo de más de 10 años y que se utilizó como base para el análisis espacial del proyecto.

Además, el LAUT cuenta con licencias disponibles de los *software*: ArcGIS, ENVI y ERDAS Imagine, para análisis de imágenes basado en objetos y que fueron usadas en el procesamiento de la información citada.

Fotos de las huertas estudiadas

1) Huerta en El Molino; Namiquipa, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

2) Huerta en El Oso; Namiquipa, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

3) Huerta en El Terrero; Namiquipa, Chihuahua.



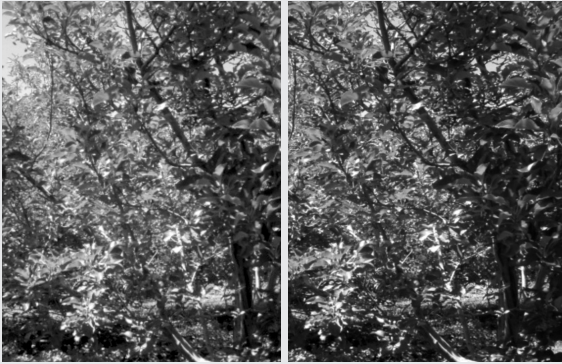
Fuente: Amado 2013.

4) Huerta en El Picacho; Namiquipa, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

5) Huerta en Soto Máynez; Namiquipa, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

6) Huerta en Bachíniva; Bachíniva, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

7) Huerta en San José Bachíniva; Bachíniva, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

8) Huerta en el km 27 de la carretera Guerrero-Madera; Guerrero, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

9) Huerta en el km 11.422 del canal de riego de la Presa Abraham González;

Guerrero, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

10) Huerta en el km 1.1 del canal de riego de la Presa Abraham González;

Guerrero, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

11) Huerta Gran Visión; Guerrero, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

12) Huerta en Miñaca; Guerrero, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

13) Huerta en Álvaro Obregón; Cuauhtémoc, Chihuahua

(km 40 de la carretera Álvaro Obregón-Bachíniva).



Fuente: Amado 2013.

14) Huerta en el Campo Menonita núm. 10-A; Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

15) Huerta en el km 18.5 de la carretera Cuauhtémoc-Álvaro Obregón;

Cuauhtémoc, Chihuahua.



16) Huerta en Ojo de Agua; Cusihiuriachi, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

17) Huerta en Llanos de Reforma; Cusihiuriachi, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

18) Huerta en el Campo Menonita núm. 2-B; Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

19) Huerta en el Campo Menonita núm. 22; Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

20) Huerta en el Campo Menonita núm. 20; Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

21) Huerta en el Campo Menonita núm. 4; Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

22) Huerta en el Campo Menonita núm. 4 1/2; Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

23) Huerta en el Campo Menonita núm. 6-A; Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

24) Huerta en el Campo Menonita núm. 10; Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Amado 2013.

25) Huerta en el Campo Menonita núm. 102 ½; Cuauhtémoc, Chihuahua.





Fuente: Amado 2013.

Resultados y discusión

Características de los parámetros de crecimiento

En el cuadro 5, se puede apreciar la magnitud de las huertas estudiadas. Los árboles más grandes (5.1 m de alto, 5.2 m de ancho, 5.25 m entre hileras, los cuales equivalen a un volumen total de 75.7 m³ de copa del árbol) corresponden a la huerta Gran Visión, en el municipio de Guerrero, donde el manejo del productor es hacia la formación del líder central, y como es una huerta muy vieja, pues se han presentado estos valores.

Dentro de las huertas con menor porte, se registraron los árboles de la huerta en Llanos de Reforma, cuyas dimensiones de copa fueron las siguientes: 2.3 m de alto, 3.1 m de ancho, 2.5 m entre hileras y el volumen total de la copa fue de 31.45 m³.

Existen huertas en Namiquipa y Bachíniva, donde por el descuido de los fruticultores, los árboles han llegado a medir hasta 5 m de alto, lo cual perjudica en dos aspectos: un crecimiento muy alto provoca disminución en el rendimiento y por otra parte, dificulta las labores de la cosecha.

Para la programación adecuada del suministro de los recursos hídricos en árboles frutales, es de mucha importancia conocer el porcentaje de cobertura total, donde se relaciona el volumen total del árbol en relación con su densidad de plantación.

Con esta información, también se puede distinguir el espacio donde se hará la aplicación de los fertilizantes, ya que existe una relación directa entre el tamaño de la copa del árbol respecto a donde se encuentran las raíces absorbentes, las cuales no rebasan los 3 mm de diámetro.

Cuadro 5. Parámetros de crecimiento en árboles de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusihuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

<i>Núm. de huerta</i>	<i>Altura de copa del árbol (m)</i>	<i>Ancho de copa del árbol (m)</i>	<i>Diámetro de copa del árbol (m)</i>	<i>Media de copa del árbol (m)</i>	<i>Volumen de copa del árbol (m³)</i>
1	3.83	3.81	3.60	3.73	27.14
2	4.26	2.64	3.09	3.33	29.31
3	4.09	4.51	4.28	4.29	41.29
4	3.51	3.94	3.90	3.78	28.24
5	3.18	3.06	3.10	3.11	15.75
6	3.53	3.78	3.74	3.68	26.06
7	4.69	4.91	4.88	4.82	58.56
8	3.34	2.83	3.00	3.05	14.83
9	3.54	3.10	3.24	3.29	18.83
10	4.90	4.10	4.36	4.45	46.08
11	5.11	5.45	5.20	5.25	75.67
12	3.57	4.79	4.02	4.12	36.57
13	4.19	4.15	4.66	4.33	42.45
14	3.31	2.60	1.86	2.35	23.37
15	3.12	2.32	1.65	2.36	18.12
16	3.35	3.95	3.93	3.74	27.36
17	2.30	3.10	2.50	2.63	31.45
18	4.04	3.10	3.08	3.40	20.55
19	3.45	2.98	3.27	3.23	17.62
20	3.20	3.50	3.23	3.31	18.96
21	3.81	4.59	4.60	4.33	42.45
22	3.35	4.60	2.75	3.56	28.95
23	3.14	2.54	2.37	2.68	10.06
24	4.11	3.42	3.63	3.72	26.92
25	4.48	6.32	6.15	5.65	94.32

Fuente: Amado 2013.

En el cuadro 6, se puede apreciar que la huerta del Campo 102 ½ es donde se registraron los valores más grandes de todas las huertas estudiadas: 43 cm de alto del nivel del suelo, a donde comienza la copa del árbol; el diámetro del tronco en el árbol fue de 124.4 cm (muy grande); el crecimiento vegetativo apical, 18.43 cm, adecuado para la variedad Golden Delicious y en equilibrio con la relación entre los parámetros de crecimiento respecto a los de producción, ya que si un árbol crece mucho, lo normal es que produzca poco, por la relación inversa entre estas variables.

El riego y la fertilización son dos aspectos clave en el manejo de una explotación frutícola y son determinantes a la hora de obtener buenos resultados productivos y cualitativos. Ambos factores influyen en el crecimiento vegetativo del árbol, en el desarrollo del fruto y en la producción final y calidad del fruto.

Además, siendo la manzana un producto destinado, en un porcentaje elevado, a larga conservación, el manejo adecuado del riego y abonado, sobre todo nitrogenado, son fundamentales para asegurar una buena calidad del producto después de la frigoconservación (Rufat *et al.*, 2002).

Cuadro 6. Parámetros de crecimiento en árboles de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusihuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Altura del tronco (cm)	Diámetro del tronco (cm)	Crecimiento vegetativo apical (cm)	Sistema de plantación (m)	Diámetro medio (m)	% de cobertura
1	45.8	52.0	6.0	3.25 * 4.0	3.73	83.25
2	53.4	54.6	27.35	5.10 * 4.10	3.33	65.00
3	46.2	76.8	11.9	5.6 * 4.9	4.29	76.60
4	56.8	67.0	5.88	5.1 * 6.0	3.78	63.00
5	48.0	37.2	7.33	4.3 * 2.25	3.11	72.32
6	52.6	64.2	10.59	4.0 * 3.70	3.68	92.00

Núm. de huerta	Altura del tronco (cm)	Diámetro del tronco (cm)	Crecimiento vegetativo apical (cm)	Sistema de plantación (m)	Diámetro medio (m)	% de cobertura
7	58.0	92.0	14.10	6.3 * 4.5	4.82	76.50
8	32.8	34.6	26.92	5.0* 5.0	3.05	61.00
9	55.4	45.2	17.59	4.44 * 2.6	3.29	74.01
10	63.0	98.0	15.73	4.0 * 4.0	4.45	111.25
11	27.2	90.6	15.01	5.0 * 4.4	5.25	105.00
12	16.4	81.8	8.20	5.0 * 4.5	4.12	82.40
13	40.6	75.6	24.40	4.7 * 6.0	4.33	72.16
14	58.8	32.4	18.65	2.2 * 4.3	2.59	60.00
15	48.12	33.91	22.16	1.1 * 3.1	2.36	18.38
16	54.2	88.12	20.54	5.5 * 5.5	3.74	68.00
17	70.0	54.8	15.4	5.0 * 5.0	2.60	29.31
18	57.0	37.6	33.71	2.9 * 4.7	3.40	72.34
19	59.0	54.2	19.17	5.2 * 3.6	3.23	62.11
20	47.0	75.6	11.45	4.4 * 2.4	3.31	75.22
21	31.4	90.2	23.46	5.0 * 6.2	4.33	69.83
22	32.6	58.8	10.90	5.3 * 5.9	3.56	60.00
23	58.4	31.6	24.36	4.62 * 3.0	2.68	58.00
24	37.6	54.2	29.13	4.6 * 3.1	3.72	80.86
25	43.0	124.4	18.43	6.1 * 6.1	5.65	92.62

Fuente: Amado 2013.

Parámetros de rendimiento

En el cuadro 7 se aprecia que en el municipio de Namiquipa el rendimiento por huerta fluctuó desde 0.01 t ha⁻¹ en El Oso, debido a una fuerte granizada, a mediados del mes de julio del año 2012, hasta 7.44 t ha⁻¹ en Soto Máynez, siendo esta huerta una de las menos fertilizadas con menos de 250 g por árbol. El máximo rendimiento (50.25 t ha⁻¹) se cuantificó en el Campo 102 ½, en árboles de 30 años de plantados.

Cuadro 7. Rendimiento en árboles de manzano por huerta ($t\ ha^{-1}$) en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusihuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACI en Cuauhtémoc, Chihuahua.

<i>Municipio</i>	<i>Localidad</i>	<i>Huerta</i>	<i>Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)</i>
Namiquipa	El Molino	1	1.29
Namiquipa	El Oso	2	0.01
Namiquipa	El Terrero	3	0.77
Namiquipa	El Picacho	4	2.61
Namiquipa	Soto Máñez	5	7.44
Bachíniva	Bachíniva	6	1.57
Bachíniva	San José Bachíniva	7	3.77
Guerrero	Huerta Lic. Domínguez	8	1.33
Guerrero	Huerta Juliana López	9	7.93
Guerrero	Canal de riego km 1.1	10	9.17
Guerrero	Gran Visión	11	18.22
Guerrero	Miñaca	12	0.76
Cuauhtémoc	km 40 de la Carr. a Bachíniva	13	10.98
Cuauhtémoc	Campo 10	14	8.54
Cuauhtémoc	km 18.5	15	6.95
Cusihuirachi	Ojo de Agua	16	3.91
Cusihuirachi	Llanos de Reforma	17	23.16
Cuauhtémoc	Campo 2-B	18	4.07
Cuauhtémoc	Campo 22	19	12.62
Cuauhtémoc	Campo 20	20	45.88
Cuauhtémoc	Campo 4	21	22.51
Cuauhtémoc	Campo 4 ¼	22	4.8
Cuauhtémoc	Campo 6-A	23	3.10
Cuauhtémoc	Campo 10 (Rubio)	24	3.63
Cuauhtémoc	Campo 102 ½	25	50.25

Fuente: Amado 2013.

Diagnóstico nutrimental y Diseño de índices espectrales de manzano

Nitrógeno

En el cuadro 8, se muestran los resultados de la concentración de N total en las hojas de los árboles de manzano. En primer lugar, se pueden distinguir dos cuestiones: a) La mayor concentración de N en todas las huertas en general, se registró en la época temprana de la fisiología del manzano (a partir de los últimos días de mayo), la cual va disminuyendo conforme avanza la estación de crecimiento, ya que este elemento se va a la división y elongación celular para el crecimiento del fruto.

Cuadro 8. Resultados de la concentración de N total (%) en hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusihuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de N total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1.64	1.74	1.59	1.34	1.55	1.22
2	2.12	2.14	2.01	1.83	1.68	1.53
3	1.69	1.77	1.87	1.73	1.56	3.81
4	2.03	1.96	1.89	1.54	1.24	1.53
5	2.11	1.64	1.88	1.64	1.64	1.30
6	1.39	2.05	2.02	1.94	1.78	1.35
7	1.90	1.75	1.55	1.81	1.67	1.33
8	1.75	1.86	2.03	2.31	1.71	2.07
9	1.59	1.92	1.95	2.06	1.85	1.79
10	2.05	1.75	1.78	2.04	1.27	1.67
11	1.69	1.67	1.80	1.82	1.72	1.80
12	1.93	1.74	2.07	1.92	1.88	1.21
13	1.97	2.12	2.10	2.19	2.14	2.21
14	2.45	2.25	2.35	2.21	2.25	2.16

Núm. de huerta	Concentración de N total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
15	2.34	2.18	2.10	2.17	1.86	1.55
16	2.06	1.77	1.87	1.77	1.47	1.50
17	1.83	1.83	1.75	1.67	1.73	1.73
18	2.23	2.09	1.95	1.67	1.72	2.04
19	2.33	2.26	2.12	1.96	1.89	1.82
20	1.62	1.61	1.47	1.47	1.50	1.44
21	2.42	1.87	2.21	2.29	2.18	1.84
22	2.25	1.97	1.84	1.73	1.67	1.68
23	2.25	2.20	1.93	2.03	1.95	1.83
24	2.36	2.21	2.32	2.29	2.27	1.77
25	3.28	2.84	2.55	2.25	2.03	1.81

Interpretación: ≤ 1.5% de N total = Deficiente; 1.7-2.5% de N total = Suficiencias; ≥ 2.8% de N total = Excesos (Shear y Faust, 1980).

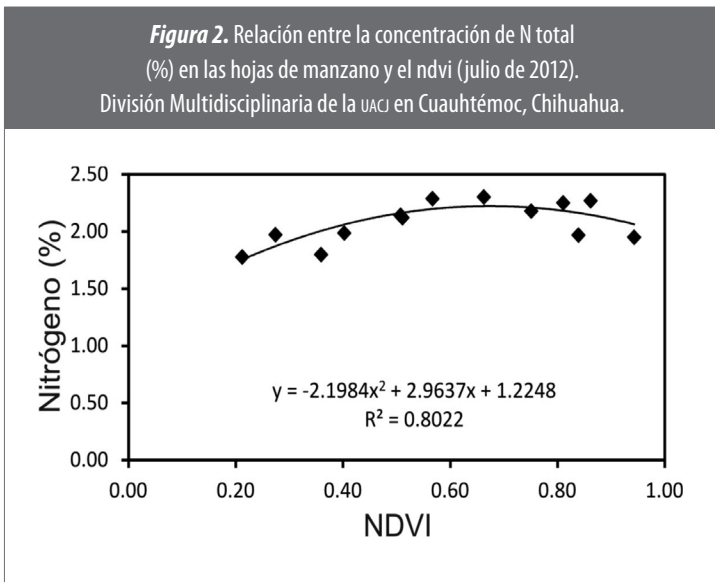
Fuente: Amado 2013.

b) En segundo lugar, se puede apreciar que las huertas correspondientes a los municipios de Namiquipa, Bachíniva y Cusihuirachi, respectivamente, se encuentran desatendidas y con bajas concentraciones de N en las hojas de este frutal, en condiciones medias se registraron las huertas correspondientes al municipio de Guerrero, mientras que en el resto de las huertas estudiadas, pertenecientes a Cuauhtémoc, Chihuahua, es donde se encontró la mayor concentración de N foliar en las hojas.

En la figura 2, se puede apreciar la relación entre la concentración de N foliar respecto a la tecnología obtenida con los sensores remotos sobre la caracterización biofísica, debido a las propiedades ópticas de las hojas verdes. La absorción en la banda espectral del rojo del espectro electromagnético es muy alta y el modelo que esta relación representa es de segundo orden ($y = -2.1984x^2 + 2.9637x$

+ 1.2248) con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.80$) altamente significativo.

Resultados similares a los citados por Tucker y Sellers (1986) indican que el dominio de ópticas de las láminas verdes refleja o dispersa la mayor parte en la banda del infrarrojo cercano. El modelo obtenido relaciona el óptimo de la concentración del manzano (2.0% de N total), que corresponde a un valor de 0.5 NDVI, mientras que valores inferiores acusan deficiencias de N y datos superiores, excesos del mismo, lo cual trae como consecuencia frutos muy verdes y de baja vida de anaquel, reduciendo la calidad del fruto.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Fósforo

La concentración de P en las hojas de manzano, se muestra en el cuadro 9, donde sólo un dato de 150 mostró excesos de este nutrimento, y corresponde al tercer muestreo foliar (30 de junio de 2012) en la huerta El Terrero, en Namiquipa. El 29% de las huertas se encuentra dentro del rango de Sudeficiencias del citado elemento, debido a la baja movilidad, mientras que 71% muestra deficiencias del mismo, considerando las etapas fenológicas (31 de mayo al 15 de agosto del ciclo 2012).

Cuadro 9. Resultados de la concentración de P total (%) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachiniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de P total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	0.18	0.22	0.19	0.18	0.20	0.21
2	0.12	0.08	0.10	0.09	0.09	0.08
3	0.16	0.13	1.36	0.15	0.12	0.06
4	0.14	0.13	0.10	0.09	0.08	0.20
5	0.09	0.17	0.14	0.15	0.13	0.05
6	0.16	0.05	0.08	0.06	0.05	0.13
7	0.17	0.16	0.11	0.11	0.12	0.20
8	0.17	0.15	0.18	0.20	0.17	0.09
9	0.11	0.07	0.08	0.08	0.07	0.09
10	0.17	0.13	0.21	0.13	0.11	0.11
11	0.13	0.14	0.07	0.11	0.09	0.07
12	0.11	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06
13	0.11	0.09	0.06	0.06	0.06	0.09
14	0.26	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
15	0.11	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07

Núm. de huerta	Concentración de P total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
16	0.17	0.13	0.18	0.13	0.10	0.22
17	0.17	0.19	0.20	0.24	0.18	0.08
18	0.11	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07
19	0.11	0.10	0.08	0.09	0.07	0.09
20	0.20	0.17	0.20	0.16	0.18	0.17
21	0.10	0.08	0.06	0.10	0.06	0.06
22	0.13	0.13	0.14	0.16	0.15	0.14
23	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
24	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07
25	0.13	0.09	0.08	0.08	0.07	0.08

Interpretación: $\leq 0.13\%$ de P total = Deficiente; 0.15-0.30% de P total = Suficiencias; $\geq 1.25\%$ de P total = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

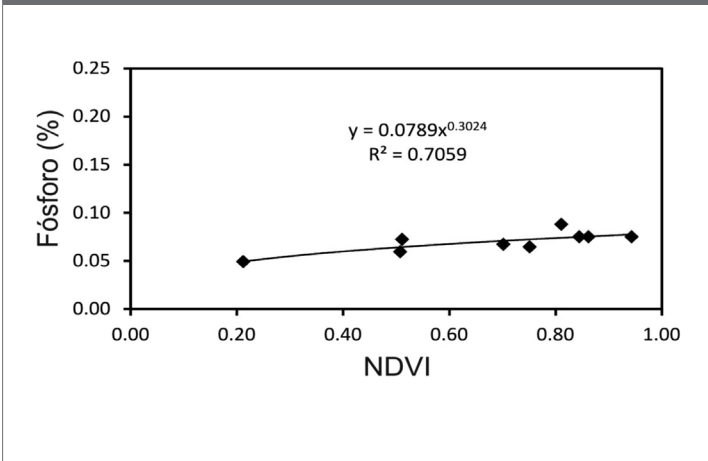
Amado y Ortiz (1997), estudiando el manzano en función de la fertilización al suelo, en Bachíniva, Chihuahua, establecieron que los mejores beneficios de la aplicación de P sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del citado frutal, se tradujeron con la aplicación de 50 kg ha^{-1} , donde los árboles produjeron en promedio 1708 frutos equivalentes a 28.3 t ha^{-1} .

La relación del P respecto al NDVI, se muestra en la figura 3, representada por un modelo exponencial ($y = 0.0789x^{0.3024}$), cuyo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.70$) fue estadísticamente significativo. Sin embargo, es importante remarcar que sólo representa 71% de los datos procesados, ya que en ninguna ocasión se presentaron altos contenidos de P en las huertas estudiadas de la región manzanera del estado de Chihuahua y sólo explica los valores entre 0.05 y 0.1% del nutrimento en cuestión obtenido dentro del follaje de este frutal.

Al respecto, Huete (1988) comentó que el NDVI aprovecha este contraste utilizando relaciones entre dos bandas

de muestreo del espectro electromagnético: roja e infrarroja cercana. Así, las relaciones empíricas calculadas entre las variables biofísicas de los cultivos y el NDVI reflejan patrones generales o tendencias entre las propiedades ópticas de los cultivos y su arquitectura (distribución espacial y angular de los fitoelementos del follaje), para una geometría sensor-iluminación dada.

Figura 3. Relación entre la concentración de P total (%) en las hojas de manzano y el ndvi (julio de 2012).
División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuahtémoc, Chihuahua.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Potasio

En el cuadro 10, se puede apreciar que sólo 22.7% de las muestras, considerando todas las huertas de manzano a través de todo el tiempo de estudio, se encontró dentro del rango de Suficiencias; mientras que 77.3% de todos los valores reportados indica deficiencias nutrimentales de K en las hojas de los árboles.

Un estudio de Amado (1989), donde se recolectaron y analizaron hojas de manzano en 58 huertas de los cuatro municipios más importantes para la producción del mismo en el estado de Chihuahua, mostró que 23% de las huertas estudiadas contenía bajos niveles de K.

Posteriormente, Amado (1994) consignó un estudio de tres años sobre el efecto de la fertilización potásica al suelo sobre la producción de manzano para la sierra de Chihuahua, donde concluyó que los mejores efectos de este nutrimento sobre el desarrollo y rendimiento del frutal, se produjeron con la aplicación de 50 kg ha⁻¹ al suelo, con un rendimiento promedio de 35.516 toneladas por hectárea, compuesto por 2181 frutos por árbol de 6.32 cm de diámetro ecuatorial medio.

Cuadro 10. Resultados de la concentración de K total (%) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuahtémoc y Cusihiuriachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuahtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de K total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1.20	1.66	1.19	1.04	0.84	0.81
2	0.86	1.31	0.73	0.87	0.84	0.81
3	1.15	1.25	0.69	0.77	0.83	0.54
4	1.03	0.88	0.73	0.66	0.59	0.84
5	1.03	1.40	0.94	0.91	0.62	0.73
6	0.91	0.79	0.63	0.80	0.51	0.60
7	1.18	0.98	0.78	0.80	0.66	0.79
8	0.90	1.24	0.95	0.82	0.79	0.75
9	0.96	1.34	0.61	0.89	0.69	0.74
10	1.20	1.06	0.83	0.84	0.70	0.94
11	0.88	1.25	1.05	0.99	0.81	0.49
12	1.06	0.99	0.65	0.62	0.65	0.80
13	1.14	1.08	0.90	0.82	0.64	0.77

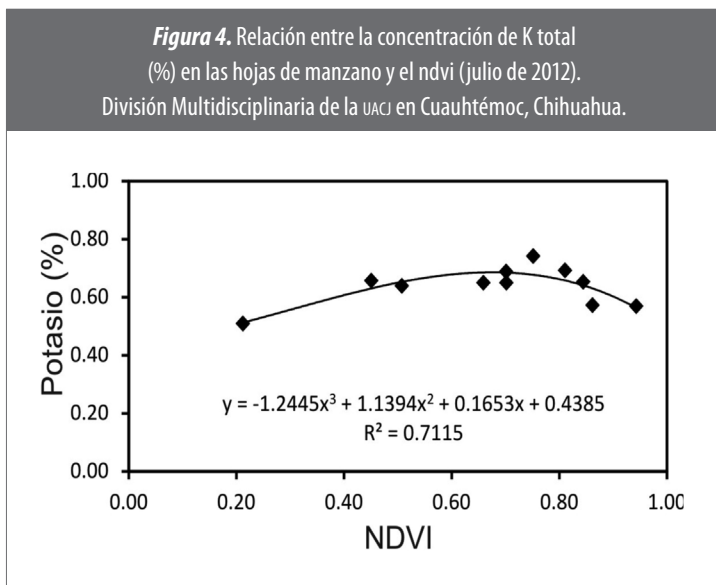
Núm. de huerta	Concentración de K total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
14	1.21	1.00	0.84	0.85	0.69	0.61
15	0.81	1.06	1.08	1.05	0.88	0.74
16	1.14	0.93	1.01	0.84	0.65	0.73
17	1.25	0.78	0.86	0.88	0.74	0.57
18	0.92	0.63	0.88	0.68	0.65	0.57
19	1.00	0.59	0.74	0.64	0.54	0.68
20	1.26	0.92	1.02	1.01	0.69	0.55
21	0.64	1.14	0.91	0.92	0.53	0.53
22	1.08	0.95	0.79	0.75	0.61	0.60
23	1.06	0.85	0.69	0.65	0.57	0.57
24	0.98	0.85	0.71	0.92	0.57	0.51
25	1.28	0.81	0.84	0.81	0.87	0.83

Interpretación: $\leq 1.0\%$ de K total = Deficiente; 1.5-2.0% de K total = Suficiencias; $\geq 3.1\%$ de K total = Excesos (Sheary Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

En la figura 4, se puede apreciar la relación de la concentración de K (%) con el NDVI, la cual es representada por un modelo de tercer grado ($y = -1.2445x^3 + 1.1394x^2 + 0.1653x + 0.4385$) con un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.7115$), resultando estadísticamente significativo. Sin embargo, este modelo sólo representa a las huertas de manzano con deficiencias de K, donde los valores del NDVI fluctuaron de 0.20 a 0.95.

Liu y Hute (1995) indican que los resultados del NDVI dependen de las hipótesis consideradas en relación con la estructura del problema.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Calcio

El *bitter pit* se caracteriza por la aparición de lesiones deprimidas que afectan la epidermis y zonas subepidérmicas de la manzana. Las manchas que no están centradas en lentículas son difusas y translúcidas y corresponden a corchosis bajo la epidermis, la cual se necrosa en estados avanzados (Val *et al.*, 2002).

Este problema es muy común en la sierra de Chihuahua, como lo demuestran los resultados de la presente investigación, donde 96% de todas las pruebas efectuadas en las 25 huertas se encuentra en condiciones de deficiencias de Ca (cuadro 11).

Las deficiencias de este elemento hacen que la enfermedad *bitter pit* aparezca, principalmente en periodos de poscosecha, como áreas pardas en la superficie del fruto, las

cuales deprecian el valor del producto, haciendo imposible su comercialización para su consumo.

De acuerdo con Fallahi (1997), la investigación realizada durante los últimos 50 años ha demostrado que la incidencia de esta alteración está inversamente relacionada con la concentración de Ca en el fruto y es directamente proporcional a las de Mg, K, P y N.

Cuadro 11. Resultados de la concentración de Ca total (%) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuahtémoc y Cusiuhiriachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuahtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Ca total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	0.38	1.36	0.63	0.98	0.58	0.51
2	0.25	0.61	0.41	0.30	0.21	1.25
3	0.52	0.73	0.15	0.74	0.58	0.78
4	0.39	0.70	0.39	0.22	0.48	1.04
5	0.64	0.92	0.27	0.30	0.85	0.69
6	0.12	0.90	0.86	0.22	0.49	0.48
7	0.54	0.59	0.45	0.66	0.58	0.50
8	0.21	0.52	0.68	0.33	0.43	0.68
9	0.42	0.56	0.73	1.99	0.32	0.59
10	0.45	0.56	0.60	0.93	0.64	0.54
11	0.19	0.58	0.42	0.47	0.33	0.44
12	0.75	1.89	0.54	0.55	0.87	0.65
13	0.54	0.47	0.46	0.44	0.67	0.60
14	0.39	0.24	0.37	0.65	0.63	0.58
15	0.56	0.73	0.60	0.77	0.71	0.62
16	0.58	0.32	0.49	0.49	0.65	0.70
17	0.50	0.55	0.58	0.56	0.67	0.59
18	0.78	0.56	0.43	0.60	0.55	0.60
19	0.83	0.55	0.45	0.58	0.77	0.75
20	0.74	0.82	0.36	0.75	0.73	1.04

Núm. de huerta	Concentración de Ca total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
21	0.61	0.55	0.48	0.43	0.57	0.68
22	0.58	0.90	0.28	0.66	0.61	0.55
23	0.89	0.57	0.78	0.67	0.65	0.91
24	0.61	0.32	0.68	0.50	0.62	0.66
25	0.58	0.62	0.23	0.79	0.81	0.97

Interpretación: $\leq 0.7\%$ de Ca = Deficiente; 1.5-2.0% de Ca = Suficiencias; $\geq 3.1\%$ de Ca = Excesos (Shear y Faust, 1980).

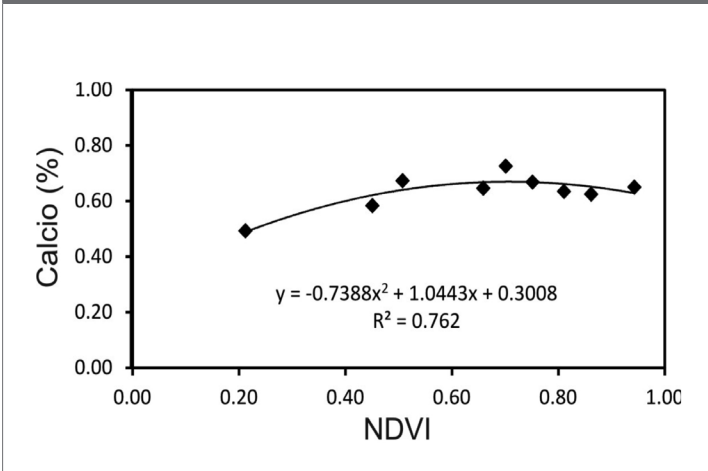
Fuente: Amado 2013.

El uso de firmas espectrales, obtenidas mediante sensores remotos, permite adquirir información de elementos nutrimentales, área foliar y biomasa, que proporcionan datos del estado fisiológico de la planta. Los sensores remotos ópticos proveen información, específica y crítica, debido a su capacidad para medir indicadores biofísicos y detectar su variabilidad espacial (Ritchie, 2003).

En la figura 5, se muestra una alta correlación ($R^2 = 0.76$) entre el NDVI en la interpretación de las firmas espectrales, donde el modelo obtenido es de segundo grado ($y = -0.7388x^2 + 1.0443x + 0.3008$) y considera la concentración nutrimental de Ca entre los valores de 0.43 a 0.70% en las hojas de manzano, lo cual indica deficiencias nutrimentales en 96% de los casos analizados.

Dentro de los factores que provocan esta situación, se encuentran los siguientes: el Ca que se aplica en el suelo tarda hasta cuatro años en llegar al fruto, debido a la baja movilidad dentro del sistema agua-suelo-planta; básicamente por desconocimiento y falta de recursos, el productor no tiene un programa de mantenimiento, es decir, la aplicación continúa año tras año del Ca que va a ser requerido para la formación del fruto; además, los suelos fluctúan de ácidos a ligeramente ácidos, por lo que la presencia de carbonatos y bicarbonatos de Ca es muy baja.

Figura 5. Relación entre la concentración de Ca total (%) en las hojas de manzano y el ndvi (julio de 2012).
División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Magnesio

En el cuadro 12, se muestran los resultados del análisis foliar, donde se puede apreciar que 97.3% indica fuertes deficiencias de Mg, lo cual disminuye la síntesis de proteínas (Ness y Woolhouse, 1980), carbohidratos (Marcar y Graham, 1987) y lípidos (Constantopoulos, 1970).

Adicionalmente, el Mg tiene otra función esencial como componente constitutivo de los ribosomas. Es un elemento que sirve también como puente entre los ácidos ribonucleicos para mantener la agregación de las subunidades de los ribosomas (Cammarano *et al.*, 1972).

Cuadro 12. Resultados de la concentración de Mg total (%) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuahtémoc y Cusiuhiriachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuahtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Mg total (%) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	0.18	0.18	0.19	0.15	0.15	0.18
2	0.14	0.18	0.19	0.15	0.14	0.12
3	0.16	0.15	0.18	0.15	0.14	0.14
4	0.20	0.19	0.18	0.21	0.14	0.19
5	0.21	0.20	0.23	0.19	0.15	0.17
6	0.15	0.22	0.29	0.22	0.19	0.16
7	0.17	0.17	0.21	0.20	0.18	0.17
8	0.16	0.17	0.19	0.17	0.19	0.14
9	0.13	0.15	0.20	0.15	0.17	0.18
10	0.17	0.18	0.21	0.19	0.17	0.13
11	0.13	0.14	0.17	0.15	0.15	0.14
12	0.18	0.19	0.21	0.14	0.18	0.15
13	0.17	0.19	0.20	0.18	0.19	0.20
14	0.19	0.22	0.20	0.22	0.19	0.18
15	0.21	0.28	0.22	0.26	0.17	0.18
16	0.16	0.19	0.17	0.21	0.20	0.18
17	0.18	0.21	0.18	0.20	0.19	0.17
18	0.16	0.22	0.19	0.17	0.15	0.00
19	0.20	0.23	0.22	0.18	0.21	0.15
20	0.15	0.15	0.16	0.13	0.14	0.15
21	0.23	0.23	0.28	0.33	0.20	0.23
22	0.17	0.22	0.18	0.19	0.18	0.18
23	0.18	0.20	0.19	0.18	0.16	0.17
24	0.17	0.19	0.20	0.23	0.17	0.16
25	0.20	0.21	0.28	0.21	0.15	0.19

Interpretación: $\leq 0.25\%$ de Mg = Deficiente; 0.26 a 0.85% de Mg = Suficiencias; $\geq 1.0\%$ de Mg = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

De acuerdo con Stiles (1994), una concentración de Mg en el suelo de 120 partes por millón equivale a 1 milequivalente por 100 g de suelo, situación común en la sierra de Chihuahua, donde además existen problemas de antagonismo con el K. La relación que este autor cita de una forma práctica entre la concentración de K en las hojas de manzano y la de Mg, es de cuatro a uno. Los requerimientos de Mg^{+2} para el manzano los marca entre 20 y 24 libras por acre por año, de las cuales la mitad, aproximadamente, es removida por los frutos producidos.

En la figura 6, se puede apreciar que la respuesta entre la concentración de Mg respecto al NDMI, resultó altamente significativa ($R^2 = 0.69$), donde el modelo que lo representa es de segundo orden ($y = -0.1677x^2 + 0.1619x + 0.1605$). Todos los valores (alrededor de 0.20% de Mg) en las hojas de manzano corresponden a huertas con fuertes deficiencias nutrimentales de este elemento, lo cual es similar con los datos de otros nutrimentos.

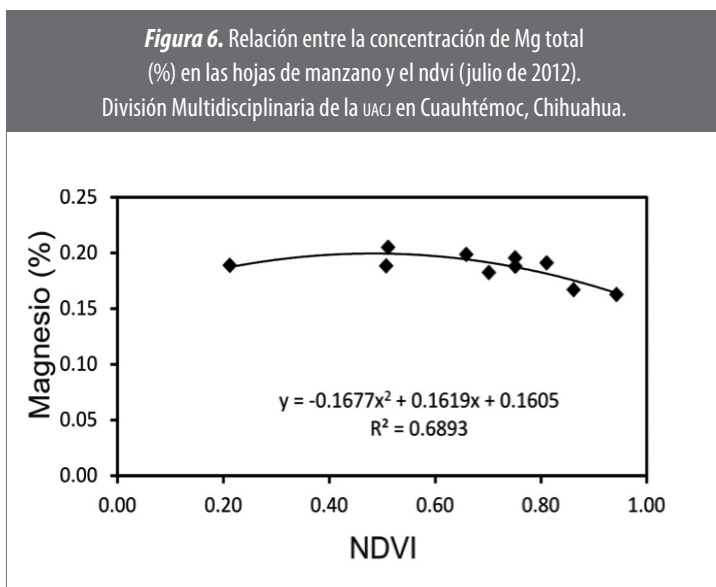
Ya se ha comentado que se ha vuelto un círculo vicioso. Por un lado, el manzano se descuida y no se fertiliza adecuadamente; luego, un árbol con deficiencias nutrimentales se vuelve vulnerable a las heladas. Posteriormente, cuando la floración ha sido afectada por las bajas temperaturas, el agricultor se dedica a otras actividades y deja la huerta prácticamente en el abandono y así sucesivamente.

La interacción de la radiación foliar con las moléculas foliares de las plantas controla la reflectancia del espectro visible y del infrarrojo (Curran, Dungan y Peterson, 2001). Además, se reporta que los componentes bioquímicos (nutrimentos, pigmentos, proteínas, carbohidratos, aceites, agua), la morfología de la hoja (mesófilo) y la arquitectura de la planta, influyen en la tendencia de las plantas para absorber, transmitir y reflejar la radiación solar de distintas longitudes de onda corta, de 280 a 2800 nm.

Las radiaciones de longitud de onda corta absorbidas por las plantas son controladas por la interacción molecular

dentro del tejido vegetal, donde los electrones de las moléculas absorben longitudes de onda controladas por estructuras y enlaces químicos (Jones, 1987).

La clorofila, el principal pigmento fotosintético en las plantas, controla la absorbencia de la luz visible, porque la transición de los electrones en sus moléculas ocurre a 430, 460, 640 y 660 nm; por lo tanto, la clorofila es un absorbente efectivo del espectro azul (400-500 nm) y rojo (600-700 nm) (Curran, 1989).



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Fierro

Las deficiencias de Fe en el cultivo de manzano para la sierra de Chihuahua no son comunes. Sin embargo, en el presente estudio se registró 28% de muestras que acusan deficiencias de este nutrimento (cuadro 13).

Los intervalos de abastecimiento, también llamados niveles críticos, se refieren a los periodos de concentración nutrimental, asociados con algunas zonas dentro de los distintos segmentos de una curva de respuesta, resultante de relacionar los rendimientos con las concentraciones de los nutrimentos en el follaje de manzano.

El 72% restante de las muestras estudiadas indica que las huertas de manzano están dentro del rango de Suficiencias, lo cual se relaciona con el pH del suelo, que en la sierra de Chihuahua es ligeramente ácido.

El Fe es cofactor en más de 130 enzimas que catalizan reacciones bioquímicas únicas e interviene en procesos como: fotosíntesis, respiración, reducción de nitratos y sulfatos (Imsande, 1998). Más de 63% de Fe en la planta, se localiza en el follaje formando parte o unido a proteínas, de acuerdo a los siguientes grupos:

- a) 9% en proteínas como grupo hemo (citocromos, nitrato y nitrito reductasa, sulfato reductasa, catalasa y peroxidasa);
- b) 19% en proteínas como grupo no hemo (ferrodixina, aconitasa, nitrogenasa, nitrato reductasa, sulfito reductasa, complejo del tilacoide y complejos mitocondriales); y
- c) 35 a 80% en ferritina, proteína de almacenamiento para evitar toxicidad (Miller et al., 1984).

Cuadro 13. Resultados de la concentración de Fe total (mg kg⁻¹) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Fe total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	49	118	74	66	57	66
2	37	139	56	44	46	80

Núm. de huerta	Concentración de Fe total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
3	46	134	45	35	43	70
4	72	151	53	62	48	101
5	52	78	44	58	62	107
6	22	145	48	95	73	96
7	53	98	47	48	45	122
8	13	77	74	116	95	77
9	37	61	41	55	77	85
10	16	34	47	145	71	98
11	46	38	58	81	93	78
12	57	38	39	43	75	76
13	58	50	52	48	73	95
14	75	91	37	213	103	106
15	94	36	50	63	97	113
16	120	37	37	62	98	125
17	81	34	33	75	143	122
18	121	63	67	61	109	112
19	189	57	114	88	119	143
20	129	48	94	56	130	127
21	169	34	117	132	101	109
22	113	36	63	99	75	93
23	114	34	51	128	80	136
24	108	42	82	184	64	95
25	138	43	69	87	70	152

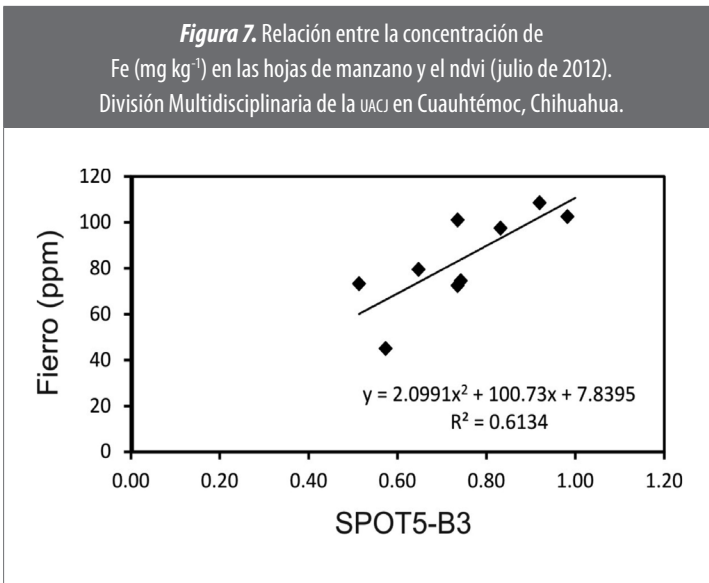
Interpretación: ≤ 50 ppm de Fe = Deficiente; 51-250 ppm de Fe = Suficiencias; ≥ 350 ppm de Fe = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

Las técnicas de los sensores remotos son una herramienta con la cual se puede medir el grado de estrés nutricional y la respuesta del crecimiento puede ser evaluado. El NDVI ha sido utilizado para medir la reflectancia con los cambios en las características del cultivo (Hatfield, Gitelson y Schepers, 2008).

En la figura 7, se puede apreciar que la concentración de Fe en las hojas de manzano y las bandas del SPOT 5-B3, muestran una alta correlación ($R^2 = 0.61$), la cual se ve representada por una ecuación de segundo orden ($y = 2.1x^2 + 100.7x + 7.84$).

Los valores representados por el modelo citado fluctúan desde 40 hasta 110 mg kg⁻¹ de Fe en las hojas de manzano, los cuales corresponden a los rangos de Deficiente en 28% y de Suficiencias en el 78% restante. En ninguna condición se registraron altos contenidos de Fe en el follaje de manzano.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Manganeso

Los resultados obtenidos a fin de registrar los índices espectrales de nutrición en manzano respecto a Mn, se muestran en el cuadro 14, donde se puede apreciar que sólo en la

huerta El Picacho, en Namiquipa, donde los árboles son muy grandes y con bajas cantidades de agua suministrada por la escasez del mismo recurso, se registraron concentraciones de Mn dentro del rango de Suficiencias, al igual que en las huertas Gran visión y Miñaca, que representan condiciones similares de manejo y porte de los árboles. Entre todos los valores apenas se alcanzó 14.7% en el rango de Suficiencias, mientras que 85.3% se colocó en el rango de Deficiente en las hojas del manzano.

Un estudio reciente (Jacobo *et al.*, 2011) indica que 62% de los suelos de la región, se encuentra con cantidades medias de Mn; 33%, con cantidades óptimas y sólo 5% con concentraciones muy altas, por lo que difícilmente habrá respuesta a las aplicaciones de este nutrimento, ya que los factores que coadyuvan a la reducida disponibilidad de Mn son: pH alto y suelos ricos en limo y arcilla; por lo que una corrección de las deficiencias nutrimentales de este elemento será mejor por la vía foliar o aplicada en fertirrigación.

Cuadro 14. Resultados de la concentración de Mn total (mg kg⁻¹) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuahtémoc y Cusiuhuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuahtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Mn total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	17	19	21	16	18	12
2	20	25	26	25	20	17
3	14	15	21	18	14	20
4	17	39	49	46	38	40
5	19	16	17	11	16	23
6	8	23	29	22	29	14
7	14	9	13	13	12	38

Núm. de huerta	Concentración de Mn total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
8	29	30	34	31	33	30
9	25	28	29	33	25	16
10	13	13	14	14	13	33
11	23	25	29	36	36	24
12	27	38	28	23	29	22
13	25	26	38	34	23	16
14	15	15	16	16	14	13
15	36	51	61	54	36	19
16	16	19	15	19	21	17
17	14	14	15	14	14	19
18	19	24	17	16	20	30
19	19	21	22	20	48	18
20	12	13	12	11	25	12
21	20	20	18	22	23	17
22	16	14	14	15	22	22
23	21	21	26	21	28	33
24	20	20	23	21	11	22
25	9	12	12	9	17	7

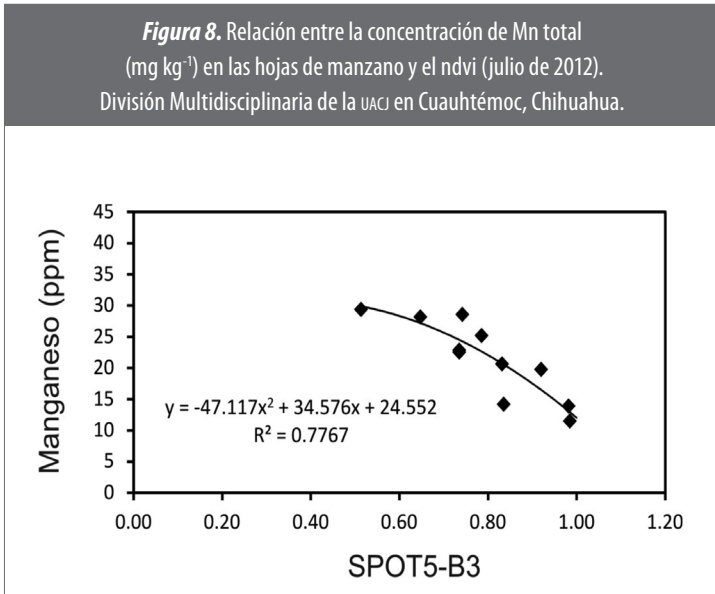
Interpretación: ≤ 25 ppm de Mn = Deficiente; 25-150 ppm de Mn = Suficiencias; ≥ 200 ppm de Mn = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

En la figura 8, se puede apreciar que el índice espectral de Mn formado por la concentración de este nutriente en las hojas de manzano respecto al índice obtenido por el SPOT 5, en la banda 3, muestra una correlación estadísticamente significativa ($R^2 = 0.78$), donde la función es representada por una ecuación de segundo grado con pendiente negativa ($y = -47.12x^2 + 34.58x + 24.55$), y se incluyen valores entre 10 y 30 mg kg⁻¹, lo cual indica huertas de manzano con deficiencias de Mn.

El NDVI ha logrado una amplia aceptación por su facilidad de adaptación a casi cualquier condición (Solari *et al.*,

2008; Shanahan *et al.*, 2003). Estos autores estudiaron la evolución del contenido de clorofila, así como biomasa en hojas verdes y en rendimiento de grano.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Cobre

Respecto al Cu, el panorama es similar al resto de los nutrientes estudiados; en el cuadro 15 sólo 6% de los resultados se encuentra dentro del rango de deficiencias nutrimentales, mientras que 94% se clasifica con deficiencias severas de este elemento en las huertas de manzano.

En un estudio regional desarrollado por Jacobo *et al.* (2011), se registró que de las más de mil muestras de suelo analizadas sólo 3% se clasificó como bajas concentraciones

y el 97% restante, en condiciones medias; pero con la movilidad media de Cu, dentro de la solución del suelo, resultan las deficiencias de este nutrimento en las hojas de manzano.

Son pocos los trabajos efectuados sobre la aplicación de Cu para solucionar problemas relacionados con la nutrición de cultivos, dentro de los cuales sobresalen los reportados por Berger (1965), quien manifiesta que las deficiencias de este elemento se asocian a suelos minerales altamente desgastados.

Las deficiencias de este nutrimento producen coloración y desarrollo anormales, disminución de la calidad y rendimiento de la fruta. Las dosis recomendadas para cultivos anuales fluctúan desde 3 hasta 7 kg ha⁻¹ de Cu, indicando como fuente del citado elemento al sulfato de Cu pentahidratado.

Generalmente, para resolver este tipo de problemas en árboles frutales se recurre a las aspersiones foliares después del cuajado de frutos hasta principios del mes de julio.

Cuadro 15. Resultados de la concentración de Cu total (mg kg⁻¹) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusihuirachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Cu total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	1	1	1	1	2	1
2	1	2	1	2	2	1
3	1	t	t	1	1	1
4	1	3	t	1	1	2
5	1	1	1	2	2	6
6	1	4	5	5	8	2
7	2	1	1	2	2	3
8	2	2	2	3	3	2
9	1	t	t	2	2	1
10	2	1	3	2	1	2

Núm. de huerta	Concentración de Cu total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
11	1	1	1	2	5	2
12	1	1	1	2	2	1
13	1	1	1	2	1	3
14	6	2	2	2	2	1
15	1	t	2	1	2	2
16	1	1	2	2	1	5
17	1	1	2	2	2	2
18	1	1	2	2	1	1
19	1	2	2	2	2	3
20	1	1	3	2	2	2
21	2	1	2	3	2	2
22	1	1	2	2	3	2
23	5	1	2	4	2	3
24	1	t	1	12	2	3
25	1	1	2	2	2	2

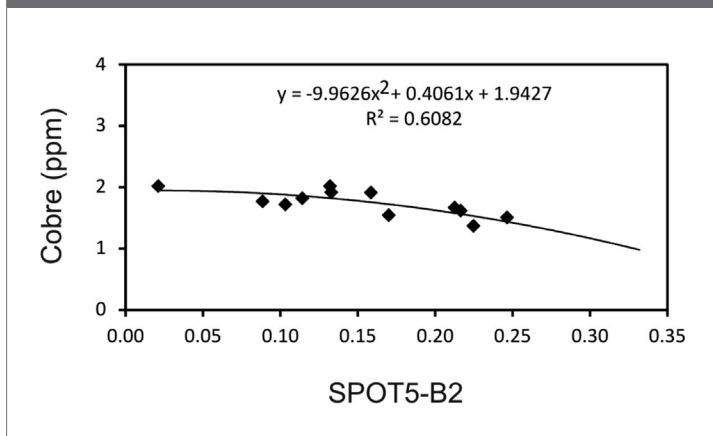
Interpretación: ≤ 4 ppm de Cu = Deficiente; 5-12 ppm de Cu = Suficiencias; ≥ 75 ppm de Cu = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

De acuerdo con Hatfield, Gitelson y Schepers (2008), el total de la radiación solar absorbida por las hojas de los cultivos está directamente relacionada con la cantidad de pigmentos que realizan la fotosíntesis, los cuales se pueden mostrar a través de las bandas del espectro.

En la figura 9, se presenta la correlación ($R^2 = 0.61$) obtenida por medio de la banda B-2 del SPOT 5, respecto a la concentración de Cu en las hojas de manzano, el cual obedece a un modelo de segundo grado con pendiente negativa ($y = -9.97x^2 + 0.406x + 1.9427$), dentro del rango de deficiencias severas del manzano (≤ 4.0 mg kg⁻¹ de Cu).

Figura 9. Relación entre la concentración de Cu total (mg kg^{-1}) en las hojas de manzano y el ndvi (julio de 2012).
División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Zinc

Únicamente la huerta del Campo 22 mostró altas concentraciones de Zn, como se puede apreciar en el cuadro 16; esta situación se debe a que los productores, dueños de la huerta, son de origen alemán (menonitas) y están acostumbrados a realizar análisis de follaje y de suelo dentro de México, pero también en laboratorios de Estados Unidos, por lo que se han asesorado correctamente, haciendo las aplicaciones adecuadas para solucionar los problemas de nutrición del manzano.

En total, las muestras con deficiencias de Cu en el follaje de manzano alcanzaron 93.3%. La explicación más importante es que 48% de los suelos de la región manzanera cuenta con cantidades que fluctúan de medias a muy bajas (Jacobó *et al.*, 2011).

Neilsen y Neilsen (1994) reportan que muchas huertas de manzano ubicadas en el sureste de British Columbia,

han mostrado una baja clorosis, aparentemente asociada a deficiencias de Zn en las hojas del citado frutal, donde se registraron concentraciones de este elemento con valores inferiores a 20 partes por millón.

Para solucionar este problema, los autores citados sugirieron aplicaciones de sulfato de Zn en dosis de 40 kg ha⁻¹, a través de aspersiones foliares, antes de que termine el crecimiento vegetativo apical de los árboles de manzano. También se pueden utilizar productos a base de quelatos de Zn, durante los meses de junio, julio y agosto.

Cuadro 16. Resultados de la concentración de Zn total (mg kg⁻¹) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhiriachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de Zn total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	6	3	6	4	4	5
2	6	4	8	4	5	3
3	5	1	4	3	6	4
4	7	2	5	4	4	5
5	6	7	5	7	5	19
6	5	2	3	5	20	4
7	8	3	3	5	4	4
8	7	4	5	5	6	4
9	9	6	6	5	3	4
10	9	4	6	4	4	5
11	5	3	4	5	4	4
12	9	4	6	6	5	4
13	6	4	4	4	4	1
14	8	4	5	5	4	6
15	9	7	6	7	5	4
16	7	3	3	4	4	5
17	6	4	3	4	4	3

Núm. de huerta	Concentración de Zn total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
18	7	5	6	4	3	17
19	28	21	19	18	26	34
20	9	6	5	7	5	5
21	9	6	5	9	6	47
22	5	6	5	6	4	5
23	5	8	5	10	12	3
24	6	4	6	8	5	4
25	4	5	4	4	4	4

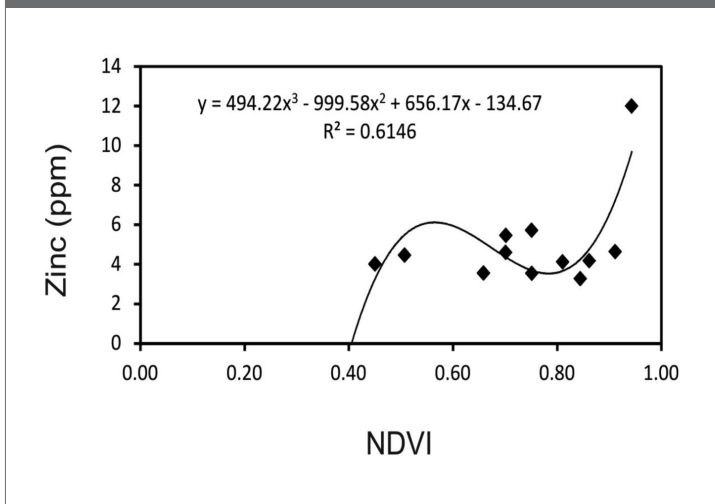
Interpretación: ≤ 14 ppm de Zn = Deficiente; 15-100 ppm de Zn = Suficiencias; ≥ 400 ppm de Zn = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

Al tratar de obtener las bases para una nutrición adecuada del manzano en la sierra de Chihuahua, en la figura 10 se puede apreciar que la mejor explicación ($R^2 = 0.61$) se obtiene con un modelo cúbico, cuya ecuación es: $y = 494.22x^3 - 999.58x^2 + 656.17x + 134.67$.

El impacto del estrés ambiental sobre los procesos fisiológicos de una planta define la productividad del cultivo (Boyers, 1982). La descripción de los efectos del estrés ambiental es una técnica adecuada en la producción moderna de cultivos.

Figura 10. Relación entre la concentración de Zn (mg kg^{-1}) en las hojas de manzano y el ndvi (julio de 2012).
División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Boro

Los resultados sobre la concentración de B en el follaje de manzano, indican que no hay problemas para que éste realice sus funciones vegetativas y de reproducción, ya que prácticamente el 100% de las muestras (cuadro 17) se encuentra entre los valores de 20 a 60 mg kg^{-1} de B, lo cual equivale a concentraciones medias de este nutriente.

De acuerdo con Salisbury y Ross (1994), el B, como el Mo, pertenece al grupo de nutrientes que son metales de transición o metaloides. Las necesidades del B varían considerablemente entre las especies y es común que una concentración que para algunas plantas puede ser adecuada, para otras resulte tóxica. La concentración promedio en el tejido vegetal es alrededor de 20 mg kg^{-1} de materia seca,

pero puede variar, según la especie, de 1 a 100 mg kg⁻¹ de materia seca.

Peryea (1994) comenta que las guías comerciales para la aplicación de B al suelo en el estado de Washington, son de 3 libras por acre cada tres años. También sugiere aspersiones foliares en dosis de 1 libra por acre, para huertas con deficiencias de este elemento.

Cuadro 17. Resultados de la concentración de B total (mg kg⁻¹) en las hojas de manzano por huerta en los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Guerrero, Cuauhtémoc y Cusiuhiriachi, Chihuahua (ciclo 2012-2013). División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.

Núm. de huerta	Concentración de B total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
1	49	52	43	36	35	34
2	45	40	45	34	39	41
3	48	47	48	41	40	32
4	47	45	44	34	31	35
5	41	47	44	32	32	33
6	44	39	34	30	29	29
7	43	35	37	30	35	35
8	35	36	35	34	34	46
9	62	55	55	37	45	34
10	42	42	34	37	33	38
11	58	52	39	41	37	36
12	47	35	39	31	37	36
13	44	43	39	34	30	43
14	41	39	39	35	40	33
15	42	38	38	31	33	30
16	39	31	32	29	28	31
17	34	30	30	34	34	27
18	40	28	26	25	39	29
19	34	35	29	30	35	35
20	42	36	37	38	31	32

Núm. de huerta	Concentración de B total (mg kg ⁻¹) por repetición					
	I	II	III	IV	V	VI
21	44	38	34	40	34	33
22	40	31	33	33	36	35
23	37	28	33	34	33	29
24	36	31	32	36	55	38
25	48	48	44	40	42	44

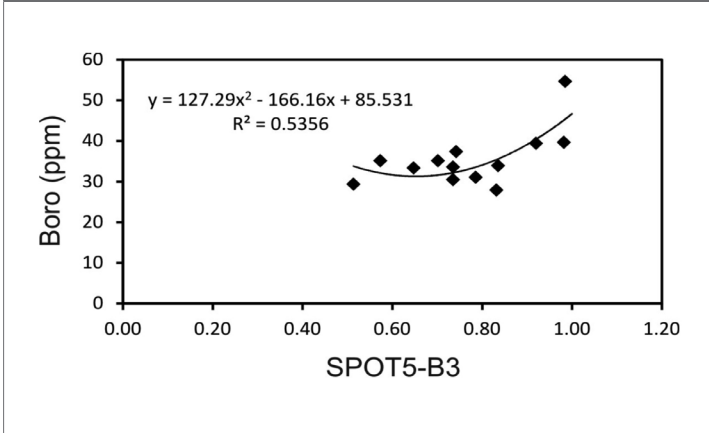
Interpretación: ≤ 20 ppm de B = Deficiente; 20-60 ppm de B = Suficiencias; ≥ 100 ppm de B = Excesos (Shear y Faust, 1980).

Fuente: Amado 2013.

En la figura 11, se muestra la relación ($R^2 = 0.54$) entre la concentración de B (mg kg⁻¹) y el índice obtenido con la banda 3 del SPOT 5, representado por una ecuación de segundo grado ($y = 127.3x^2 - 166.2x + 85.53$), donde todos los valores de B se encuentran entre 20 y 60 (mg kg⁻¹), lo cual equivale a estar dentro del rango de Suficiencias de este nutrimento.

Los avances en la agricultura han habilitado el desarrollo de nuevas herramientas para describir grandes áreas en la producción de cultivos, para facilitar el manejo en la toma de decisiones. Los sistemas de posicionamiento global (GPS), las técnicas de sensores remotos y los mapas de rendimientos, hacen posible la asociación de información espacial y temporal (Jiang y Thelen, 2004).

Figura 11. Relación entre la concentración de B (mg kg^{-1}) en las hojas de manzano y el ndvi (julio de 2012).
División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua.



Fuente: Luis Carlos Alatorre Cejudo & Sonia Miramontes Beltrán, 2013.

Conclusiones y recomendaciones

Se reportaron deficiencias de N, K, Ca, Mg y Fe en 88% de las huertas, las cuales fueron correlacionadas adecuadamente mediante modelos matemáticos de primero, segundo y tercer órdenes entre la concentración de los elementos en las hojas de manzano con el NDVI.

Estos resultados reflejan las condiciones que en el campo chihuahuense prevalecen, principalmente por la tendencia regional de una parte de los fruticultores hacia la producción de manzano de manera orgánica, lo cual implica una baja en la incorporación de fertilizantes químicos al suelo.

El uso de las imágenes de satélite en el diagnóstico nutricional del manzano, es una herramienta que puede ser implementada con grandes ventajas, respecto a la fertilización tradicional de este frutal.

Las dosis de mantenimiento para manzano en plena producción utilizando fuentes orgánicas o inorgánicas son: 90 kg ha⁻¹ de N, distribuidos equitativamente desde abril hasta agosto; 25 kg ha⁻¹ de P, aplicados en marzo y abril; 150 kg ha⁻¹ de K durante junio, julio y agosto; 80 kg ha⁻¹ de Ca, desde febrero hasta junio; 45 kg ha⁻¹ de Mg, desde marzo hasta junio; mientras que de Cu, Fe, Mn y Zn, se deben aplicar 5 kg ha⁻¹, desde abril hasta agosto.

En el caso del B, se recomiendan 50 g m⁻³ de agua utilizada durante mayo y junio; mientras que para el Mo, la misma cantidad (50 g m⁻³) en julio y agosto en fertirrigación.

El rendimiento óptimo del manzano, se obtiene con 77 cm de lámina neta evapotransirada (H₂O), donde los requerimientos hídricos del manzano se calcularon de la siguiente manera: de noviembre a marzo, 1.6 mm por día; abril y mayo, 2.9 mm por día; junio, julio y agosto, 6.9 mm por día; y octubre y noviembre, 1.0 mm por día.

También es necesaria la aplicación de los nutrimentos al suelo y follaje, a fin de obtener mejores resultados de producción considerando la cantidad y calidad del fruto del manzano.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt); a la División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Chihuahua, especialmente al Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo, coordinador de la Licenciatura en Geoinformática, y a toda la planta docente del Programa (UACJ-Cuauhtémoc); y al Colpos, por su apoyo para el desarrollo de la presente investigación.

Literatura citada

- Amado A., J. P. (1989). "Levantamiento nutrimental del manzano (*Malus domestica*) en la sierra de Chihuahua". *Terra*, núm. 2, vol. 7, pp. 116-124.
- (1994). "Efecto de la fertilización potásica al suelo sobre la producción del manzano (*Malus pumilla* Mill)". *Terra*, núm. 3, vol. 12, pp. 362-369.
- Amado A., J. P. y P. Ortiz F. (1997). "Producción de manzano en función de la fertilización fosfatada al suelo". *Terra*, núm. 3, vol. 15, pp. 315-320.
- Ayala, M. B. y G. Sandmann (1988). "The Role of Phosphorous in Respiration of Pea Plants and Heterotrophically Growing *Scenedesmus* Cells". *Z. Naturforsch*, núm. 43, pp. 438-442.
- Barrit, B. H., C. R. Rom, B. J. Konishi y M. A. Dilley (1991). "Light Level Influences Spur Quality and Canopy Development and Light Interception Influence Fruit Production in Apple". *HortScience*, núm. 26, pp. 993-999.
- Belikov, P. S. y G. Dmitrieva A. (1984). *Nutrición mineral de las plantas*. Moscú, URSS: Edit. UDN.
- Berger, K. C. (1965). *Introductory Soils*. New York: The Mac-Millan C.
- Boussadia, O., K. Steppe, H. Zgallai, S. Ben El Hadj, M. Braham, R. Lemeur y M. C. Van Labeke (2010). "Effects of Nitrogen Deficiency on Leaf Photosynthesis, Carbohydrate Status and Biomass Production in Two Olive Cultivars: 'Meski' and 'Koroneiki'". *Scientia Horticulturae*, núm. 123, pp. 336-342.
- Boyers, J. S. (1982). "Plant Productivity and Environment". *Science*, núm. 218, pp. 443-448.
- Burnell, J. 1988. "The biochemistry of manganese in plants". In: R.D. Graham, R.J. Hannam, N.J. Uren. (eds). *Manganese in Soil and Plants*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 125-137.
- Cammarano, P., A. Felsani, M. Gentile, C. Gualerzi, C. Romeo, & G. Wolf. 1972. "Formation of active hybrid 80-S

-
- particles from subunits of pea seedlings and mammalian liver ribosomes". *Biochim. Biophys. Acta*, 281:625-642.
- Cheng L., Ma. F. y D. Ranwala (2004). "Nitrogen Storage and its Interaction with Carbohydrates of Young Apple Trees in Response to Nitrogen Supply". *Tree Physiology*, núm. 24, pp. 91-98.
- Coleman, J. E. 1992. "Structure and Mechanism of Alkaline Phosphatase". *Ann. Rev. Biophys. Biomol. Structure* 21: 441-483.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2010. Registro Público de Derechos de Agua, Comisión Nacional del Agua., www.conagua.gob.mx. (Consulta del 12 de Septiembre del 2012).
- Constantopoulos, G. (1970). "Lipid Metabolism of Manganese -Deficient Algae. 1. Effect of Manganese Deficiency on the Greening and the Lipid Composition of *Euglena gracilis* Z". *Plant Physiology*, núm. 45, pp. 76-80.
- Curran, P. J. (1989). "Remote Sensing of Foliar Chemistry". *Remote Sensing of Environment*, núm. 30, pp. 271-278.
- Curran, P. J., J. L. Dungan y D. L. Peterson (2001). "Estimating the Foliar Biochemical Concentration of Leaves Reflectance Spectrometry Testing the Kokaly and Clark Methodologies". *Remote Sensing of Environment*, núm. 76, pp. 349-359.
- De Angelis, V., E. Sánchez y J. Tognetti (2011). "Timing of Nitrogen Fertilization Influences Color and Anthocyanin Content of Apple (*Malus domestica* Borkh. cv. 'Royal Gala') Fruits". *International Journal of Fruit Science*, núm. 11, pp. 364-375.
- Dong, S., Ma. Cheng, C. F. Scagel y L. Fuchigami (2005). "Timing of Urea Application Affects Leaf and Root N Uptake in Young Fuji/M.9 Apple Trees". *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, núm. 80, pp. 116-120.
- Etchevers B., J. D. 1992. *Manual de Métodos para análisis de suelos, plantas, aguas y Fertilizantes. Análisis rutinario en*

-
- estudios y programas de fertilidad*. Laboratorio de Fertilidad, C. P. Montecillo, Estado de México.
- Evans, J. R. (1989). "Photosynthesis and Nitrogen Relationships in Leaves of C3 Plants". *Oecologia*, núm. 78, pp. 9-19.
- Fageira, N.K., V.C. Baligar and C.A. Jones. 1997. *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*. Ed. Marcel Decker. N.Y, U.S.A. 612 p.
- Fallahi, E. (1997). "Preharvest Nitrogen Optimization for Maximizing Yield and Postharvest Fruit Quality of Apples". *Acta Horticulturae*, núm. 448, pp. 415-419.
- Fallahi, E., H. Khemira, T. L. Righetti y A. N. Azarenko (2002). "Influence of Foliar Application of Urea on Tree Growth, Fruit Quality, Leaf Minerals, and Distribution of Urea-derived Nitrogen in Apples". *Acta Horticulturae*, núm. 594, pp. 603-610.
- Faust, M. (1989). *Physiology of Temperate Zone Fruit Trees*. Wiley Interscience.
- Gilbert, M. A., J. González P., F. J. García H. y J. Meliau (2002). "A Generalized Soil-adjusted Vegetation Index". *Remote Sensing of Environment*, núm. 82, pp. 303-310.
- Graham, R. D. 1979. "Transport of copper and manganese to the xylem exudates of sunflower". *Plant Cell Environ.* 2: 139- 143.
- Guak, S., D. Neilsen, P. Millard, R. Wendler y G. H. Neilsen (2003). "Determining the Role of N Remobilization for Growth of Apple (*Malus domestica* Borkh.) Trees by Measuring Xylem-sap N Flux". *Journal of Experimental Botany*, núm. 54, pp. 2121-2131.
- Gutman, G., D. Tarpley, A. Ignatov y S. Olson (1995). "The Enhanced NOAA Global Land Dataset from the Advanced Very High Resolution Radiometer". *Bulletin of the American Meteorological Society*, núm. 76, pp. 1141-1156.
- Hanson J.B. 1984. "The function of calcium in plant nutrition". In *Advances in Plant Nutrition* (B. Tinker and A.

-
- Lauchli, eds.). Vol. 2, pp. 149-208. Praeger Scientific, New York.
- Hatfield, J. L., A. A. Gitelson y J. S. Schepers (2008). "Applications of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions". *Agronomy J. Supplement*, pp. 117-131.
- Hewitt E.J. 1983. *Metals and Micronutrients. Uptake and utilization by plants*. D.A. Robb y W.S. Pierpoint, editors. Academic Press. London. p. 277.
- Hickman, D. W. (1969). "Potassium as a Micronutrient for Aquatic Hyphomycetes". *Plant Physiology*, núm. 44, pp. 21-29.
- Huete, A. R. (1988). "A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI)". *Remote Sensing of Environment*, núm. 25, pp. 295-309.
- Inskip, W. P. y P. R. Bloom (1985). "Extinction Coefficients of Chlorophyll a and b in N, N-dimethylformamide and 80% Acetone". *Plant Physiology*, núm. 77, pp. 483-485.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2012). *Anuario estadístico, Chihuahua. Agricultura*. Cuadro 10.1. Superficies sembradas y cosechadas. Volumen y valor de la producción agrícola por tipo de cultivo, principales cultivos y municipios, p. 458.
- Imsande, J. 1998. "Iron, sulfur and chlorophyll deficiencies: a need for an integrative approach in plant physiology". *Physiol. Pant.* 103:139-144.
- Jacobo C., J. L., J. P. Amado A., M. R. Ramírez L., M. R. Ávila M., O. Ramírez V. y J. L. Jacobo M. (2011). "Recomendación nutrimental y correcciones de acidez en maíz de riego en el estado de Chihuahua". *Folleto Técnico*, núm. 25. Cuauhtémoc, Chihuahua: INIFAP-CIRNOC-CESICH.
- Jiang, P. y K. D. Thelen (2004). "Effect of Soil and Topographic Properties on Crop Yield in a North-Central Corn-soybean Cropping System". *Agronomy Journal*, núm. 96, pp. 252-258.
- Jiménez, V. M. (2009). *Propiedades ópticas del trigo y deficiencias del nitrógeno*. Colegio de Posgraduados.

-
- Jones, M. J. (1987). *Organic Chemistry*. New York: W. W. Norton and Company, pp. 77-91.
- Kilmer V.J., S.E. Younts and N.C. Brady (1968). "The role of potassium in Agriculture". *Plant and soil* 10: 221-254.
- Lawton, K. y R. L. Cook (1984). "El potasio en la nutrición de la planta". *Agronomy Journal*, núm. 34, pp. 125-136.
- Liu, H. Q. y A. Hute (1995). "A Feedback based Modification of the NDVI to Minimize Canopy Background and Atmospheric Noise". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, núm. 33, pp. 457-465.
- Marcar, N. E. y R. D. Graham (1987). "Genotypic Variation for Manganese Efficiency in Wheat". *J. Plant Nutr.*, núm. 10, pp. 2049-2055.
- Marschner, H. und C. Richter. 1973. Akkumulation und translocation von K⁺, Na⁺ und Ca²⁺ bei Angebot Zueinzelnen wurzelzonen von Maiskeimpflanzen. *Z. Pflanzenernahr. Bodenk.* 135, 1-15.
- Marschner H. 2002. *Mineral nutrition of higher plants*. 2d ed. Academic Press. London, England. 889 p.
- Meza, D. B. y G. A. Blackburn (2003). "Remote Sensing of Mangrove Biophysical Properties: Evidence from a Laboratory Simulation of the Possible Effects of Background Variation on Spectral Indices". *International Journal of Remote Sensing*, núm. 24, pp. 53-75.
- Meziane, D. y B. Shipley (2001). "Direct and Indirect Relationship between Specific Leaf Area, Leaf Nitrogen and Leaf Gas Exchange. Effects of Irradiance and Nutrient Supply". *Annals of Botany*, núm. 88, pp. 915-927.
- Miller, G. W., J. C. Pushnik and G. W. Welkie. 1984. *Iron chlorosis, a world wide problem, the relation of chlorophyll biosynthesis to iron*. *J. PLant Nutr.* 7: 1.22.
- Moog, P. R., and W. Brüggemann. 1994. "Iron reductase systems on the plant plasma membrane-A review". In: *Iron Nutrition in Soils and Plants*. (Ed. by J. Abadia), 343-362.
- Nava, G., A. R. Dechen y G. R. Nachtigall (2008). "Nitrogen and Potassium Fertilization Affect Apple Fruit Quality in

-
- Southern Brazil". *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, núm. 39, pp. 96-107.
- Neilsen, G. H. y D. Neilsen (1994). "Tree Fruit Zinc Nutrition", pp. 85-93. In: A. Brooke Peterson y Robert G. Stevens (eds.). *Tree Fruit Nutrition. A Comprehensive Manual of Deciduous Tree Fruit Nutrient Needs*. Yakima; Washington, D. C.: Good Fruit Grower.
- Neilsen, D., G. H. Neilsen, L. C. Herbert, P. Millard y S. Guak (2006). "Allocation of Dry Matter and N to Fruit and Shoots in Dwarf Apple in Response to Sink Size and N Availability". *Acta Horticulturae*, núm. 721, pp. 33-40.
- Ness, P. J. y H. W. Woolhouse (1980). "RNA Synthesis in Phaseolus Chloroplasts. I. Ribonucleic Acid Synthesis and Senescing Leaves". *J. Exp. Bot.*, núm. 31, pp. 223-233.
- Pala, V. y X. Pons (1996). "Incorporation of Relief in Polynomial-based Geometric Corrections". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, núm. 7, vol. 61, pp. 935-944.
- Peryea, F. J. (1994). "Boron Nutrition in Deciduous Tree Fruit", pp. 95-99. In: A. Brooke Peterson y Robert G. Stevens (eds.). *Tree Fruit Nutrition. A Comprehensive Manual of Deciduous Tree Fruit Nutrient Needs*. Yakima; Washington, D. C.: Good Fruit Grower.
- Peters, J. B. S. (1994). "Managing Fertigation: the Dutch Perspective", pp. 183-190. In: A. Brooke Peterson y Robert G. Stevens (eds.). *Tree Fruit Nutrition. A Comprehensive Manual of Deciduous Tree Fruit Nutrient Needs*. Yakima; Washington, D. C.: Good Fruit Grower.
- Pier, P.A. and G.A. Berkowits. 1987. "Modulation of water stress affects on photosynthesis by altered leaf K". *Plant physiol.* 655-66.
- Pinter, P. J., J. L. Hatfield, J. S. Schepers, E. M. Barnes, S. M. Morán, C. S. T. Daughtry y D. R. Upchurch (2003). "Remote Sensing for Crop Management". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, núm. 69, pp. 647-664.

-
- Quartieri, M., P. Millard y M. Tagliavini (2002). "Storage and Remobilisation of Nitrogen by Pear (*Pyrus communis* L.) Trees as Affected by Timing of N Supply". *European Journal of Agriculture*, núm. 17, pp. 105-110.
- Racskó, J., Z. Szabó y J. Nyéki (2005). "Effect of Nutrient Supply on Fruit Quality of Apple (*Malus domestica* Borkh.)". *Journal of Central European Agriculture*, núm. 6, pp. 35-42.
- Riaño, D., E. Chuvieco, J. Salas e I. Aguado (2003). "Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat TM Data for Mapping Vegetation Types". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, núm. 5, vol. 41, pp. 1056-1061.
- Ritchie, L. G. (2003). "Use of Ground-based Canopy Reflectance to Determine Ground Cover, Nitrogen and Water Status and Final Yield in Wheat". Utah State University Logan.
- Rouse, J. W., R. H. Hass, J. A. Schell, D. W. Deering y J. C. Harlan (1974). "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation". *NASA/GSFC Type III Final Report*. Greenbelt, M. D.
- Rufat, J., J. del Campo, M. Mata, A. Arbones, M. Gelly, J. Marsal y J. Girón (2002). "Respuesta productiva y vegetativa al riego y abonado nitrogenado en manzano Golden Delicious". *Fruticultura Profesional (Especial II)*, núm. 128, pp. 73-80.
- Ruimy, A., B. Sangier y G. Dediu (1994). "Methodology for the Estimation of Terrestrial Primary Production from Remotely Sensed Data". *Journal of Geophysical Research*, núm. 99 (D3), pp. 5263-5283.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross (1994). *Fisiología vegetal*, Grupo Editorial Iberoamericano, S. A. de C. V.
- Salsac L., S. Chailoo, J. F. Morot, C. Lesaint, E. Jolivet. 1987. *Nitrate and ammonium nutrition in plants. Plant Physiology and biochemistry*. 25 (6): 805-812.

-
- Sánchez, E. E., T. L. Righetti, D. Sugar y P. B. Lombard (1990 a). "Response of 'Comice' Pear Trees to a Postharvest Urea Spray". *Journal of Horticultural Science*, núm. 65, pp. 541-546.
- (1990 b). "Seasonal Differences, Soil Texture and Uptake of Newly Absorbed Nitrogen in Field-grown Pear Trees". *Journal of Horticultural Science*, núm. 65, pp. 395-400.
- Sandmann, G. y P. Boguer (1983). "The Enzymatological Function of Heavy Metals and their Role in Electron Transfer Processes of Plants", pp. 563-596. In: A. Lauchli y R. L. Bieleski (eds.). *Encyclopedia of Plant Physiology*, vol. 15 B. Inorganic Plant Nutrition New Series. Berlín, Alemania: Springer Verlag.
- Shanahan, J. F., K. H. Holland, J. S. Schepers, D. D. Francis, M. R. Schlemme y R. Caldwell (2003). "Use of a Crop Canopy Reflectance Sensors to Assess Corn Leaf Chlorophyll Content". *ASA Special Publication*, núm. 66, pp. 135-150.
- Shanahan, J. F., J. S. Schepers, D. D. Francis, G. E. Varvel, W. Wilhelm, J. M. Tringe, M. R. Schlemmer y D. J. Major (2001). "Use of Remote-sensing Imagery to Estimate Corn Grain Yield". *Agronomy J.*, núm. 93, pp. 583-589.
- Shear, B. C. y M. Faust (1980). "Nutritional Ranges in Deciduous Tree Fruit and Nuts". *Hort. Reviews*, núm. 2, pp. 142-163.
- Solari, F., J. Shanahan, R. B. Ferguson, J. S. Schepers y A. A. Gitelson (2008). "Active Sensor Reflectance Measurements of Corn Nitrogen Status and Yield Potential". *Agronomy J.*, núm. 100, pp. 571-579.
- Spencer, P. W. y J. S. Titus (1972). "Biochemical and Enzymatic Changes in Apple Leaf Tissue during Autumnal Senescence". *Plant Physiology*, núm. 49, pp. 746-750.
- Stiles, W. C. (1994). "Phosphorus, Potassium, Magnesium, and Sulfur Soil Management", pp. 63-70. In: A. Brooke Peterson y Robert G. Stevens (eds.). *Tree Fruit Nutri-*

-
- tion. *A Comprehensive Manual of Deciduous Tree Fruit Nutrient Needs*. Yakima; Washington, D. C.: Good Fruit Grower.
- Tagliavini, M., M. Quartieri y P. Millard (1997). "Remobilised Nitrogen and Root Uptake of Nitrate for Spring Leaf Growth, Flowers and Developing Fruits of Pear (*Pyrus communis* L.) Trees". *Plant and Soil*, núm. 195, pp. 137-142.
- Tagliavini, M., P. Millard, M. Quartieri y B. Marangoni (1999). "Timing of Nitrogen Uptake Affects Winter Storage and Spring Remobilisation of Nitrogen in Nectarine (*Prunus persica* var. nectarine) Trees". *Plant and Soil*, núm. 211, pp. 149-153.
- Toselli, M., J. A. Flore, C. Zavalloni y B. Marangoni (2000). "Nitrogen Partitioning in Apple Trees as Affected by Application Time". *HortTechnology*, núm. 10, pp. 136-141.
- Tucker, C. J. y P. Sellers (1986). "Satellite Remote Sensing of Primary Production". *International Journal of Remote Sensing*, núm. 7, pp. 1395-1416.
- Val, J., A. Blanco, A. y V. Fernández. 2002. "Avances en el control del bitter pit en Manzano". *Vida Rural*. 159:32-35.
- Valee, B. L. y D. S. Auld (1990). "Zinc Coordination, Function and Structure of Zinc Enzyme and Other Protein". *Biochem.*, núm. 29, pp. 5647-5659.
- Vermote, E. F., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman y J. J. Morcrette, J.J. (1997). "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: an Overview". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, núm. 3, vol. 35, pp. 675-686.
- Vicente-Serrano, S. M., F. Pérez-Cabello y T. Lasanta (2008). "Assessment of Radiometric Correction Techniques in Analyzing Vegetation Variability and Change using Time Series of Landsat Images". *Remote Sensing of Environment*.

-
- Vos, J., P. E. L. Van Der Putten y C. J. Birch (2005). "Effect of Nitrogen Supply on Leaf Appearance, Leaf Growth, Leaf Nitrogen Economy and Photosynthetic Capacity in Maize (*Zea mays* L.)". *Field Crops Research*, núm. 93, pp. 64-73.
- Walker, C. J. y J. D. Weinstein (1991). "Further Characterization of the Magnesium Chelatase in Isolated Developing Cucumber Chloroplasts". *Plant Physiology*, núm. 95, pp. 1189-1196.
- Warg O., J. M., I. A. Merwin y C. B. Watkind (2003). "Fruit Size, Yield, and Market Value of 'Gold Rush' Apple are Affected by Amount, Timing and Method of Nitrogen Fertilization". *HortTechnology*, núm. 13, pp. 153-161.
- Weinbaum, S. A., I. Klein, F. E. Broadbent, W. C. Micke y T. T. Muraoka (1984). "Effects of Nitrogen Application and Soil Texture on the Availability of Isotopically Labeled Fertilizer Nitrogen to Reproductive and Vegetative Tissue of Mature Almond Trees". *Journal of the American Society for Horticultural Science*, núm. 109, pp. 339-343.
- Wu, W., J. S. Peters y G. A. Berkowitz (1991). "Surface Change Mediated Effects of Mg^{2+} on K^+ Flux Across the Chloroplast Envelope are Associated with Regulation of Stromal pH and Photosynthesis". *Plant Physiology*, núm. 97, pp. 580-587.
- Yoshioka, H., T. Miura, A. R. Hute y B. D. Gamapol (2000). "Analysis of Vegetation Isolines in Red-nir Reflectance Space". *Remote Sensing of Environment*, núm. 74, pp. 313-326.
- Yuri, J. A. (2002). "El receso en frutales". *Boletín Técnico*, núm. 4, vol. 2. Centro de Pomáceas/Universidad de Talca, p. 4.

UACJ

Esta obra se terminó de imprimir
en agosto de 2014
en Talleres Gráficos del Gobierno del Estado,
Calle 4ta. No. 3013, Colonia Sector Bolívar.
Chihuahua, México.

Tiraje: 300 ejemplares

