



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE LA DEFICIENCIA
DE MAGNESIO EN PEPINO MEDIANTE
ESPECTRORADIOMETRÍA**

MARÍA DEL ROCIO AGUILAR RAMÍREZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2011

La presente tesis titulada: “**Identificación de la deficiencia de magnesio en pepino mediante espectroradiometría**”, realizada por el alumno: **María del Rocío Aguilar Ramírez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

ASESOR

DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR

DR. ENRIQUE OJEDA TREJO

Montecillo, Texcoco, México, mayo de 2011

IDENTIFICACIÓN DE LA DEFICIENCIA DE MAGNESIO EN PEPINO MEDIANTE ESPECTRORADIOMETRÍA

María del Rocío Aguilar Ramírez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

La utilización de sensores remotos se describe como una técnica de diagnóstico nutrimental promisorio en diferentes aspectos de la agricultura. En este sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar estrés por magnesio en pepino, a través de técnicas de percepción remota. Se determinó la reflectancia de hojas recientemente maduras de pepino mediante el uso de Radiómetro, y de imágenes obtenidas con escáner y con cámara digital; también se estimó la concentración de clorofila utilizando un medidor portátil (SPAD 502) y la concentración de magnesio de referencia fue determinada por espectrofotometría de emisión atómica. A partir de estas mediciones se generaron modelos de tipo polinómico, logarítmico y exponencial para relacionar las propiedades ópticas con la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras. El método que utilizó las imágenes de escáner fue el que presentó el modelo matemático con mayor grado de asociación ($R^2 = 0.89$), y mostró potencial para extenderse a campo, sin embargo se requiere estandarizar los procesos de obtención de reflectancias y establecer modelos para diferentes cultivos.

Palabras clave: sensores remotos, propiedades ópticas, firmas espectrales, magnesio, reflectancia.

IDENTIFICATION OF MAGNESIUM DEFICIENCY IN CUCUMBER BY SPECTRORADIOMETRY

María del Rocío Aguilar Ramírez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

The use of remote sensing is described as a promising nutrient diagnosis technique in different aspects of agriculture. In this sense, the present study was established to determine magnesium stress in cucumber, through remote sensing techniques. Reflectance was determined in recently mature leaves of cucumber through the use of radiometer and images obtained with scanner and digital camera, also the concentration of chlorophyll was estimated using a portable meter (SPAD 502). The concentration of magnesium in leaves was determined by atomic emission spectrophotometry. From these measurements were generated models polynomial, logarithmic and exponential to relate the optical properties with magnesium concentration in recently mature leaves. The scan images method presented the mathematical model with the highest degree of association ($R^2 = 0.89$), and showed potential to be expanded into field conditions, however is required to standardize reflectance measurements and establish models for different crops.

Key words: remote sensing, optical properties, spectral signatures, magnesium, reflectance.

Dedicatoria

A mis padres María Ramírez y Ricardo Aguilar, por su cariño, por hacerme una persona de bien y enseñarme el significado del trabajo, el valor de la honradez y la responsabilidad, por su apoyo constante e incondicional.... nunca terminaré de agradecerles todo lo que me dan.... siempre los llevo conmigo... Los quiero!!!

A mis hermanos Ramiro, Ricardo, Angélica, Lalo, Marisol, Lupita y Paco, por los buenos y malos momentos que hemos compartido y por el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis sobrinos Tef, Maritex y Manuzlito por su inocencia, simpatía y por regalarme tanta alegría.

A Jean Paul por el cariño que me demuestra siempre, por su apoyo y confianza.... gracias por estar conmigo compartiendo un pedacito de tu vida.

A mis amigos que han formado parte importante a lo largo de mi vida.

Con cariño y admiración..... Chio...

AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarme la vida, por darme la fortaleza necesaria en momentos difíciles y por llenarme de tantas bendiciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para llevar a cabo mis estudios de postgrado.

A los Drs. Gabriel Alcántar, Prometeo Sánchez García y Enrique Ojeda, miembros de mi Consejo Particular, quienes me han acompañado durante el largo camino para la realización de este proyecto, por sus aportaciones y observaciones realizadas a la presente investigación.

Al Dr. Volke por su valiosa participación para culminar este proceso.

Al M. C. Jairo de la Cruz por el apoyo brindada en la toma de datos y durante todo el proceso de investigación, por su sencillez.

A todas y todos quienes de una u otra forma han colocado un granito de arena para el logro de este trabajo, agradezco de forma sincera su valiosa colaboración.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1. REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.1. Importancia del pepino.....	3
1.1.1. Generalidades del cultivo.....	3
1.1.2. Producción y comercialización del pepino	4
2.2. Magnesio en la planta	7
2.2.1. Absorción de magnesio en las plantas.....	9
2.2.2. El papel de magnesio en la fotosíntesis.....	10
2.2.3. Consecuencias fisiológicas del desbalance de magnesio.....	11
2.2.4. Magnesio en pepino.....	12
2.3. Técnicas de diagnóstico nutrimental	13
2.3.1. Análisis químico de tejido vegetal	14
2.3.2. Medidor portátil de clorofila SPAD-502	15
2.3.3. Radiómetro.....	15
2.3.4. Uso de imágenes digitales (cámara digital y escáner)	16
2.4. Interacción de la radiación y la materia	19
2.5. Percepción remota	20

2.6. Estrés nutrimental y reflectancia espectral	24
2.7. Índices espectrales.....	26
2.8. Aplicación de los sensores remotos en la agricultura.....	29
2. OBJETIVOS.....	30
Objetivo general	30
Objetivos específicos	30
3. HIPÓTESIS.....	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
5.1. Sitio experimental.....	31
5.2. Producción de plantas.....	31
5.3. Solución nutritiva	31
5.4. Diseño experimental y tratamientos	32
5.5. Variables respuesta.....	33
5.5.1. Reflectancia de la planta medida con radiómetro	34
5.5.2. Reflectancia de la planta obtenida a partir de fotografías	34
5.5.3. Concentración de clorofila en hoja estimada con SPAD-502.....	35
5.5.4. Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes con escáner	35
5.5.5. Concentración de magnesio en hojas recientemente maduras.....	36
5.6. Análisis estadístico.....	36
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37

6.1. Firma espectral.....	37
6.2. Concentración de magnesio en hojas recientemente maduras	38
6.3. Estimaciones de la concentración de clorofila con SPAD-502	40
6.4. Relación entre las concentraciones de magnesio y de clorofila en hojas.....	41
6.5. Reflectancia de plantas obtenida con radiómetro.....	42
6.6. Reflectancia de plantas, obtenida de fotografías.....	45
6.7. Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes de escáner	47
6.8. Relación entre la reflectancia medida con el escáner y las mediciones de SPAD	49
6.9. Índices espectrales.....	51
6. CONCLUSIONES	52
7. BIBLIOGRAFÍA.....	53
8. ANEXOS.....	66
Anexo 1. Conceptos de radiación.....	66
Anexo 2. Instrucciones para obtener la reflectancia del tejido vegetal en bandas azul, verde y roja, utilizando el paquete de cómputo Idrisi Andes.	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Extracción de nutrientes en el cultivo de pepino (Navarrete, 2005).....	4
Cuadro 2. Principales estados productores de pepino (SIAP, 2010).....	5
Cuadro 3. Principales países exportadores de pepino FAOSTAT (2009)	6
Cuadro 4. Producción mundial de pepino (FAOSTAT, 2009).....	7
Cuadro 5. Uso de sensores remotos en la Agricultura	18
Cuadro 6. Bandas espectrales más frecuentemente empleadas en teledetección (Verstraete y Pinty, 1991).....	24
Cuadro 7. Índices espectrales para el análisis de las propiedades de reflectancia de la hoja.....	27
Cuadro 8. Descripción de los tratamientos.....	33
Cuadro 9. Efecto de los tratamientos en la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras.....	39
Cuadro 10. Efecto de los tratamientos en la concentración de clorofila.	40
Cuadro 11. Modelos para estimar concentración de clorofila a partir de la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras. ¡Error! Marcador no definido.	
Cuadro 12. Efecto de los tratamientos en el porcentaje de reflectancia.....	42
Cuadro 13. Efecto de los tratamientos en reflectancia (%) obtenida con fotografías. 45	
Cuadro 14. Efecto de los tratamientos en porcentaje de reflectancia obtenida con imágenes de escáner.	47

Cuadro 15. Modelos para estimar la reflectancia de hojas recientemente maduras de pepino a partir de la concentración de clorofila medida con SPAD. 49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Participación de principales países exportadores de pepino (FAOSTAT, 2009). 5

Figura 2. Participación por país productor de pepino (FAOSTAT, 2009). 6

Figura 3. Participación de principales países importadores de pepino (FAOSTAT, 2009). 7

Figura 4. Interacciones entre la energía electromagnética y un cuerpo de agua (Lillesand y Kiefer, 1994). 19

Figura 5. Firma espectral de distintas coberturas terrestres (Alonso *et al.*, 1999). 20

Figura 6. Firma espectral de un cultivo de maíz sano (a) y uno con estrés (b) (Jackson *et al.*, 1983). 21

Figura 7. Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo. 22

Figura 8. Características de distintas regiones del espectro electromagnético. Nótese que el color puede expresarse cuantitativamente por su longitud de onda (Brown *et al.*, 2004). 23

Figura 9. Plantas “quemadas” por la helada ocurrida el 4 de noviembre de 2010. ... 32

Figura 10. Ejemplo de las fotografías utilizadas en la investigación. 34

Figura 11. Imagen de hojas de pepino obtenidas con escáner. 35

Figura 12. Firmas espectrales obtenidas el 27 de octubre (a) y 3 de noviembre del mismo año. 37

Figura 13. Efecto de los tratamientos en la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras de plantas de pepino.....	39
Figura 14. Efecto de los tratamientos en el contenido de clorofila (lecturas SPAD) en hojas recientemente maduras de plantas de pepino.	40
Figura 15. Relación entre concentración de magnesio y clorofila en plantas de pepino	41
Figura 16. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia medida con radiómetro a 510 y 560 nm.....	43
Figura 17. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia medida con radiómetro a 610, 660 y 830 nm.....	44
Figura 18. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia, obtenida con fotografías, en las bandas azul, verde y roja.	46
Figura 19. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia, obtenida con imágenes de escáner, en las bandas azul, verde y roja.....	48
Figura 20. Relación entre la clorofila medida con SPAD y la reflectancia en la banda azul de hojas de pepino recientemente maduras.	49
Figura 21. Relación entre la clorofila medida con SPAD y la reflectancia en la banda verde y roja de hojas de pepino recientemente maduras.....	50
Figura 22. Relación entre la tasa NDVI 560nm/NDVI 660nm y el porcentaje de magnesio.....	51

1. INTRODUCCIÓN

Para la economía agrícola del país, el sector de las hortalizas reviste una particular importancia por su contribución en la generación de divisas y empleo. El tomate, melón, sandía y el pepino son de las más importantes y para el caso del pepino, México es segundo exportador mundial. A pesar de ser poco nutritivo con más del 90% de agua, es rico en vitamina A y C, además contiene azufre, por lo que se utiliza en la industria cosmética (Comisión Veracruzana, 2009).

La nutrición es un factor muy importante que limita la producción, cantidad y calidad de las hortalizas. Para establecer las necesidades nutrimentales de los cultivos y determinar acerca de la dosis y los fertilizantes que deben aplicarse, es necesario conocer su estado nutrimental. El objetivo de diagnosticar el estado nutrimental con antelación a la aplicación o suministro de fertilizantes es conocer las concentraciones de los elementos esenciales que pudiesen ser deficitarias y limitantes para alcanzar los rendimientos máximos posibles. Con dicha información es posible proceder con oportunidad a la solución del problema. También un diagnóstico anticipado permite hacer frente a los problemas de contaminación que se pueden originar por un exceso transitorio de fertilizantes en el suelo (Cadahia, 2000).

Existen numerosos métodos para el diagnóstico del estado nutrimental de los cultivos; algunos se basan en el análisis químico del tejido vegetal, con el que se obtendrían resultados en 48 ó 72 horas, debido al secado y preparación previos al análisis, además se cuenta con poca información sobre normas complicadas o intervalos de suficiencia nutrimental para la interpretación de los resultados (Mills y Jones, 1996; Cadahía, 2000). Por otro lado, la percepción remota implica la medición de energía reflejada o emitida por objetos, sin entrar en contacto con ellos. Cada objeto examinado por percepción remota refleja un único espectro de longitudes de onda. Los sensores remotos se han utilizado para detectar diferentes problemas tales como el estrés hídrico, estrés por deficiencias nutrimentales, rendimiento e índices de cosecha, además de ser incorporados a la agricultura de precisión.

Plantas en crecimiento saludable reflejan más luz verde que plantas enfermas, marrones o amarillas (Palacios y Palacios-Sánchez, 2003).

La percepción remota ofrece una solución para abatir los costos asociados con la detección de estrés en plantas a diferentes escalas en la agricultura protegida (De la Cruz, 2008). La radiación solar interactúa con los compuestos químicos importantes para el crecimiento y funcionamiento de las plantas, resultando en características de reflectancia identificables (Curran, 1989).

Desde la década de 1960 se han realizado estudios acerca de los fenómenos que ocurren en la interacción de la luz con el tejido vegetal (Gates *et al.*, 1965 y Thomas *et al.*, 1967). Dichos trabajos demuestran la posibilidad de usar índices de reflectancia para determinar el estado nutrimental de la planta.

En el presente trabajo se pretende identificar estrés por magnesio en plantas de pepino, con base en características de reflectancia de las hojas, y de esta manera desarrollar un procedimiento de diagnóstico nutrimental rápido, confiable y económico.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Importancia del pepino

Para la economía agrícola del país, el subsector de producción de hortalizas reviste una particular importancia. La contribución de divisas y la generación de empleo rural, lo ubica como una de las actividades más relevantes dentro de nuestra agricultura. Entre otras, la actividad productiva de pepino es, sin duda, de las más notables (INFOASERCA, 2010).

Actualmente, México es el segundo exportador mundial de esta hortaliza y el primer proveedor del mercado estadounidense de pepino (INFOASERCA, 2010).

1.1.1. Generalidades del cultivo

El pepino pertenece a la familia de las cucurbitáceas y su nombre científico es *Cucumis sativus* L. El cultivo es originario de las regiones tropicales del sur de ASIA; ha sido cultivado en la India desde hace más de 3000 años. Dentro de las características generales de la especie tenemos que es un cultivo anual, herbáceo, de crecimiento rastrero e indeterminado (Maroto, 2002).

La temperatura óptima para la germinación del pepino es de 20-35 °C. Para la formación de la planta se considera una temperatura óptima de 21/19 °C (diurna/nocturna), mientras que en la etapa de desarrollo del cultivo se recomienda mantener una temperatura de 19/16 °C (diurna/nocturna). Temperaturas de 20 a 30 °C durante el día modifican muy poco la producción. No obstante, por encima de los 30 °C se observan desequilibrios en las plantas que afectan directamente a los procesos de fotosíntesis, respiración y temperaturas nocturnas iguales o inferiores a 17 °C ocasionan malformaciones en hojas y frutos (García, 2007).

El pepino es una planta con elevados requerimientos de humedad, debido a su gran superficie foliar, siendo la humedad relativa óptima durante el día del 60-70% y durante la noche del 70-90% (García, 2007).

En lo referente a luminosidad el pepino es una planta que crece, florece y fructifica con normalidad incluso en días cortos (con menos de 12 horas luz), aunque también soporta elevadas intensidades luminosas y a mayor cantidad de radiación solar, mayor es la producción (Comisión Veracruzana, 2009).

En cuanto a la nutrición el cultivo de pepino demanda cantidades específicas de nutrientes según la etapa de desarrollo en que se encuentra. El que más extrae la planta es el potasio (K), seguido del nitrógeno (N), calcio (Ca) y fósforo (P). La mayoría de nutrientes son absorbidos en mayor cantidad durante la fructificación y la maduración (Cuadro 1) (Navarrete, 2005).

Cuadro 1. Extracción de nutrientes en el cultivo de pepino (Navarrete, 2005)

DDT	Kg.ha ⁻¹										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B
10	3.1	0.6	3.5	1.3	0.3	0.2	0	0	0	0	0
23	17.2	4.4	28.7	8.9	2.5	2.6	0	0.1	0	0	0
33	30.2	12.3	70.5	20.1	6.8	0	0	0.2	0.1	0.1	0
75	76.3	22.8	176.2	38.3	7.9	14.8	0.1	0.2	0	0.1	0.1
Total	126.8	40.1	278.9	68.6	17.5	17.6	0.1	0.5	0.1	0.2	0.1

DDT= Días después del trasplante

1.1.2. Producción y comercialización del pepino

El cultivo del pepino tiene un elevado índice de consumo, pues sirve de alimento tanto en fresco como industrializado. El cultivo de esta hortaliza mantiene estabilidad en la superficie cultivada, con un aumento en la producción y las exportaciones que están en el orden de 430,000 ton (García, 2007).

La superficie cosechada de pepino en México para 2008 fue de 17,139 ha., con una producción total para el mismo año de 475,376 ton. El rendimiento promedio para el 2009 fue de 27.7 ton. ha⁻¹ (FAOSTAT, 2010).

En el 2010 los estados con mayor superficie sembrada de pepino fueron Michoacán con 3,644 ha, y una producción de 46,472 ton., seguido de Sinaloa y Morelos con 3,315 y 506 has sembradas respectivamente. En el estado de Sinaloa se reportan

los mayores rendimientos con cerca de 52 ton.ha⁻¹, enseguida están Baja California, Yucatán y Sonora. Respecto a la producción de pepino, Sinaloa también es líder con 171,571 ton. producidas en 3,300 has sembradas (Cuadro 2) (SIAP, 2010).

Cuadro 2. Principales estados productores de pepino (SIAP, 2010)

Estado	Superficie (ha)		Producción (ton)	Rendimiento (ton.ha ⁻¹)
	Sembrada	Cosechada		
Michoacán	3,644	2,901	46,472	16.017
Sinaloa	3,315	3,303	171,571	51.951
Morelos	506	452	8,526	18.88
Sonora	326	277	5,917	21.36
Nayarit	238	213	2,136	10.04
Guanajuato	230	170	2,806	16.506
Veracruz	208	162	3,995	24.662
Yucatán	190	181	5,882	32.488
Baja California	188	172	7,228	42.136
Tamaulipas	160	160	2,280	14.25

Para el 2007 la FAOSTAT reporta a México como el primer exportador mundial de pepino con 428,379 ton., lugar que comparte con España, ambos países participan con el 13% del total de exportaciones mundiales (Figura 1).

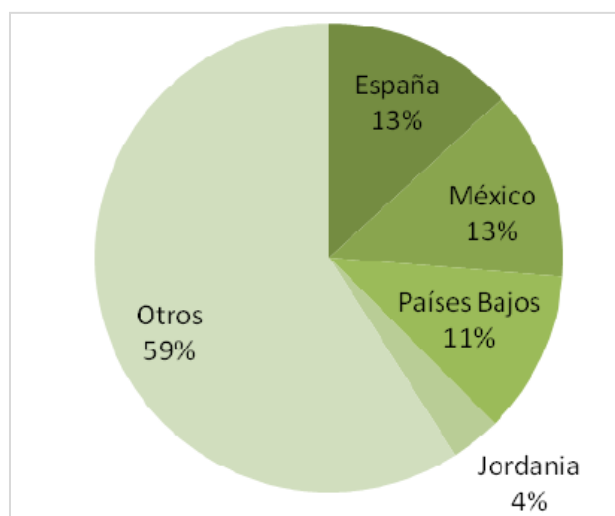


Figura 1. Participación de principales países exportadores de pepino (FAOSTAT, 2009).

Los principales países exportadores de pepino a nivel mundial son España y México, ambos con cerca de 430,000 ton de pepino exportadas en el 2007, seguido de los Países Bajos y Jordania (Cuadro 3) (FAOSTAT,2009).

Cuadro 3. Principales países exportadores de pepino FAOSTAT (2009)

PAIS	Cantidad exportada (ton)				
	2003	2004	2005	2006	2007
España	372,564	399,256	381,399	390,286	429,104
México	423,323	398,971	397,586	434,193	428,379
Países Bajos	351,064	360,054	359,389	343,536	366,680
Jordania	51,618	64,308	69,646	79,419	119,880
Otros	1,613,076	1,690,345	1,718,717	2,355,553	1,926,276

La producción mundial de pepino está localizada en un 74% en países tales como China con un 63%, lo cual lo convierte en el principal productor del cultivo, seguido de Irán, Turquía y la Federación Rusa. En el lugar 12 se ubica México con un volumen de producción de 475,376 ton. (Figura 2) (FAOSTAT,2009).

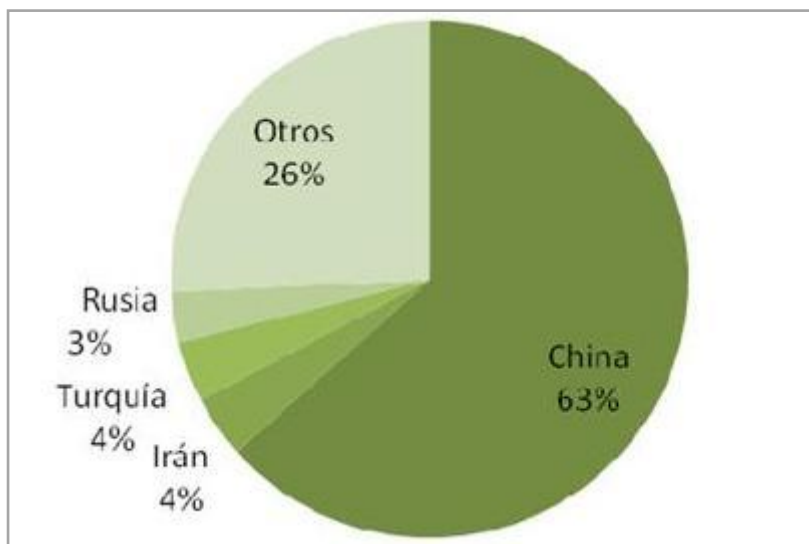


Figura 2. Participación por país productor de pepino (FAOSTAT, 2009).

En los últimos cinco años, la producción mundial de pepino, se ha mantenido arriba de 40,000,000 de ton (Cuadro 4) (FAOSTAT, 2009).

Cuadro 4. Producción mundial de pepino (FAOSTAT, 2009).

Producción (ton)				
2003	2004	2005	2006	2007
41,372,258	41,976,258	42,963,092	44,545,703	44,240,338

Los mayores importadores de pepino a nivel internacional son Alemania y Estados Unidos con una participación del 15% cada uno, seguido de Reino Unido y Rusia (Figura 3) (FAOSTAT, 2009).

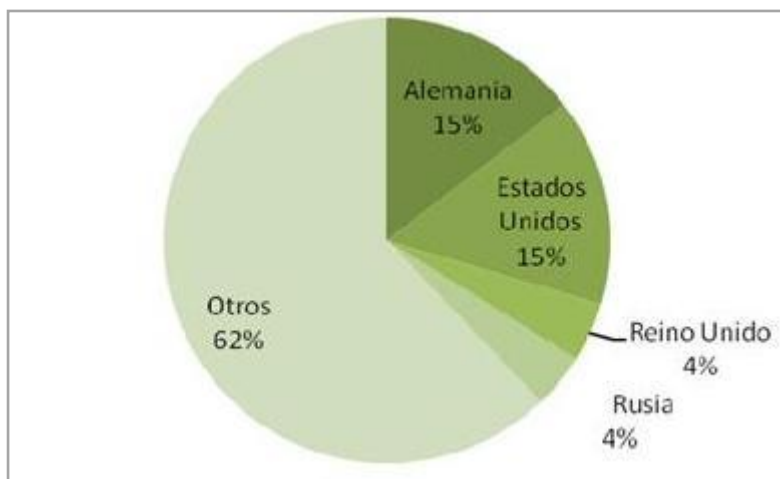


Figura 3. Participación de principales países importadores de pepino (FAOSTAT, 2009).

2.2. Magnesio en la planta

El magnesio es el catión divalente libre más abundante en el citosol de las plantas. Es el átomo central de la molécula de clorofila, y las variaciones de sus niveles en el cloroplasto regulan la actividad de enzimas clave para la fotosíntesis, además es un elemento puente para la agregación de ribosomas, lugar donde se sintetizan las proteínas (Orit, 2002).

El magnesio es un elemento nutritivo esencial para el desarrollo de las plantas, porque desempeña un papel importante en la constitución de la clorofila, base de la fotosíntesis (Papenbrock *et al.*, 2000).

En general el magnesio es absorbido y acumulado por las plantas en cantidades menores que el calcio o el potasio y similares al fósforo y azufre. En los vegetales el magnesio forma principalmente enlaces de tipo iónico, aunque también tiene un papel importante como elemento puente formando complejos de diferentes estabildades. Las sales de magnesio participan de forma significativa en la regulación del pH celular y del balance anión- catión. Sin duda, la función principal del magnesio como elemento constitutivo de la clorofila es la más importante. La biosíntesis de clorofila requiere de la inserción de magnesio en la estructura de la porfirina para formar la Mg- protoporfirina, reacción que es además catalizada por la enzima Mg- quelatasa (Alcántar *et al.*, 2008).

El magnesio adicionalmente tiene otra función esencial como constitutivo de los ribosomas, también sirve como puente entre los ácidos ribonucleicos, para mantener la agregación de las subunidades de los ribosomas (Alcantar *et al.*, 2008).

El magnesio es un cofactor de acercamiento de todas las enzimas que actúan sobre substratos fosforilados (cinasas), favoreciendo el acoplamiento de tipo quelatante (enlaces coordinativos) entre la estructura pirofosfatada y la enzima, o bien el substrato y es por lo tanto de gran importancia en el metabolismo energético (fotosíntesis, glucólisis, ciclo de Krebs). Con frecuencia el Mg^{2+} puede ser substituido por el Mn^{2+} , aunque la eficiencia de este último respecto a las fosfoquinasas (enzimas que transfieren grupos fosfatos con elevado intercambio de energía) y a las fosfotransferasas (enzimas que transfieren grupos fosfatos con bajo intercambio de energía) no es tan grande como la de Mg^{2+} (Alcántar *et al.*, 2008).

Hay una larga lista de enzimas o reacciones enzimáticas que requieren o son activadas por el Mg^{2+} , pero una reacción clave en donde participa es la regulación de la RuBP carboxilasa en el estroma del cloroplasto. La actividad de esa enzima es altamente dependiente del magnesio y del pH (Pierce, 1986).

El magnesio es absorbido por la planta como Mg^{2+} y en ella se halla normalmente una concentración que va del 0.15- 1% en peso seco. En la planta, el magnesio es un constituyente principal en la molécula de clorofila, pigmento esencial para que las plantas verdes puedan llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis. Cuantitativamente el magnesio clorofílico solo representa, aproximadamente, alrededor del 10-12 % del total contenido en la planta. También se encuentra asociado a diversos aniones orgánicos como son: malato, nitrato, pectato y oxalato, en semillas, ramas, hojas y troncos. Las semillas son generalmente ricas en magnesio. La fitina, sal cálcico-magnésica del fosfato de inositol, constituye en estos órganos de la planta una sustancia de reserva importante. El magnesio, por tanto, no solo está presente en las partes verdes de la planta sino que además se encuentra en proporciones notables en plantas sin clorofila, como los hongos. A diferencia del calcio, el magnesio es muy móvil en el floema (un 70% se considera como difusible), y puede trasladarse fácilmente de las hojas viejas a las jóvenes en caso de deficiencia. Por ello, cuando ésta se presenta, los primeros síntomas aparecen en las hojas adultas (Navarro y Navarro, 2003).

2.2.1. Absorción de magnesio en las plantas

La absorción de minerales en las plantas ocurre en la raíz. La capa celular externa de la raíz se llama epidermis o rizodermis, e internos a esta capa se encuentra la corteza. La capa más interna de células de la corteza es la endodermis. La endodermis rodea la estela, integrado por de una capa de células periciclo alrededor del tejido vascular.

Hay dos formas para el movimiento de solutos de la solución del suelo hacia la estela, la vía apoplásmica, pasando por las paredes de la célula y el espacio extracelular, y la vía simplásmica, que pasa de célula a célula en el citoplasma por los plasmodesmos (Marschner, 1995).

La absorción de iones inorgánicos tiene lugar a través de la epidermis de la raíz. El camino principal que siguen los iones desde la epidermis de la raíz a la endodermis es simplásmico. El movimiento radial de los iones continúa en el simplasto cortical,

de protoplasto a protoplasto, vía plasmodesmos a través de la endodermis y se incorporan a las células del parénquima del cilindro vascular. Desde las células del parénquima cortical, los iones son secretados al xilema (vasos o traqueidas) por un mecanismo de transporte activo mediado por transportadores. Los cationes divalentes pueden entrar en la raíz vía simplásmica por su gradiente de potencial electroquímico.

Una forma posible de entrada de Mg^{2+} puede ser a través de supuestos homólogos del canal RCA observados en las raíces de trigo. El canal de RCA se define como un canal de calcio, pero es permeable a una amplia variedad de cationes monovalentes y bivalentes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , K^+ y Na^+ (Piñeros y Tester 1997; Piñeros y Tester, 1995; White *et al.*, 2000). Además de los canales, la absorción de cationes en la raíz también se da por transportadores (Orit, 2002).

2.2.2. El papel de magnesio en la fotosíntesis

Los cloroplastos de las plantas superiores están rodeados por un sistema de doble membrana. El cloroplasto contiene también un sistema de membranas interna, la membrana de los tilacoides, que encierra un espacio interno que capta la luz. El estroma es el líquido que rodea los tilacoides. La membrana tilacoidal contiene una Multi-Proteína fotosintética, complejos fotosistemas I y II, que incluyen la clorofila, la molécula que captura la luz. El papel más conocido del magnesio en la fotosíntesis es ser el átomo central de la molécula. La inserción de magnesio en la estructura de la porfirina en la clorofila II, la formación está catalizada por la enzima Mg^{2+} quelatasa (Papenbrock *et al.*, 2000).

La sustitución de magnesio en la clorofila por metales pesados (Hg^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) altera el proceso de fotosíntesis y esto puede causar daños importantes en plantas estresadas (Kupper *et al.*, 1996, 1998).

El magnesio desempeña otras funciones fundamentales tanto en la fase oscura como luminosa de la fotosíntesis. En la fase luminosa, energiza la luz de bombeo de protones en el estroma dentro de los tilacoides, y el pH facilita la conversión de ADP

y NADP⁺ en ATP y NADPH, respectivamente. En la llamada fase oscura (que en realidad ocurre durante el día ya que algunos procesos de las enzimas requieren la activación por la luz) las enzimas ubicadas en el estroma utilizan los compuestos de alta energía producidos en la fase luminosa para reducir el CO₂ a carbohidratos (Papenbrock et al., 2000).

2.2.3. Consecuencias fisiológicas del desbalance de magnesio

La concentración óptima de magnesio para el crecimiento de las plantas esta en el rango de 0.15-0.35% del peso seco de las partes vegetativas. Los excesos de magnesio podrían inhibir el crecimiento de las plantas y reducir la tasa de fotosíntesis en las hojas, en particular durante los periodos de sequia (Orit, 2002).

La proporción celular de magnesio unido a la clorofila depende en gran medida de la cantidad de magnesio libre y oscila entre el 6% en las hojas con alto contenido de magnesio y un 25-35% en hojas deficientes de magnesio (Orit, 2002). En la mayoría de los casos, el crecimiento es interrumpido y los síntomas visuales de la deficiencia de magnesio se producen cuando la proporción de la concentración de magnesio unido a la clorofila excede un 20-25% (Marschner 1995).

La clorosis de las hojas completamente expandidas es el síntoma más visible de la deficiencia de magnesio. La deficiencia en la planta también afecta el transporte de los carbohidratos desde donde se sintetizan, lo que ocasiona que el contenido de almidón disminuya de los tejidos de almacenamiento. La acumulación de carbohidratos en las hojas aumenta la reacción oxigenasa de la Rubisco y por lo tanto la formación de radicales superóxido (O₂) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en hojas deficientes de magnesio; por lo tanto es altamente fotosensible. La deficiencia de magnesio también perjudica el crecimiento de raíces y por lo tanto la adquisición de la nutrientes minerales y de agua. Similar a otros cationes, la deficiencia de magnesio en la planta puede ser inducida no sólo por su limitación absoluta en el suelo, sino también por otros cationes que compiten con él para unirse a las cargas negativas de la raíz (Marschner 1995).

La absorción de magnesio por las plantas se ve estimulada por los nitratos, en cambio algunos otros iones antagonizan con su absorción o agravan la deficiencia de magnesio en las plantas. Tal es el caso del amonio, fosfatos, potasio, calcio, hidrógeno y sulfatos. En México se han identificado deficiencias de magnesio en los huertos de cítricos de los suelos calcáreos de Nuevo León, debido a su amplia relación calcio/magnesio (Núñez, 2008).

Las deficiencias de magnesio son comunes en suelos arenosos de regiones lluviosas; las adiciones abundantes de sales fertilizantes, especialmente de potasio, cloruros y sulfatos, ayudan a lavar el magnesio del perfil del suelo y a desarrollar su deficiencia, lo mismo que el uso de agua de riego con un alta relación Ca/Mg (Núñez, 2008).

Se han reportado toxicidades por exceso de magnesio en suelos muy ricos en este elemento, que más bien han sido deficiencias inducidas de calcio o potasio (Núñez, 2008).

El magnesio al ser un elemento esencial también para los animales, estos pueden desarrollar hipomagnesemia en pastizales de gramíneas creciendo en suelos ricos en potasio y pobres en magnesio (Havlin *et al.*, 1999).

2.2.4. Magnesio en pepino

El problema de desequilibrio nutricional más común en el cultivo de pepino es la falta de magnesio. La carencia de este elemento puede deberse al bloqueo por niveles altos de potasio. La falta de este mineral se manifiesta por el apareamiento en un principio de un color amarillento en los bordes de las hojas más viejas, que luego se va extendiendo hasta las nervaduras, volviéndose de color marrón; si la deficiencia no se corrige, los síntomas se extienden hacia la parte superior de la planta, disminuyendo el vigor y la actividad fotosintética (López, 2003).

2.3. Técnicas de diagnóstico nutrimental

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

Los procedimientos para realizar el diagnóstico nutricional pueden agruparse en técnicas de campo y de laboratorio. Las primeras comprenden al diagnóstico visual y a las pruebas rápidas semicuantitativas, en tanto que las segundas engloban a los análisis químicos de suelo, solución de suelo, tejido vegetal, savia y agua de riego (Jiménez, 2009).

Entre los análisis que se hacen durante el crecimiento de la planta se encuentran: análisis de la solución del suelo, análisis químico de la planta y diagnóstico visual (Etchevers, 1997).

En la actualidad los métodos de diagnóstico en la nutrición de cultivos se están utilizando en una manera exhaustiva, los más comúnmente empleados son el diagnóstico visual, análisis químico de tejido vegetal, diagnóstico funcional, entre otros. Con el propósito de obtener mejores resultados se recomienda utilizar dos o más técnicas de diagnóstico (Sánchez *et al.*, 2008).

La percepción remota ofrece actualmente una solución viable para abatir los costos asociados con la detección de estrés en plantas a diferentes escalas en la agricultura protegida. La radiación solar interactúa con muchos de los compuestos químicos importantes para el crecimiento y funcionamiento de las plantas, resultando en características de reflectancia identificables (Curran, 1989).

2.3.1. Análisis químico de tejido vegetal

El análisis químico de tejido vegetal es la técnica de diagnóstico principalmente empleada en la nutrición integral de cultivos (De la Cruz, 2008).

Es importante destacar que no es necesario analizar la planta entera para evaluar la fertilidad del suelo o las necesidades de abonamiento, en lugar de ello, es suficiente realizar el análisis de un órgano representativo; de un modo general, la hoja recién madura, aquella cuyo crecimiento terminó y que aún no ha entrado en senescencia refleja bien el estado nutricional de la planta (Malavolta, 1981).

Del análisis químico de plantas, existen tres variantes (Etchevers, 1997):

- 1) Parte aérea de la planta; con dos modalidades: a) Análisis secuencial, que se practica periódicamente en la planta entera desde el comienzo del crecimiento hasta la madurez del cultivo y tiene como finalidad conocer la dinámica de absorción de la planta, b) análisis único final, se realiza al fin del ciclo de crecimiento, sirve para conocer la cantidad total de elementos absorbida por el cultivo.
- 2) Análisis de hoja u otros órganos de referencia durante el periodo de crecimiento.
- 3) Análisis de savia durante el periodo de crecimiento.

El nivel crítico es la concentración de un nutriente en los tejidos por debajo de la cual el crecimiento o el rendimiento disminuye significativamente. Por otra parte la concentración óptima es aquella en la cual se obtiene el máximo crecimiento o rendimiento de la planta (Munson y Nelson, 1981).

Con la técnica del análisis químico de tejido foliar es posible medir la concentración total de un elemento en la planta o en una fracción de esta. Cualquiera de estas mediciones pueden emplearse para diagnosticar y evaluar el estado nutrimental de los cultivos y el suelo. El análisis de plantas se emplea principalmente para diagnosticar las deficiencias nutrimentales y como base para formular recomendaciones para fertilización (Mills y Jones, 1996; Jones, 1999).

2.3.2. Medidor portátil de clorofila SPAD-502

El medidor portátil de clorofila SPAD-502 (Konica Minolta, Tokio, Japón) es un instrumento que proporciona un método para una respuesta rápida y no destructiva para la estimación de la clorofila foliar y otras variables relacionadas, proporcionando así una vía para la evaluación inmediata de las variables fisiológicas y el seguimiento de los cambios fisiológicos en el tiempo (Hawkins *et al.*, 2009).

Los medidores de clorofila se utilizan ampliamente en la agricultura para la estimación de la clorofila en numerosas especies vegetales (Hawkins *et al.*, 2009). Por otra parte, algunos investigadores han presentado pruebas de las limitaciones inherentes a la utilización de medidores de clorofila, encontrando que las relaciones matemáticas entre las lecturas SPAD-502 y la clorofila foliar pueden variar con la etapa de crecimiento de las plantas (Chapman y Barreto, 1997), las condiciones de crecimiento (Campbell *et al.*, 1990), la estación de crecimiento (Bullock y Anderson, 1998) y el genotipo (Sibley *et al.*, 1996). También se ha encontrado que los valores predictivos de las lecturas del SPAD-502 son de utilidad limitada cuando se aplica en todas las especies (Hawkins *et al.*, 2009).

Diversos autores aseguran en sus estudios que para que las lecturas con el SPAD-502 sean válidas, es necesario tomar múltiples lecturas de cada hoja y evitar en todo momento los nervios de la hoja y las zonas necróticas y cloróticas causadas por efectos ajenos a las deficiencias nutrimentales.

2.3.3. Radiómetro

Es un dispositivo usado para medir el flujo radiante o energía dentro de radiación electromagnética. Aunque el término es quizás lo más generalmente posible aplicado a un dispositivo que mida radiación infrarroja, puede también ser aplicado a los detectores que funcionan cualquier longitud de onda en el espectro electromagnético, estos también son llamados espectralradiómetros (Alonso *et al.*, 1999).

La lectura del radiómetro es proporcional a la radiancia del blanco observado, es decir a la intensidad de la radiación en la dirección de observación y por unidad de superficie aparente del blanco. Si la superficie observada por el radiómetro es homogénea, el resultado de la medida es independiente de la distancia del radiómetro a la superficie y de las dimensiones del campo de observación. Por ello, la radiancia es una magnitud fundamental en teledetección. Gran parte de los radiómetros utilizados en campo son multicanal, es decir, capaces de efectuar lecturas de radiancia en más de una banda. Con ello pueden abordarse estudios de correlación entre algún fenómeno de interés y la radiancia medida (Alonso *et al.*, 1999).

2.3.4. Uso de imágenes digitales (cámara digital y escáner)

El color de las hojas ha sido de gran interés y valor, para los administradores de recursos y los científicos, como indicadores visuales de la salud de las plantas. Antes de la utilización de cámaras digitales, las evaluaciones de salud a menudo se basaban en escalas sencilla, escalas visuales para determinar el color foliar (Townsend and McIntosh, 1993; Strimbeck, 1997).

Debido a que este enfoque es un tanto subjetivo, tablas que representan los gradientes de color de las hojas, incluyendo la Tabla de color de tejido vegetal Munsell (Sibley *et al.*, 1995; Innes *et al.*, 1996), la Guía de color de Plantas Globales, y la Tabla de Color de las hojas fueron desarrollados para ayudar a estandarizar el color/evaluaciones. Estas guías están disponibles para la compra y comúnmente se utilizan para estimar estado de nitrógeno foliar y evaluar los cambios estacionales de color de las hojas (Murakami *et al.*, 2005).

Métodos más precisos de análisis de color foliar son los que miden el contenido de clorofila y las propiedades espectrales de las hojas (por ejemplo mediciones de reflectancia y de transmitancia). Los medidores de clorofila, espectrofotómetros, reflectómetros y espectrorradiómetros se utilizan comúnmente entre la comunidad científica para evaluar procesos fisiológicos de la planta, tales como el desarrollo de la hoja (Woodall *et al.*, 1998), senescencia de la hoja (Lee *et al.*, 2003, Feild *et al.*,

2001), absorción de luz (Neill y Gould, 1999), estado nutrimental foliar (Buscaglia y Varco, 2002), y maduración de la fruta (Reay *et al.*, 1998). El cambio en la pigmentación debido a estrés ambiental, como alta luminosidad (Merzlyak y Chivkunova, 2000), exposición ultravioleta (Dixon *et al.*, 2001), estrés hídrico (Ommen *et al.*, 1999), y baja temperatura (Pietrini *et al.*, 2002), se puede medir con esta instrumentación sofisticada (Murakami *et al.*, 2005).

Las ventajas de esta tecnología incluyen una mayor precisión de las mediciones y, en algunos casos, la transferibilidad de equipos para aplicaciones en campo. Sin embargo, este análisis también puede ser costoso y puede requerir el acceso y la formación de equipos especializados, productos químicos potencialmente peligrosos, y otros materiales de laboratorio (Murakami *et al.*, 2005).

Recientemente, las imágenes digitales se han convertido en una nueva tendencia en el análisis del color de la planta. Las cámaras digitales o escáner en combinación con las computadoras y el software adecuado se pueden utilizar para fotografiar, escanear y evaluar el color de las hojas con relativa facilidad y a un costo accesible (Murakami *et al.*, 2005).

En la agricultura, la tecnología digital se ha utilizado para caracterizar el color de las manzanas (Schrevens y Raeymaeckers, 1992), distinguir las malas hierbas de los cultivos (Pérez *et al.*, 2000), identificar el cambio de color asociado al almacenamiento de achicoria (Zhang *et al.*, 2003) y la manzana (Vervaeke *et al.*, 1994), y evaluar las tasas de senescencia en trigo de primavera (Adamsen *et al.*, 1999).

Una aplicación importante de la imagen digital y el análisis de color ha sido evaluando la influencia del estrés ambiental en la salud foliar. Los ejemplos incluyen el estrés hídrico (Ahmed y Reid, 1996), las bajas temperaturas (Bacci *et al.*, 1998), y enfermedades, como la roya de la hoja de café (Price *et al.*, 1993), el virus del rayado del maíz (Martin y Rybicki, 1998), y la infección por *Oidium* en cerezo dulce (Olmstead y Lang., 2001) y pepino (Kampmann y Hansen, 1994).

Investigaciones llevadas a cabo por el Departamento de Agricultura y Servicio Forestal de Estados Unidos y científicos de la Universidad de Vermont han acelerado el uso de análisis digital de imágenes. Este grupo ha desarrollado un método de bajo costo usando una computadora, un escáner y un software de dominio público llamado Scion Image para cuantificar la coloración verde y rojo en las hojas (Murakami *et al.*, 2005).

En instituciones mexicanas también se han hecho estudios mediante el análisis digital de imágenes con diferentes utilidades en la agricultura (Cuadro 5).

Cuadro 5. Uso de sensores remotos en la Agricultura

Autor	Título	Institución
Brizuela-Amador Pérez Basilio	Estimación de propiedades ópticas y estrés por Nitrógeno a partir de sensores remotos hiper-espectrales	COLPOS
De la Cruz Durán Jairo Aarón	Reflectancia en hojas de pimienta para estimar contenido de Nitrógeno	COLPOS
Jiménez Meza Victor Manuel	Reflectancia espectral de trigo y deficiencias de nitrógeno	COLPOS
López López Belinda	Diagnóstico de deficiencias nutrimentales en aguacate criollo (<i>Persea americana</i> Mill.), mediante el uso de imágenes digitales	UMSNH
Mendoza Paez Ricardo	Firmas espectrales en pimienta como herramienta para el diagnóstico de magnesio	COLPOS
Ruiz Esqueda José Luis	Comparación de reflectancia en 780 y 940 nm en plantas de tomate para diagnosticar estrés por deficiencia de Nitrógeno	COLPOS
Ruiz Salazar José Guadalupe	Estimación del índice de área foliar del cultivo de tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> mill) en función de índices de vegetación	COLPOS
Salinas Velázquez Arturo	Modelación biológica tridimensional de la interacción del espectro óptico en hojas de frijol y maíz	COLPOS

Fuente: Memorias del Simposio "Uso de sensores remotos en la nutrición de cultivos". XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. 2007

2.4. Interacción de la radiación y la materia

Cuando las radiaciones electromagnéticas inciden sobre una superficie se presentan tres fenómenos (Figura 4). Diferentes porciones de la energía incidente pueden ser reflejadas, absorbidas o transmitidas por los cuerpos (Lillesand y Klefer, 1994). Estas formas de energía se relacionan de la siguiente forma:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$

Donde E_I denota la energía incidente, E_R la energía reflejada, E_A la energía absorbida y E_T la energía transmitida.

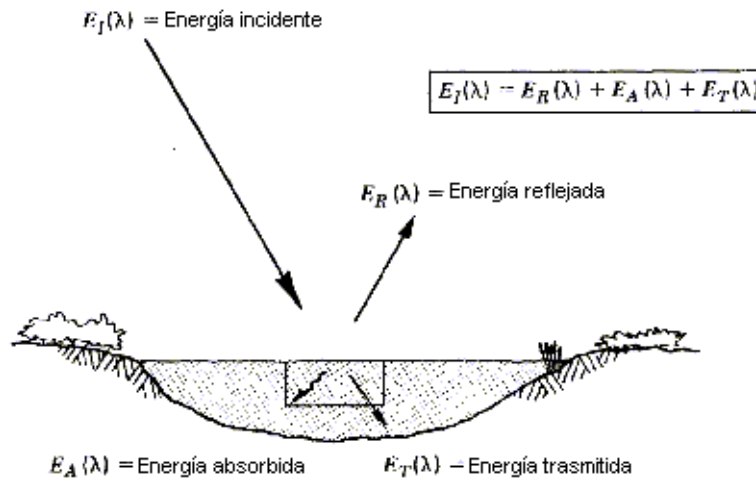


Figura 4. Interacciones entre la energía electromagnética y un cuerpo de agua (Lillesand y Kiefer, 1994).

Todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación reflejada, transmitida y absorbida. Estas características espectrales pueden ser usadas para distinguir un objeto de otro o para obtener información acerca de la forma, tamaño y otras propiedades físicas y químicas (Soria *et al.*, 1998).

Las propiedades particulares de cada material producen una distribución específica de la reflectancia en diferentes longitudes de onda, generando un patrón único conocido como firma espectral. Las firmas están afectadas por las características del objeto que originan su interacción con la energía electromagnética y son distintas según las longitudes de onda (Figura 5) (Soria *et al.*, 1998).

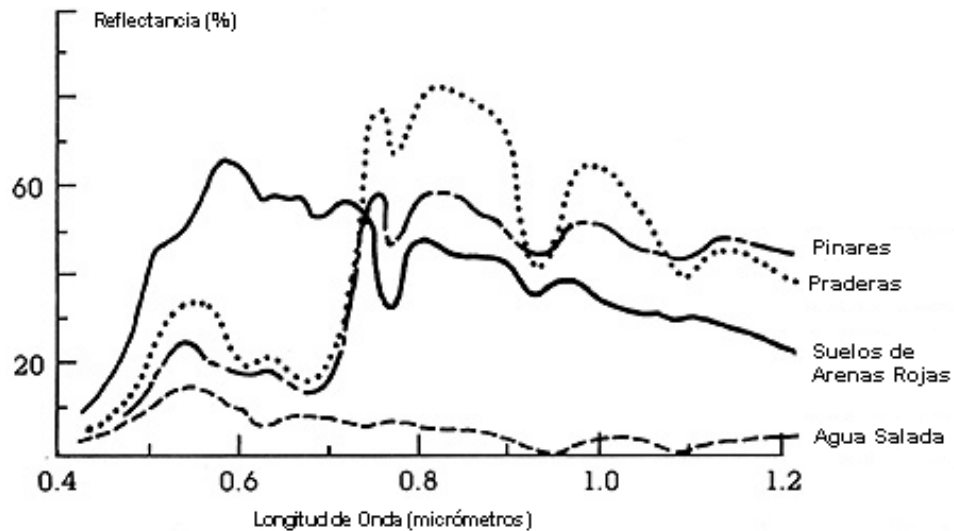


Figura 5. Firma espectral de distintas coberturas terrestres (Alonso *et al.*, 1999).

Dentro de la porción visible del espectro electromagnético las variaciones en reflectancia resultan en el efecto visual llamado color (Hecht, 2000). Por ejemplo llamamos a un objeto azul cuando este refleja principalmente la porción azul del espectro electromagnético y decimos que un objeto es verde cuando este refleja de manera importante la porción verde.

Las propiedades de reflectancia de los cuerpos son muy importantes debido a que muchos sistemas de sensores remotos operan en regiones de longitud de onda en las cuales predomina la energía reflejada. Por tal motivo resulta conveniente expresar los fenómenos de interacción de los materiales con la energía radiante por medio de la reflectancia espectral, porción de la energía incidente que es reflejada en función de la longitud de onda (Lillesand y Kiefer, 1994).

2.5. Percepción remota

Se ha definido a la percepción remota o teledetección como “la ciencia y arte de derivar información acerca de un objeto a partir de mediciones realizadas a larga distancia, sin estar de hecho en contacto físico con este” (American Society of Photogrametry, 1983).

La percepción remota implica la medición de energía reflejada o emitida por objetos, sin entrar en contacto con ellos. Cada objeto examinado por percepción remota refleja un único espectro de longitudes de onda. Plantas en crecimiento saludable reflejan más luz verde que plantas enfermas marrones o amarillas (Palacios y Palacios-Sánchez, 2003).

La reflectancia y transmitancia se define como la proporción de la radiación reflejada o transmitida en relación a la radiación incidente. Radiación incidente que no es reflejada o transmitida por una hoja que se presume que es absorbida. Reflectancia y transmitancia se presentan ya sea como porcentaje o como una fracción de la radiación incidente. La absorción se caracteriza ya sea como una relación de la radiación incidente o como una función de la densidad óptica (Porra *et al.*, 1989).

La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos energía en la banda visible roja, región de absorción de la clorofila, que en la banda cercana infrarroja, región de alta reflectancia en el componente celulósico. Cuando la vegetación sufre estrés los valores de reflectancia de la banda visible aumentan y los de la banda del NIR decrecen (Figura 6) (Jackson *et al.*, 1983).

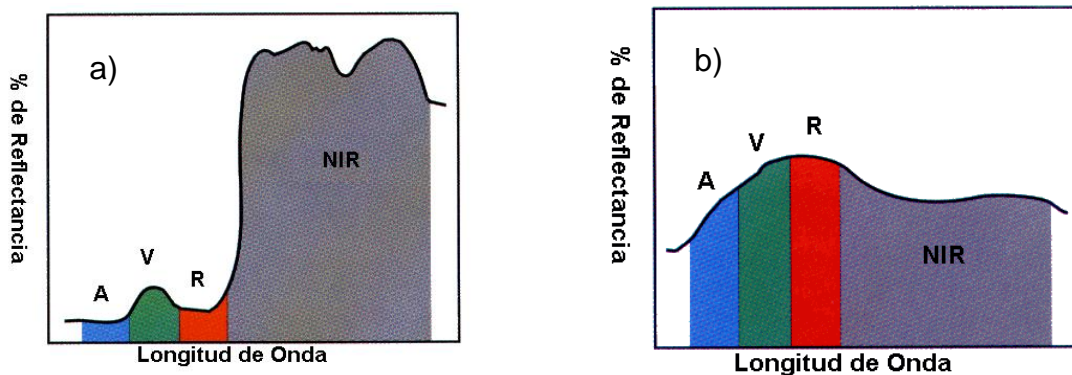


Figura 6. Firma espectral de un cultivo de maíz sano (a) y uno con estrés (b) (Jackson *et al.*, 1983).

La reflectancia de los cuerpos responde según sus características físicas y químicas, lo que se denomina “firma espectral” que es propia para cada elemento y permite distinguirlos. La señal lumínica detectada por los sensores es la energía reflejada y la

transmitida, del total de la energía que incide en una hoja esta se divide en 3 fracciones, midiéndose como absorbancia, reflectancia y transmitancia (Figura 7).

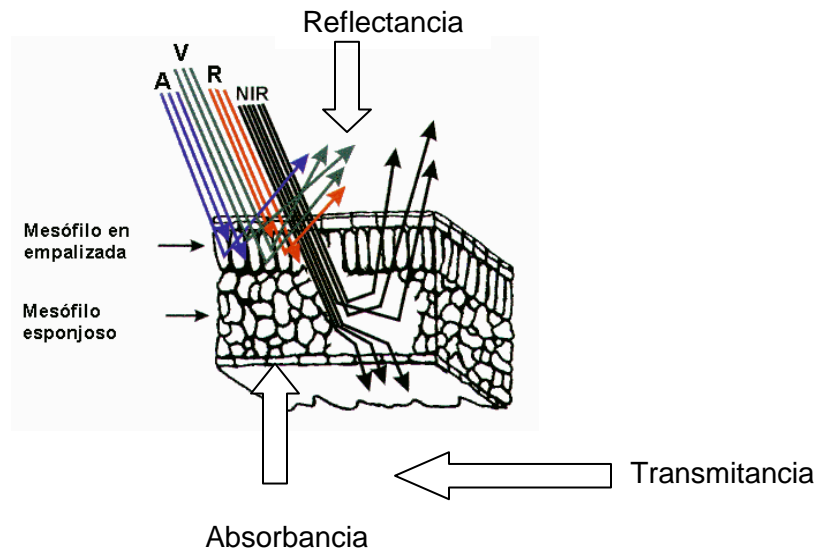


Figura 7. Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo

Las formas de reflectancia en el espectro visible por las hojas cambian entre la máxima reflectancia cercana a 550 nm y la mínima cercana a 660 nm, cuando existen cambios de concentración de la clorofila; esos cambios de forma del espectro visible se usan para identificar clorosis asociada a deficiencias de nitrógeno (Carter y Spiering, 2002). La interacción de la radiación solar con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos aceites, agua), morfología de la hoja (mesófilo) y 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 nm a 2800 nm (Curran *et al.*, 2001).

Las radiaciones de longitudes 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, 1997).

Las radiaciones electromagnéticas pueden ordenarse en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) hasta frecuencias muy bajas (longitudes de onda grandes). Por orden creciente de longitudes de onda el espectro electromagnético (Figura 8) está compuesto por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.

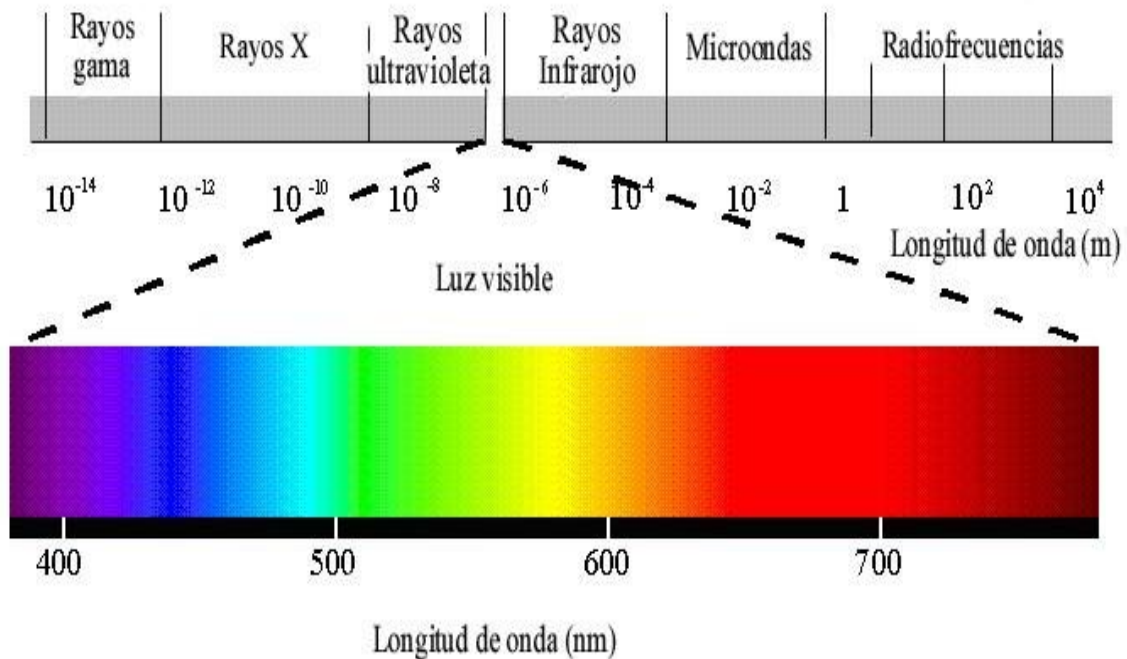


Figura 8. Características de distintas regiones del espectro electromagnético. Nótese que el color puede expresarse cuantitativamente por su longitud de onda (Brown *et al.*, 2004).

Se denomina banda a la porción de radiación electromagnética que presenta un comportamiento similar, y a la organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se llama espectro electromagnético (Cuadro 6) (Verstraete y Pinty, 1991).

Cuadro 6. Bandas espectrales más frecuentemente empleadas en teledetección (Verstraete y Pinty, 1991).

Banda	Longitud	Descripción
Espectro visible	0.4- 0.6 μm	Se llama así por ser la única radiación que pueden percibir nuestros ojos. Dentro de este rango suelen distinguirse 3 bandas elementales, azul, verde y rojo, por los colores asociados a esas longitudes de onda.
Infrarrojo cercano	0.7- 1.3 μm	Es de gran importancia por su capacidad de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo medio	1.3- 8 μm	Donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
Infrarrojo lejano	8- 14 μm	Incluye la fracción emisiva del espectro.
Microondas	A partir de un mm	De gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

2.6. Estrés nutricional y reflectancia espectral

La interacción de la radiación solar con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos, aceites, agua), morfología de la hoja (mesófilo) y 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 nm a 2800 nm (Curran *et al.*, 2001).

La clorosis resulta de una absorbancia decreciente de la luz visible por la clorofila y en consecuencia un incremento de la reflectancia del espectro visible, resultando

visualmente el amarillamiento de la planta (Adams *et al.*, 1999). La eficiencia de la absorción por la clorofila decrece en la región del infrarrojo cercano (NIR). El efecto combinado del decremento de la absorción por la clorofila y la dispersión de la luz por el mesófilo de las hojas muestran el espectro denominado lejano o rojo profundo; este rojo es una línea delgada que incrementa su reflectancia entre la región del rojo e infrarrojo cercano de ese espectro, por las hojas de plantas sanas (Adams *et al.*, 1999).

Las radiaciones de longitudes 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, 1997). La clorofila, el principal pigmento fotosintético en las plantas, controla la absorción de la luz visible porque la transición de los electrones en sus moléculas ocurre en 430, 460, 640 y 660 nm; por tanto, la clorofila es un absorbente efectivo de espectro azul (400- 500 nm) y del rojo (600- 700 nm) (Curran, 1989).

Con el objetivo de estudiar el efecto de las deficiencias de nutrientes en la respuesta espectral de las plantas, Al-Abbas *et al.* (1974) determinaron los espectros de reflectancia, transmitancia y absorción producidos por hojas de maíz normal y seis tipos de deficiencias nutricionales, en 30 longitudes de onda seleccionadas entre los 500 y los 2600 nm. La concentración de clorofila de las hojas en todos los tratamientos deficientes en los nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre fue más baja que la de aquellas hojas pertenecientes al tratamiento sin estrés nutricional, como consecuencia la absorción fue menor en los rangos de 530 a 750 nm.

La reflectancia y transmitancia de la hoja en la región del infrarrojo cercano, localizada entre 750 y 1300 nm, estuvo generalmente asociada con su estructura y morfología. Entre todos los tratamientos, las hojas deficientes en potasio tuvieron la más alta reflectancia y el más bajo grosor de hoja y contenido de humedad (Al-Abbas *et al.*, 1974).

La reflectancia espectral y la transmitancia en el intervalo de longitudes de onda entre 1300 y 2500 nm estuvieron relacionadas principalmente con el contenido de agua de la hoja. Este experimento mostró una correlación positiva entre el contenido de agua y el porcentaje de absorbancia a 1450 y 1950 nm. Las plantas deficientes en azufre, magnesio y nitrógeno tuvieron un mayor porcentaje de humedad por lo que mostraron una mayor absorbancia en esas longitudes de onda (Al-Abbas *et al.*, 1974).

En trabajos recientes se ha buscado relacionar las propiedades espectrales de las plantas con los contenidos de ciertos nutrimentos en el follaje. En la mayoría de los casos el nitrógeno ha sido el nutrimento mas estudiado con resultados alentadores (Brizuela *et al.*).

Osborne *et al.* (2002) realizaron un experimento en maíz con la intención de encontrar una relación entre la reflectancia espectral y las concentraciones de nitrógeno y fosforo en el follaje y grano. Ellos encontraron correlaciones importantes de la concentración de tales nutrimentos en el tejido vegetal con la reflectancia espectral en longitudes de onda correspondientes a los espectros visible e infrarrojo. Como conclusión de su trabajo mencionan que mediante mediciones de reflectancia espectral es posible conocer de manera satisfactoria ($R_2 = 0.87$) el contenido de nitrógeno del follaje durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo. La predicción del contenido de fosforo en el tejido fue mejor en las etapas fenológicas tempranas ($R_2 = 0.68$) utilizando para esto la reflectancia en el azul (440 y 445 nm) y en el cercano infrarrojo (730 y 930 nm).

2.7. Índices espectrales

Los índices de reflectancia de la vegetación son útiles para identificar el estado de salud de un cultivo (Ritchie, 2003).

La mayoría de los índices se usan para estimar la cobertura vegetal (porcentaje del suelo cubierto por las plantas por unidad de área) o el índice de área foliar (IAF),

superficie o área de follaje sobre un metro cuadrado de suelo (Cuadro 7) (De la Cruz, 2008).

Cuadro 7. Índices espectrales para el análisis de las propiedades de reflectancia de la hoja.

Abreviación	Nombre	Índice vegetativo	Referencias
NDVI 660	Índice de vegetación diferencial normalizada roja	$\frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)}$	Rouse <i>et al.</i> , 1973
NDVI 560	Índice de vegetación diferencial normalizada verde	$\frac{(NIR - VERDE)}{(NIR + VERDE)}$	Gitelson y Merzlyak, 1998
NDVIverde/NDVIrojo	Tasa normalizada verde/rojo	$\frac{NDVI\ 560}{NDVI\ 660}$	Ritchie, 2003
Mv	Modelo verde	$\frac{830\ nm}{560\ nm} - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005

Fuente: De la Cruz, 2008.

Los índices de vegetación intentan maximizar la contribución espectral de la vegetación verde y minimizar el efecto del fondo de suelo y otros factores (Major *et al.*, 1990). La reflectancia espectral ha sido correlacionada con la salud vegetal y varias concentraciones bioquímicas en la hoja (Curran *et al.*, 2001). Muchos estudios de reflectancia usan índices vegetales espectrales para determinar estos parámetros. Se han derivado índices espectrales de medición de reflectancia tanto para una hoja como para cubierta vegetal. Las mediciones de una hoja ofrecen la ventaja de una mayor tasa señal-interferencia “ruido” y mayor control sobre el medio operante, mientras que las mediciones de cubierta permiten mediciones a mayor escala. La reflectancia del follaje también ha sido analizada para el porcentaje de cubierta verde y concentración de clorofila a niveles de superficie y satelital (Dawson, 2000).

Los indicadores espectrales de crecimiento de cultivo incluyen factores de reflectancia de banda, combinaciones lineales de bandas por regresión múltiple, “verdor” ortogonal, y tasas de bandas infrarrojas y rojas (Dusek *et al.*, 1985) Sims y Gamón (2002) sugieren que las bandas múltiples son útiles debido a cambios de absorción de pigmentos confusos, como los carotenoides. Best y Harían (1985) reportan que los estimadores de área de la hoja usando varias bandas se correlaciona mejor con IAF que los estimadores hechos usando dos bandas, aunque Fernández *et al.*, (1994) concluyen que el NDVI aparenta ser el índice espectral más útil que correlaciona la reflectancia de la cubierta con el área de hoja en trigo invernal.

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Verdin *et al.*, 2003; Pedreros *et al.*, 2004).

El NDVI se calcula de la siguiente manera:

- Índice de vegetación diferencial normalizada roja (NDVI 660):

$$\text{NDVI 660} = \frac{(\text{NIR} - \text{ROJO})}{(\text{NIR} + \text{ROJO})}$$

- Índice de vegetación diferencial normalizada verde (NDVI 560):

$$\text{NDVI 560} = \frac{(\text{NIR} - \text{VERDE})}{(\text{NIR} + \text{VERDE})}$$

En donde las variables ROJO/VERDE e Infrarrojo cercano (NIR) están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de 0 a 1. Como consecuencia el Índice de Vegetación Diferencial Normalizada varía entre -1 y +1. Valores altos del NDVI

indican vegetación sana ya que provienen de una muy alta reflectancia en el infrarrojo próximo y baja en el visible (Verdin *et al.*, 2003).

El modelo verde es un estimador remoto de la clorofila propuesto por Gitelson *et al.*, (2005).

La tasa normalizada, propuesta por Ritchie (2003), es un índice que permite identificar deficiencias de nitrógeno a partir de cobertura vegetal digitalizada; no así el modelo verde ajustado para la estimación de la clorofila usando longitudes de onda 545- 565 nm (Gitelson *et al.*, 2005).

2.8. Aplicación de los sensores remotos en la agricultura

Investigaciones en todo el mundo han permitido, desde los años 60s, un avance significativo en la aplicación de los sensores remotos en diferentes campos de la actividad del hombre, como la minería, agricultura, meteorología y otros (Gates *et al.*, 1965; Thomas *et al.*, 1967).

Pulido *et al.*, (2000) utilizaron imágenes de satélite Landsat TM para estimar el área cultivada en el distrito de riego 038 Río Mayo, obteniendo 99% de precisión en la cuantificación del área cultivada.

Bolaños (2000), realizó un estudio con imágenes de satélite Landsat TM para estimar superficie cultivada y volúmenes de áreas de riego utilizados en unidades de riego de estado de Guanajuato, en el cual pudo identificar cuatro clases correspondientes a cultivos agrícolas, con una precisión global del 82%. Además, dicho autor estimó una precisión adecuada del volumen de agua utilizado en el riego de cultivos durante el ciclo agrícola otoño-invierno 97-98.

Soria *et al.*, (1999) generaron una metodología para realizar estimaciones del rendimiento del maíz en el Bajío de Guanajuato, a través de los índices de área foliar y su relación con los índices de vegetación de imágenes de los satélites NOAA 14 y LANDSAT-TM.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el estrés por magnesio en pepino, a través de las propiedades ópticas de sus hojas.

Objetivos específicos

- Identificar deficiencia y toxicidad de magnesio en pepino mediante un radiómetro, usando un medidor de clorofila SPAD, con imágenes de cámara digital, y a través de imágenes digitales de escáner.
- Determinar la concentración de magnesio en hojas de pepino desarrolladas en condiciones de deficiencia y exceso de magnesio.

3. HIPÓTESIS

La reflectancia de la hoja de pepino permite estimar deficiencia y toxicidad de magnesio.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Sitio experimental

El experimento se realizó en un invernadero ubicado en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, estado de México, cuyas coordenadas geográficas son 19° 28' 05" Latitud Norte y 98° 54' 09" Longitud Oeste, a una altitud de 2220 m, con una temperatura máxima de 25.5 °C, una mínima de 5.7 y media anual de 15.9 °C.

5.2. Producción de plantas

Como material vegetal se utilizó el híbrido de pepino Panther® (tipo slicer), de la empresa comercial Sunseeds. Fruto de color verde oscuro uniforme, planta de crecimiento indeterminado, productivo y precoz, tarda 70 días a la madurez, posee resistencia a mildiu y oidio.

La fecha de siembra fue el 30 de junio de 2010; se utilizó una charola de 200 cavidades poniendo una semilla por orificio. Se regó diariamente aplicando una lámina de riego promedio de 3 mm. Un mes después (29 de julio de 2010) se realizó el transplante a bolsas de polietileno negro de 40 x 45 cm, que contenían tezontle como sustrato, con una granulometría máxima de 10 mm, se colocó una planta por bolsa.

5.3. Solución nutritiva

Las soluciones nutritivas se elaboraron con base en la solución universal Steiner (1984), la cual se modificó según los tratamientos con magnesio (0, 2, 4, 6 y 8 meq.L⁻¹), pero se conservó el equilibrio entre cationes y aniones.

Las soluciones nutritivas se mantuvieron en recipientes de 200 litros, con su cubierta para evitar el contacto con los rayos solares, la evaporación del agua y la presencia de algas. La aplicación de los riegos se hizo mediante cintilla con goteros cada 50 cm, manteniendo una tensión hídrica constante de aproximadamente 15 cbar.

El pH de las soluciones nutritivas se mantuvo diariamente en un rango de 5.5-6.5, mediante la adición de H_2SO_4 .

5.4. Diseño experimental y tratamientos

Los tratamientos fueron distribuidos espacialmente al azar. Cada unidad experimental consistió en una planta por bolsa de polietileno negro. De tal manera se generaron 90 unidades experimentales, provenientes de los 5 tratamientos, 3 repeticiones y 6 muestreos contemplados a realizarse inicialmente; debido a la helada ocurrida el 4 de noviembre de 2010, que afectó completamente las plantas, solamente se pudieron llevar a cabo 2 muestreos, los días 27 de octubre y 3 de noviembre de 2010 (Figura 9).



Figura 9. Plantas “quemadas” por la helada ocurrida el 4 de noviembre de 2010.

Los tratamientos consistieron en aplicar riegos con la Solución Nutritiva Universal de Steiner modificada en la concentración de magnesio para inducir la deficiencia gradual de este elemento. Éstos se comenzaron a aplicar a los 51 días después del transplante. El diseño de tratamientos se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Descripción de los tratamientos

Tratamientos	meqL ⁻¹					
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻²
T1	0	9	11	12	1	7
T2	2	11	7	12	1	7
T3	4	9	7	12	1	7
T4	6	6	8	12	1	7
T5	8	6	7	12	1	8

5.5. Variables respuesta

Las variables respuesta empezaron a colectarse 35 días después de la aplicación de los tratamientos. Los resultados que se muestran en el presente trabajo se colectaron después de 42 días de la aplicación de los tratamientos. Se consideraron las siguientes variables respuesta:

1. Reflectancia de la planta medida con radiómetro
2. Mediciones de clorofila con SPAD-502
3. Reflectancia de la planta obtenida a partir de fotografías con cámara digital
4. Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes de escáner
5. Concentración de magnesio en hojas recientemente maduras

La obtención de datos se realizó mediante el sistema pasivo de energía reflejada (radiómetro, cámara digital y escáner), en el cual los sensores de este tipo miden energía en la porción reflectiva del espectro (visible e infrarrojo cercano y medio).

Para las mediciones de reflectancia de la planta medida con radiómetro y a partir de fotografías con cámara digital se construyó una base de madera de forma cuadrada de 0.5 m de cada lado, se pintó de negro, aquí se colocaron las hojas de cada unidad experimental a muestrear de manera que cubrieran la base, se escogieron las hojas recientemente maduras y de esta forma se tomaron los datos.

5.5.1. Reflectancia de la planta medida con radiómetro

La toma de datos se realizó con un radiómetro multiespectral marca CROPSCAN de once bandas (460, 485, 510, 560, 610, 660, 710, 760, 810, 830 y 1650 nm).

Las mediciones duraron entre 60 y 70 minutos y se llevaron a cabo a partir de las 10:00 horas. El radiómetro se colocó a una altura de 1 m de la base de madera con las hojas. Las mediciones se realizaron de manera aleatoria, tomando como base la distribución en campo de las unidades experimentales.

5.5.2. Reflectancia de la planta obtenida a partir de fotografías

La obtención de fotografías se realizó con una cámara digital marca Sony de 14.1 megapíxeles, con lente Carl Zeiss.

Las fotografías digitales se tomaron a la par con las mediciones del radiómetro, el proceso duró entre 60 y 70 min, comenzando a partir de las 10 h. La cámara se colocó sobre la base de madera a una distancia de 1 metro, procurando tomar el área donde la base fue completamente cubierta por las hojas (Figura 10). Las fotografías se obtuvieron de manera aleatoria, tomando como base la distribución en campo de las unidades experimentales.



Figura 10. Ejemplo de las fotografías utilizadas en la investigación.

Las fotografías digitales fueron almacenadas en una computadora y con el paquete de cómputo Idrisi Andes se obtuvo la reflectancia del tejido vegetal en las bandas

azul, verde y roja. En el Anexo 2 se muestra la forma en que se utiliza el programa para digitalizar las imágenes.

5.5.3. Concentración de clorofila en hoja estimada con SPAD-502

La concentración de clorofila se estimó con el medidor portátil SPAD-502 marca Minolta. Las mediciones se realizaron en cuatro hojas recientemente maduras de cada unidad experimental, en cada hoja se tomaron cuatro mediciones evitando las nervaduras.

Las mediciones con SPAD se tomaron a la par de los otros métodos utilizados en el trabajo.

5.5.4. Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes con escáner

La obtención de imágenes se realizó con un multifuncional marca HP Photosmart modelo D110a, escaneando a 400 dpi (puntos por pulgada). Se utilizaron hojas recientemente maduras usadas también para obtener la reflectancia con radiómetro. La base del escáner se cubrió con las hojas (Figura 11), las imágenes obtenidas se digitalizaron con el programa Idrisi Andes para obtener la reflectancia del tejido vegetal en las bandas azul, verde y roja.



Figura 11. Imagen de hojas de pepino obtenidas con escáner.

5.5.5. Concentración de magnesio en hojas recientemente maduras

El análisis químico de magnesio se llevó a cabo en las mismas hojas utilizadas para medir reflectancia. Las muestras fueron llevadas a laboratorio y secadas en una estufa a 65 °C por 48 horas. Las hojas secas fueron pasadas por un molino con cuchillas de acero, cuando estuvieron secas y molidas se solubilizó el magnesio por digestión húmeda, se les determinó la concentración del elemento por el método de Espectrofotometría de emisión atómica.

5.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el programa de cómputo Statistic Analysis System versión 9.2 (SAS 9.2). Se efectuó un análisis de la varianza y una prueba de medias Tukey ($\alpha \leq 0.05$) a la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Firma espectral

Con los datos de reflectancia obtenidos con radiómetro se elaboraron firmas espectrales para cada uno de los tratamientos. En la figura 12 se aprecian los cambios en los valores de la reflectancia con la firma obtenida el 27 de octubre de (Figura 12a) y 3 de noviembre (Figura 12b).

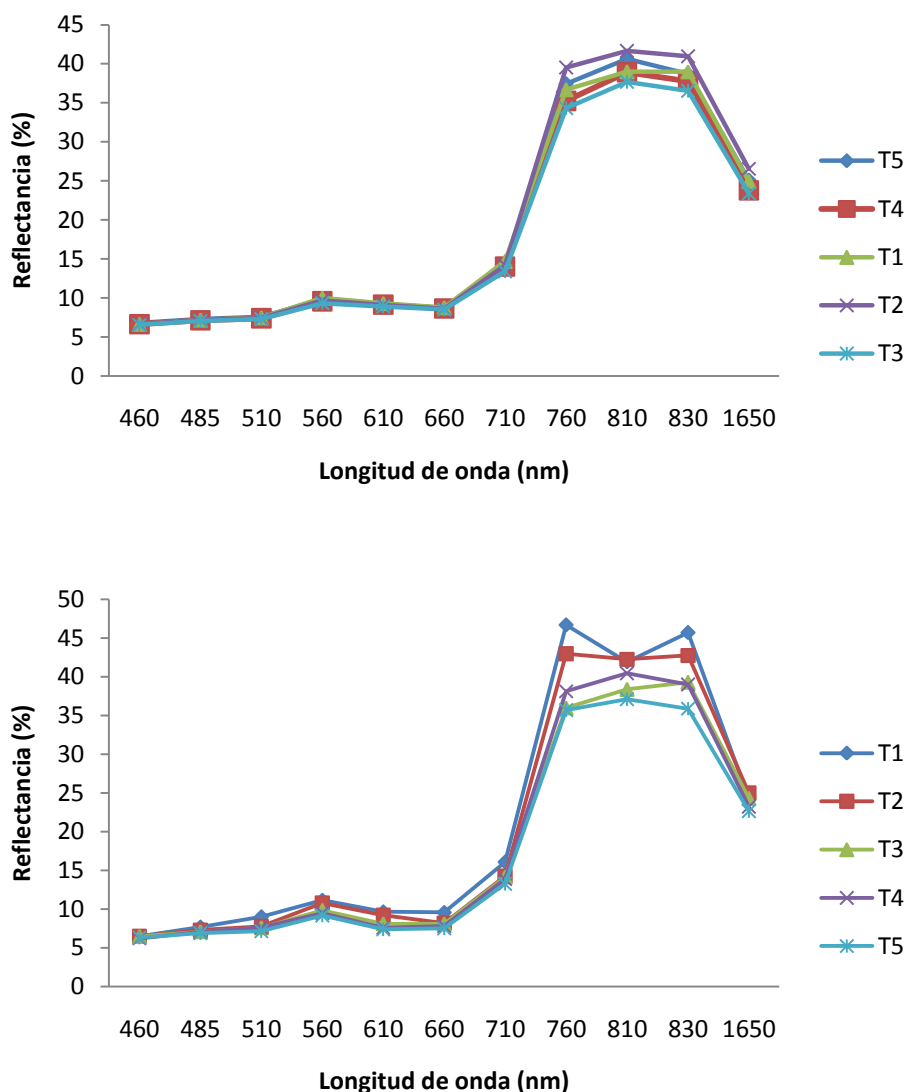


Figura 12. Firmas espectrales obtenidas el 27 de octubre (a) y 3 de noviembre del mismo año.

Los patrones de reflectancia observados en la Figura 12a no muestran efectos evidentes entre tratamientos, al menos en las primeras bandas comprendidas entre las longitudes 460 a 760 nm, sin embargo a los 810nm el tratamiento con el adecuado suministro de magnesio (T3) es el que menos refleja, comparado con el T1 que refleja más que los demás y donde existe la deficiencia del mismo elemento. En la Figura 12b se observan las diferencias entre los tratamientos en todas las longitudes de onda. En ambos casos la firma espectral encontrada es típica de la vegetación.

La clorofila absorbe radiación roja y azul, lo que ocasiona que la reflectancia de luz por el cultivo sea pequeña en estas bandas. El pico de absorbancia de la banda azul por la clorofila se traslapa con la absorción de los carotenoides, por lo que la reflectancia del azul no es usada para la estimación de la clorofila (Sims y Gamon, 2002).

La máxima absorbancia del rojo ocurre entre 660 y 680 nm (Curran, 1989), pero altas concentraciones de clorofila saturan esta región de absorción (Sims y Gamon, 2002), por lo que la concentración de clorofila es usualmente predicha a partir de reflectancia entre los 550 y 700 nm.

6.2. Concentración de magnesio en hojas recientemente maduras

Se realizó un análisis a la variación de la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras, el cual mostró diferencias altamente significativas en el comportamiento de la variable a causa de la aplicación de los tratamientos. Se usó una prueba de comparación de medias por Tukey con un nivel de significancia de 0.05. (Cuadro 9).

Cuadro 9. Efecto de los tratamientos en la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras.

Agrupamiento Tukey	Concentración media % PS	Tratamiento	Mg ²⁺ en solución (meq.L ⁻¹)
A	1.96	5	8
A	1.91	4	6
A B	1.45	3	4
B C	0.836	2	2
C	0.695	1	0

La concentración normal de magnesio en la planta oscila entre 0.15- 1% de su peso seco. Cuantitativamente el magnesio clorofílico solo representa, aproximadamente, alrededor del 10-12 % del total contenido en la planta (Navarro y Navarro, 2003).

La Figura 13 muestra que las soluciones nutritivas modificaron la concentración de magnesio en las hojas estudiadas. Este resultado es fundamental para las siguientes mediciones porque permitió tener unidades experimentales con diferentes niveles de magnesio.

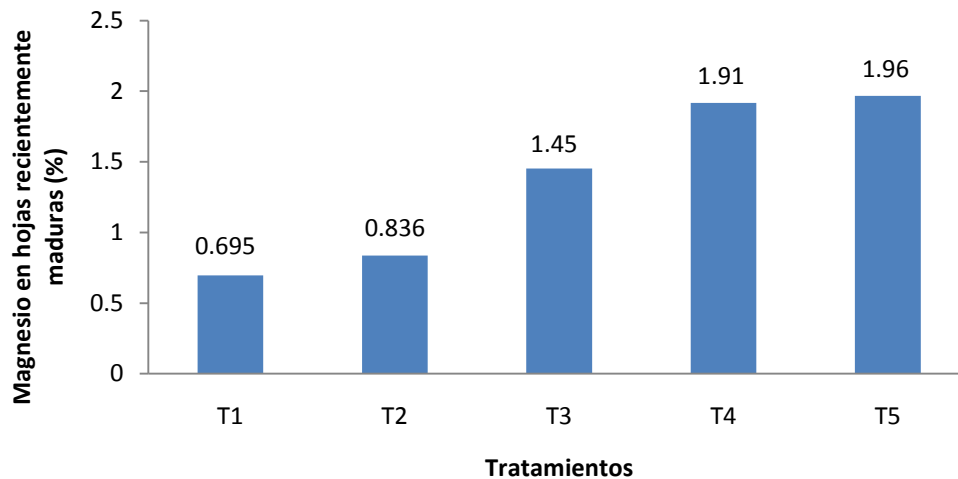


Figura 13. Efecto de los tratamientos en la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras de plantas de pepino.

6.3. Estimaciones de la concentración de clorofila con SPAD-502

Las mediciones de clorofila estimadas con el SPAD-502 fueron sometidas a un análisis de varianza y a una prueba de medias de Tukey con un nivel de significancia de 5%; este análisis indicó que al menos uno de los tratamientos produjo un efecto estadísticamente diferente en las mediciones del SPAD-502. Los resultados de la prueba de medias se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Efecto de los tratamientos en la concentración de clorofila.

Agrupamiento Tukey	Media (Lectura SPAD)	Tratamiento
A	63.7116	4
A B	63.0225	5
B	62.2327	3
C	60.7167	2
C	60.5958	1

Los tratamientos deficientes de magnesio presentaron una concentración de clorofila menor al resto (Figura 14).

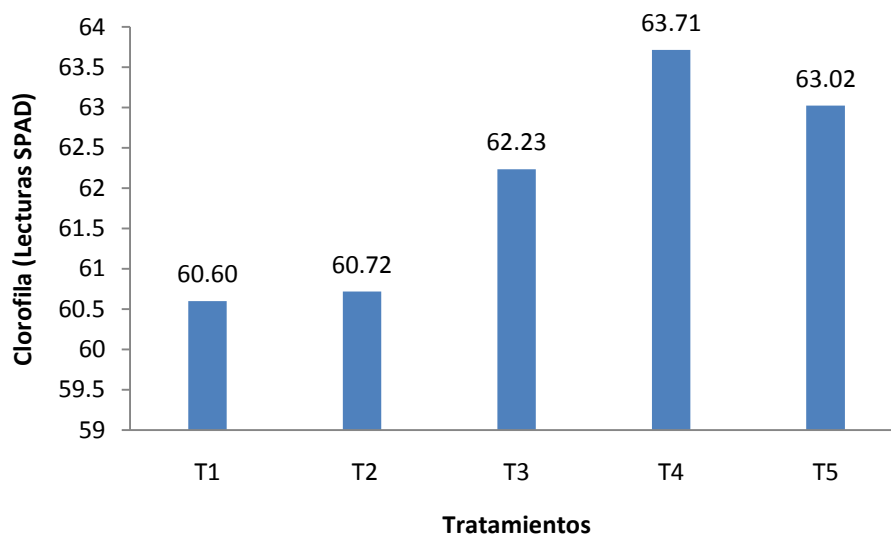


Figura 14. Efecto de los tratamientos en el contenido de clorofila (lecturas SPAD) en hojas recientemente maduras de plantas de pepino.

Una deficiencia de magnesio afecta particularmente el tamaño, la estructura y funcionamiento de los cloroplastos, incluyendo la transferencia de electrones en el fotosistema II (McSwain *et al.*,1976). Cakmak y Marschner (1992) reportan que hojas de frijol con suministros pobres de magnesio contienen menos clorofila en comparación a hojas con concentraciones adecuadas de magnesio.

6.4. Relación entre las concentraciones de magnesio y de clorofila en hojas

Para conocer la relación existente entre las concentraciones de magnesio y de clorofila en hojas recientemente maduras se realizó un análisis de regresión. Se probaron diferentes modelos y el que más se ajustó fue el de tipo exponencial con una $R^2 = 0.8427$. Todos los modelos probados mostraron una relación positiva entre el porcentaje de magnesio y el nivel de clorofila estimado con SPAD-502 (Figura 15).

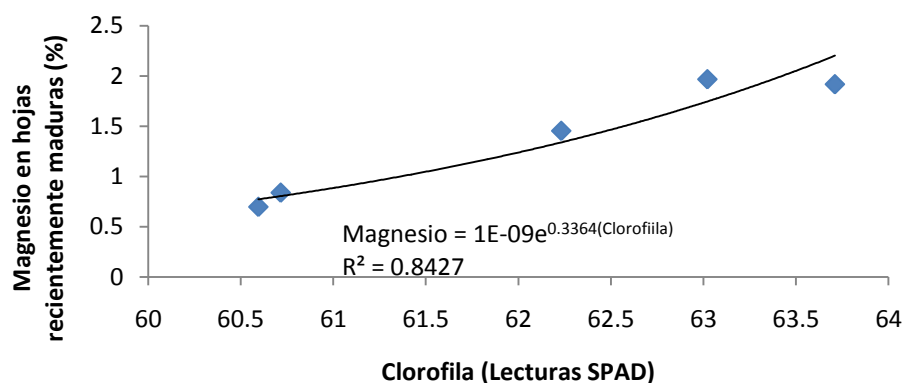


Figura 15. Relación entre concentración de magnesio y clorofila en plantas de pepino

La relación positiva establecida se atribuye principalmente a que el magnesio es un elemento que forma parte de la estructura de las clorofilas. Baszynsky *et al.* (1980) encontraron que plantas deficientes de magnesio contenían menos clorofila a y b, además otros pigmentos de los cloroplastos también son afectados en forma similar a la clorofila. Por tal motivo, las unidades experimentales con un abastecimiento de magnesio inferior a sus necesidades presentaron niveles de clorofila menores que aquellas con un abastecimiento suficiente.

6.5. Reflectancia de plantas obtenida con radiómetro

A los datos obtenidos con radiómetro se les realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias Tukey con una significancia de 5%. Las longitudes de onda donde se encontraron diferencias significativas fueron en 510, 560, 610, 660 y 830 nm (Cuadro 12).

Cuadro 11. Efecto de los tratamientos en el porcentaje de reflectancia.

Longitud de onda	Agrupación Tukey	Media	Tratamiento
510 nm	A	8.99778	1
	B	7.75622	2
	B	7.58744	4
	B	7.57711	3
	C	7.13667	5
560 nm	A	11.1299	1
	A B	10.7633	2
	B C	9.8227	3
	C	9.4607	4
	C	9.1511	5
610 nm	A	9.6356	1
	A	9.1978	2
	B	8.0833	3
	B	7.5744	4
	B	7.3844	5
660 nm	A	9.5533	1
	B	8.1622	2
	B	8.0778	3
	B	7.7956	4
	B	7.5022	5
830 nm	A	45.678	1
	A B	42.734	2
	A B	39.281	3
	A B	38.977	4
	B	35.868	5

Se encontró que los que los tratamientos con mayor abastecimiento de magnesio presentan menores reflectancias en las cinco bandas señaladas.

En todos los casos existe una relación negativa entre el porcentaje de magnesio en hojas recientemente maduras y la reflectancia, pero en cada una de las longitudes el modelo que mejor se ajusta a los datos es distinto. El modelo de tipo potencial es el que se presenta con mayor ajuste con la reflectancia a los 510 nm. El modelo logarítmico es mejor para la reflectancia a los 560 nm, mientras que para la reflectancia a los 610 y 660 es el polinómico y para 830 nm el mejor ajuste se ve con un modelo exponencial (Figuras 16 y 17).

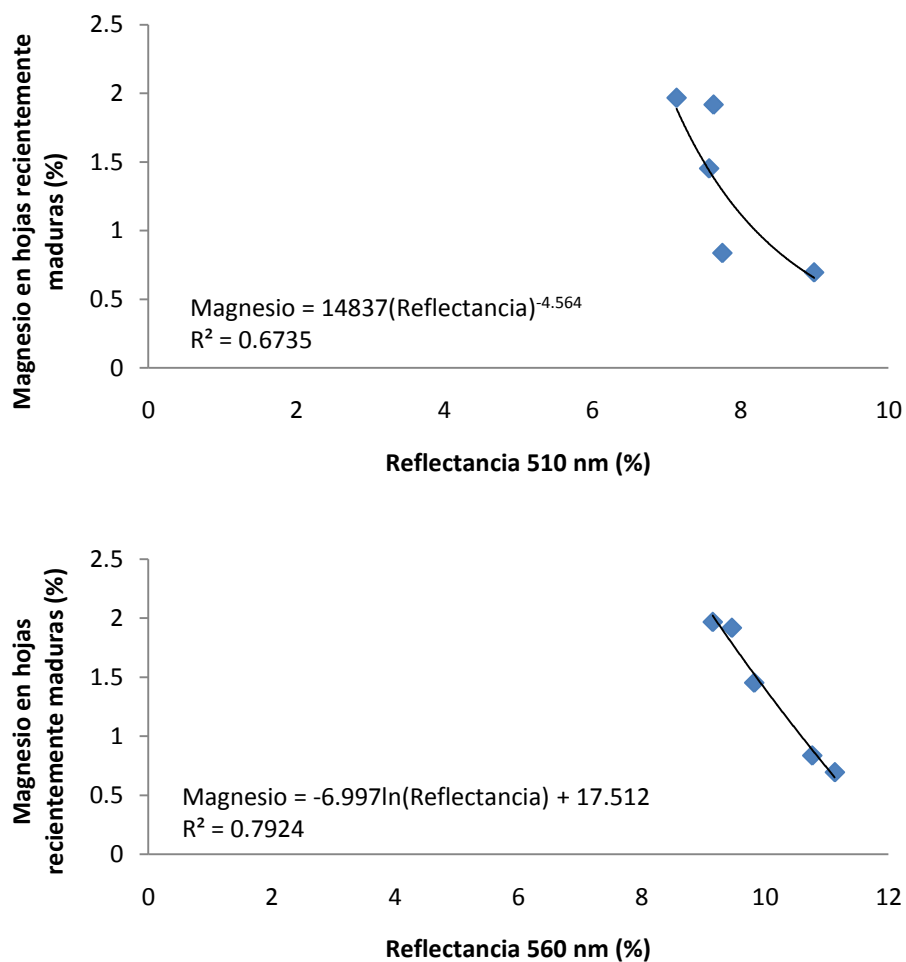


Figura 16. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia medida con radiómetro a 510 y 560 nm.

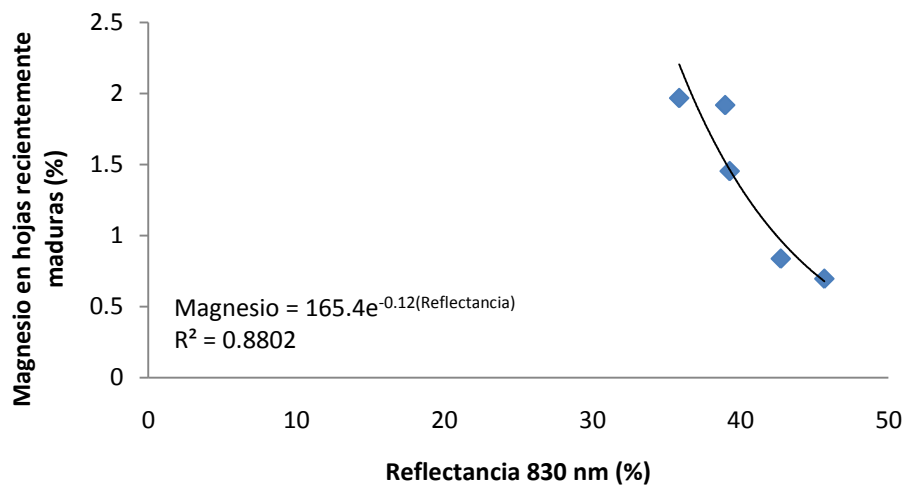
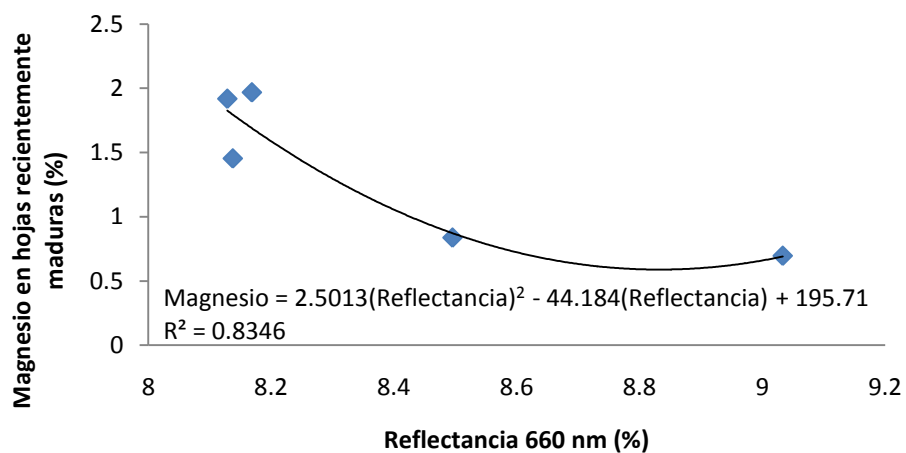
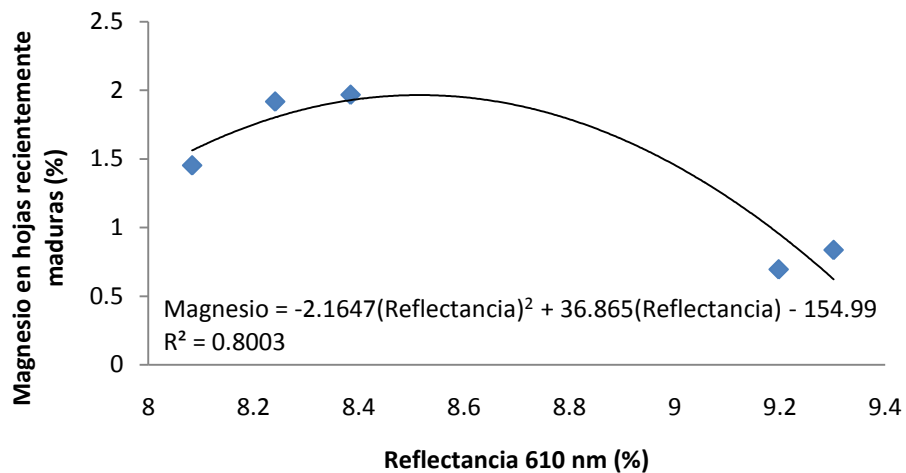


Figura 17. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia medida con radiómetro a 610, 660 y 830 nm.

Las menores reflectancias se presentaron en las plantas con mayor concentración de magnesio debido a que estas también tuvieron mayor concentración de clorofilas. La clorofila al ser un pigmento de absorción de radiaciones electromagnéticas del espectro visible disminuyó la reflectancia.

Cuando una planta está bajo estrés (falta de nutrientes, falta de agua, enfermedades, etc.), la producción de clorofila disminuye y carece de pigmentación clorofilítica y, por esta causa, las plantas absorben menos en la banda de absorción de la clorofila. Estas plantas tendrán muy alta reflectancia en la porción roja del espectro y aparecerán amarillentas o cloróticas (Swain y Davis, 1978).

6.6. Reflectancia de plantas, obtenida de fotografías

Se realizó un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey ($\alpha=0.05$) a los resultados de reflectancia de cada banda (azul, verde y rojo), se encontró que las variables fueron afectadas por los cambios en el abastecimiento de magnesio a las plantas (Cuadro 13).

Cuadro 12. Efecto de los tratamientos en reflectancia (%) obtenida con fotografías.

Banda	Agrupación Tukey	Reflectancia media	Tratamiento
Azul	A	52.1806	1
	A B	50.494	2
	B C	48.9521	4
	C	47.5953	3
	C	47.5855	5
Verde	A	54.1132	1
	A	53.3329	2
	B	50.5769	3
	B	49.7656	4
	B	49.5665	5
Rojo	A	46.8111	1
	B	42.5493	2
	B C	42.0001	3
	B C	40.0824	4
	C	39.1624	5

Se encontró que existe una relación inversa entre el porcentaje de magnesio y la reflectancia en cada banda. Para el porcentaje de magnesio y la reflectancia en cada una de las bandas se probaron diferentes modelos. Para la banda azul el mayor ajuste fue con un modelo tipo lineal ($R^2=0.8891$), logarítmico para la banda verde ($R^2=0.8534$) y para la roja polinómico con una $R^2 = 0.7847$ (Figura 18).

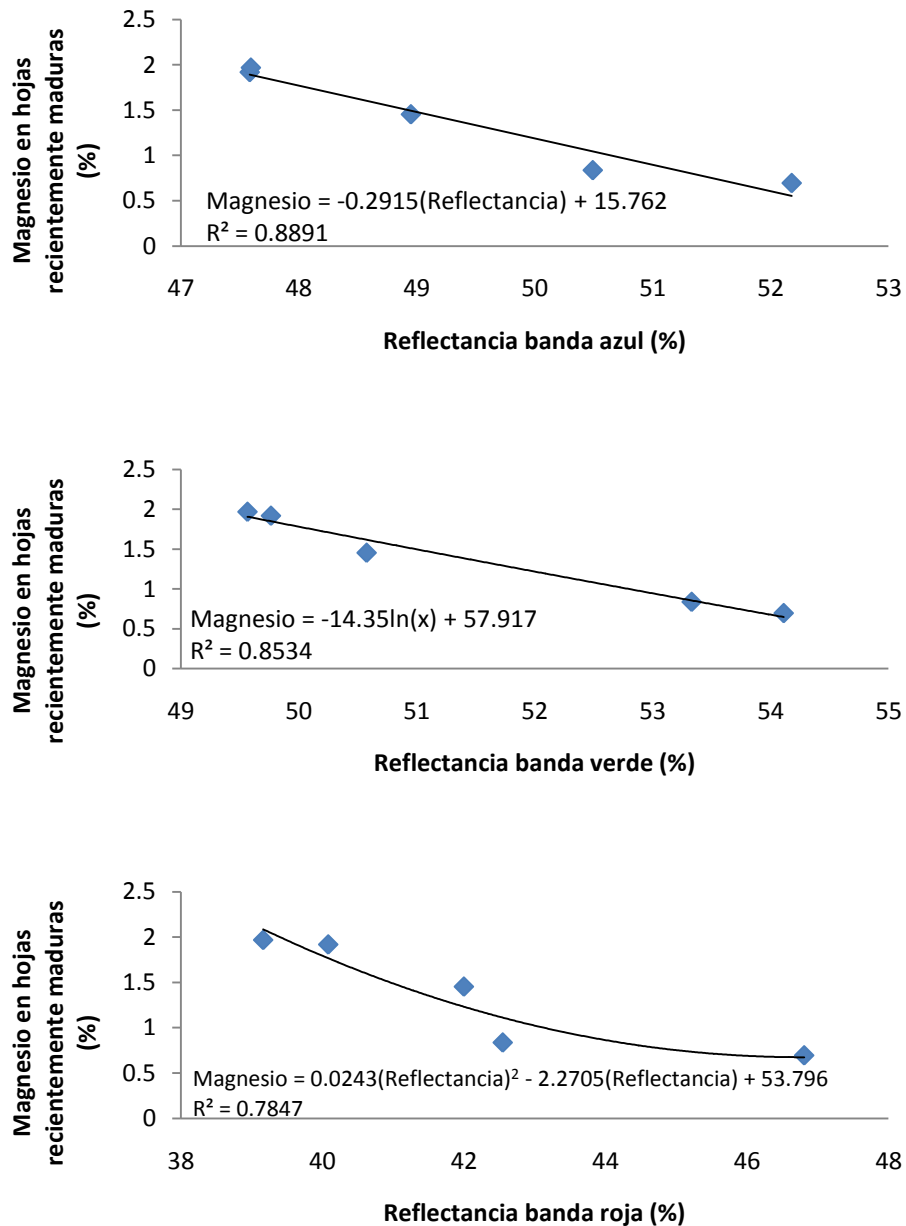


Figura 18. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia, obtenida con fotografías, en las bandas azul, verde y roja.

6.7. Reflectancia de hoja obtenida a partir de imágenes de escáner

Para conocer el efecto de los tratamientos sobre la reflectancia en las bandas azul, verde y roja se analizó la variación de éstas en las hojas recientemente maduras. La prueba de medias por Tukey ($\alpha= 0.05$) mostró diferencias entre cada uno de los tratamientos para cada banda (Cuadro 14).

Cuadro 13. Efecto de los tratamientos en porcentaje de reflectancia obtenida con imágenes de escáner.

Banda	Agrupación Tukey	Reflectancia media	Tratamiento
Azul	A	31.9709	1
	B	30.4739	2
	B C	30.1046	4
	B C	29.9935	3
	C	29.7047	5
Verde	A	35.9447	1
	A B	35.2428	2
	B C	33.8696	3
	C D	32.8089	4
	D	31.4925	5
Rojo	A	26.3973	1
	A B	26.1815	2
	A B	25.729	3
	B C	25.2759	4
	C	24.6204	5

Se encontró que a mayor porcentaje de magnesio la reflectancia disminuyó en las bandas azul, verde y rojo. La reflectancia de hojas obtenidas con imágenes de escáner presentó modelos de tipo exponencial para el porcentaje de magnesio y la reflectancia en la banda azul con una $R^2 = 0.8940$. Para la banda verde se presentó mejor ajuste con un modelo de tipo polinómico con $R^2 = 0.9709$ y para la roja se muestra un modelo de tipo polinómico y $R^2 = 0.9182$ (Figura 19).

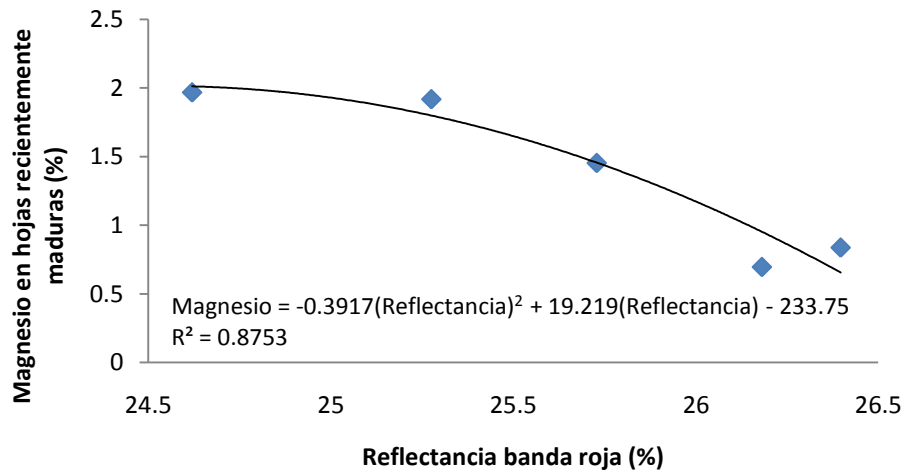
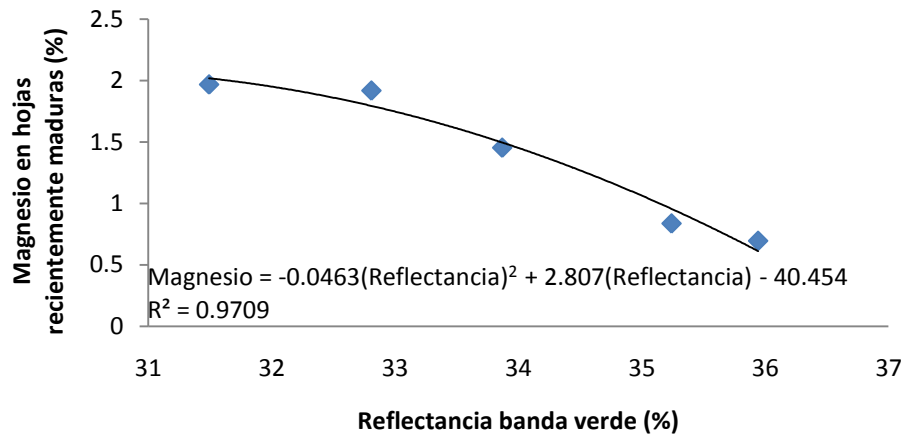
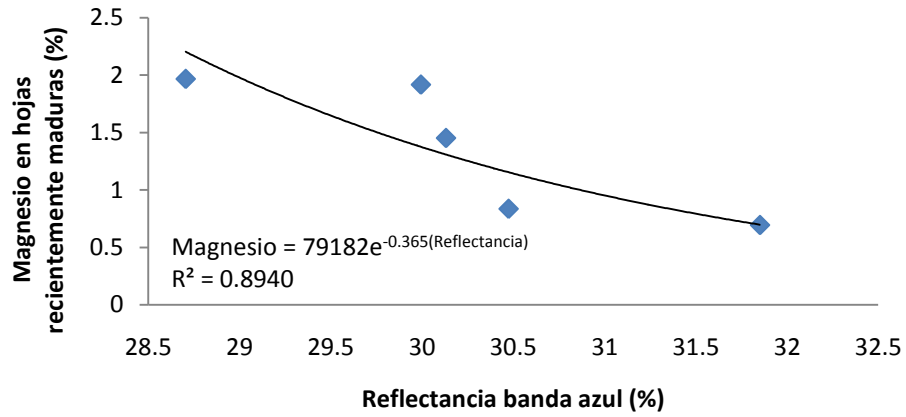


Figura 19. Relación entre la concentración de magnesio y la reflectancia, obtenida con imágenes de escáner, en las bandas azul, verde y roja.

6.8. Relación entre la reflectancia medida con el escáner y las mediciones de SPAD

Para estudiar la relación existente entre la reflectancia de hojas en las bandas azul, verde y roja y la concentración de clorofila medida con el SPAD se probaron diversos modelos, los que más se ajustan para cada banda se muestran en el cuadro 15.

Cuadro 14. Modelos para estimar la reflectancia de hojas recientemente maduras de pepino a partir de la concentración de clorofila medida con SPAD.

Modelo	R ²
Reflectancia banda azul= $0.3935(\text{Clorofila})^2 - 49.433(\text{Clorofila}) + 1581.9$	0.7756
Reflectancia banda verde= $-0.3698(\text{Clorofila})^2 - 47.062(\text{Clorofila}) + 1529.7$	0.8519
Reflectancia banda roja= $-0.1175(\text{Clorofila})^2 - 15.029(\text{Clorofila}) + 505.47$	0.7606

Se observa una relación negativa entre la reflectancia y la concentración de clorofila de hojas estimada con SPAD. Esta relación fue de tipo polinómica para las tres bandas (Figura 20 y 21). La reflectancia en la banda verde fue la que presentó el mayor grado de asociación con la clorofila medida con SPAD.

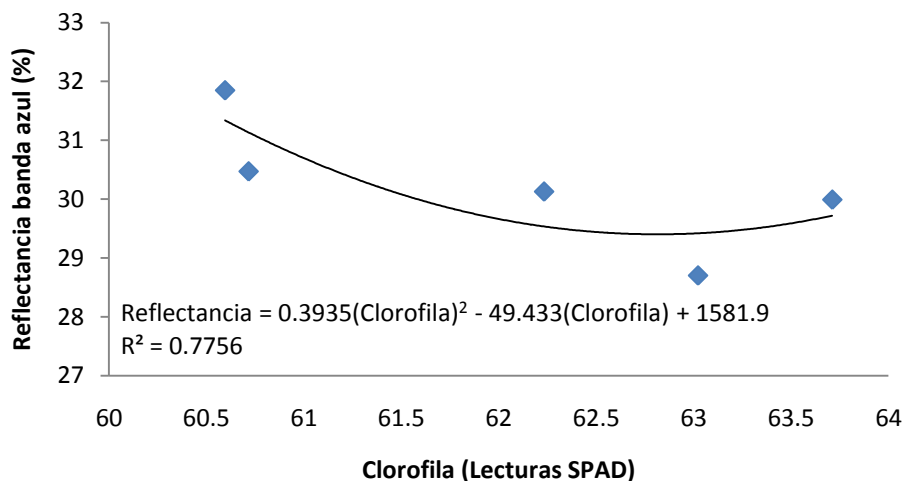


Figura 20. Relación entre la clorofila medida con SPAD y la reflectancia en la banda azul de hojas de pepino recientemente maduras.

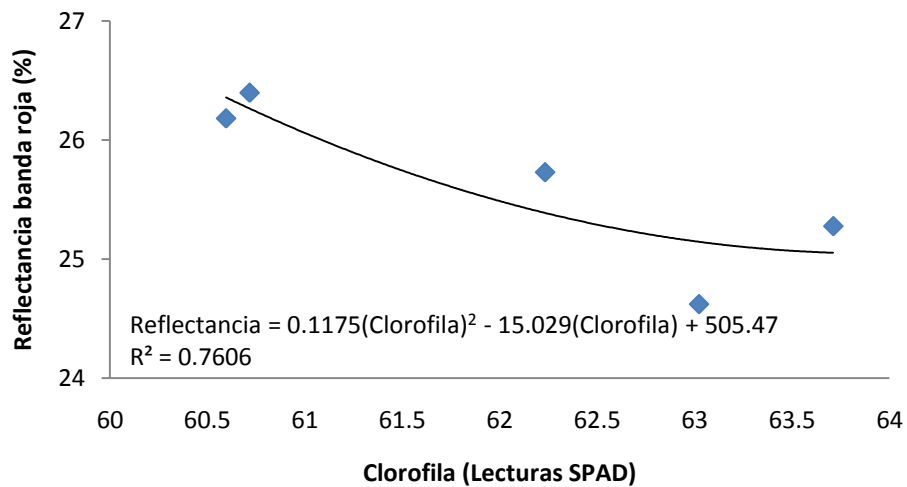
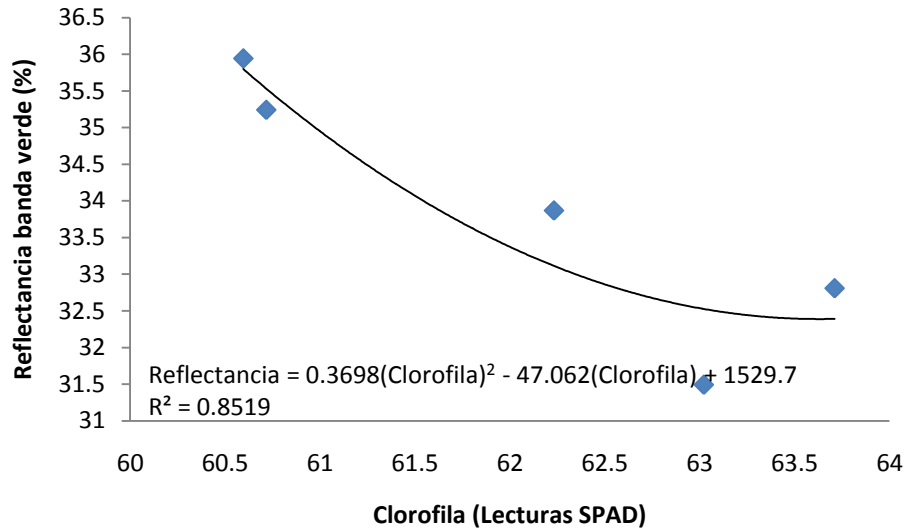


Figura 21. Relación entre la clorofila medida con SPAD y la reflectancia en la banda verde y roja de hojas de pepino recientemente maduras.

Thomas y Oerther (1972) indican que las bajas reflectancias de los cultivos saludables, observadas en la región visible del espectro electromagnético, se deben principalmente a la intensa absorción de la molécula de clorofila.

El pico de absorción de la clorofila a en la región azul se mezcla con la absorción de carotenoides, por lo que algunos investigadores han optado por no utilizarlo (Sims y Gamon, 2002).

6.9. Índices espectrales

Se encontró una relación inversa entre la Tasa NDVI 560nm/NDVI 660nm y el porcentaje de magnesio en hojas jóvenes, esto debido a que las deficiencias de magnesio se asocian a bajos contenidos de clorofila. Los índices de reflectancia de la vegetación son útiles para identificar el estado de salud de un cultivo (Ritchie, 2003). La relación entre la Tasa NDVI 560nm/NDVI 660nm y el porcentaje de magnesio en hojas jóvenes presentó una regresión lineal con una R^2 de 0.9093 (Figura 22). Esta tasa se utiliza para identificar clorosis en el cultivo, es un índice simple y presenta un alto coeficiente de determinación al correlacionarlo con las concentraciones de nitrógeno (De la Cruz, 2008). Para el caso de magnesio también existe una alta correlación como lo comprueban los resultados obtenidos.

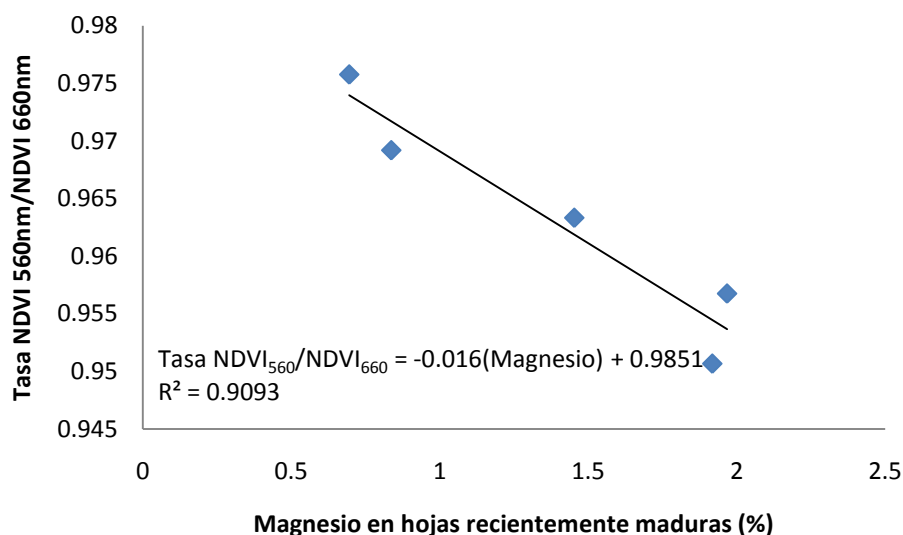


Figura 22. Relación entre la tasa NDVI 560nm/NDVI 660nm y el porcentaje de magnesio.

6. CONCLUSIONES

1. Para concentración de magnesio en hojas recientemente maduras de pepino y las unidades SPAD medidas en las mismas hojas se observó una relación positiva ($R^2=0.8427$).
 2. Se obtuvo una relación negativa entre la concentración de magnesio y la reflectancia de hojas de pepino obtenida con radiómetro, observándose diferencias solo en las longitudes 510, 560, 610, 660 y 830 nm, donde se presentó mayor grado de asociación y fue en 830 nm con una $R^2= 0.8802$.
 3. Para concentración de magnesio y la reflectancia obtenida de fotografías de hojas recientemente maduras la relación fue negativa. En la reflectancia de la banda azul se observó el mayor grado de asociación entre las variables ($R^2= 0.8891$).
 4. Se encontró una relación negativa entre la concentración de magnesio en hojas recientemente maduras de plantas de pepino y la reflectancia de las mismas hojas obtenida usando imágenes de escáner. En la banda verde se presentó el mayor grado de asociación ($R^2=0.9709$).
- El método que utiliza imágenes de escáner muestra mayores cualidades para extenderse a campo por ser económico, rápido y confiable, no obstante es necesario estandarizar los procesos de obtención de reflectancias y establecer modelos para distintos cultivos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M. L., W. D. Philpot, and W. A. Norvell. 1999. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *J. Remote Sens.* 20:3663-3675.
- Adamsen, F. J., Pinter, Jr., P. J. Barnes E.M. *et al.* 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science.* 39(3): 719-724.
- Ahmed, I. S., Reid, J. F. 1996. Evaluation of colour representations for maize images. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 63(3): 185-196.
- Al-Abbas, A.H., Barr, R.; Hall, J.D., Crane, F.L. y M.F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agron. J.* 66:16-20.
- Alcántar, G. G., L. I. Trejo. 2008. Elementos esenciales. *In: Nutrición de Cultivos.* Editorial Mundi-Prensa. México. 438 p.
- Alcántar, G. G., y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo. México.
- Alonso, C., V. Moreno, y E. Rodríguez. 1999. Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. VIII Congreso Nacional de Teledetección. INDRA. Albacete, España.
- American Society of Photogrametry. 1983. Manual of remote sensing. Vol., 2^a edition, Sheridan Press, U.S.A. p 2500.
- Bacci, L., De Vincenzi, M., Rapi, B. *et al.* 1998. Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture.* 19(2): 167-186.

Baszynski, T., Wajda, L., Krol M., Wolinska D., Krupa Z., Tukendorf A. 1980. Photosynthetic activities of cadmium-treated tomato plants. *Physiologia Plantarum* 48: 365-370.

Best, R. G., and J. C. Harian. 1985. Spectral estimation of green leaf area Index of oats. *Remote Sens. Environ.* 17:27- 36.

Brizuela-Amador, B., Alcántar-González, G., Sánchez-García, P., Pea-Kalra, Y., Crumbaugh, J., Olive C., Tijerina-Chávez L. y R. Maldonado-Torres. 2007. Establecimiento de índices espectrales en el diagnostico nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia.* 41 (8): 827-835.

Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E. y J.R. Burdge. 2004. *Química la ciencia central.* Novena edición. Ed. Prentice-Hall. México.

Bolaños, M. 2000. Estimación de los volúmenes de agua usados en zonas de riego mediante uso de sensores remotos. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Bullock, D. G., and Anderson, D. S. 1998. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. *Journal of Plant Nutrition.* 21:741–755.

Buscaglia, H.J., Varco, J.J. 2002. Early detection of cotton leaf nitrogen status using reflectance. *Journal of Plant Nutrition.* 25(9): 2067-2080.

Carter, G. A., and B. A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leave for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31:1424- 1432.

Cadahía, L. C. 2000. *Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales.* 2a edición. Editorial Mundi-Prensa. Barcelona España. P 66-67.

Cakmak, I; Marschner, H. 1992. Magnesium-deficiency and high light-intensity enhance activities of superoxide-dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean-leaves. *Plant Physiology.* 98: 1222-1227.

Campbell, R. J., Mobley, K. N., Marini, R. P, and Pfeiffer, D. G. 1990. Growing conditions alter the relationship between SPAD-501 values and apple leaf chlorophyll. Hort Science. 25: 330–331.

Carter, G. A. y B. A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. J. Environ. Qual. Vol. 31:1424 – 1432.

Chapman, S. C., and Barreto, H. J. 1997. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. Agronomy Journal. 89: 557–562.

Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. 2009. Monografía del pepino. Veracruz, México.

Curran, P. J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. Remote Sens. Environ. 30: 271 – 278.

Curran, P. J., J. L. Dungan, and D.L. Peterson. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clark methodologies. Remote Sens. Environ 76:349-359.

Dawson, T. P. 2000. The potential for estimating chlorophyll content from a vegetation canopy using the medium resolution imaging spectrometer (MERIS). Int. J. Remote Sens. 21:2043-2051.

De la Cruz, D. J. 2008. Reflectancia e índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 78 pp.

Dixon, P., Weinig, C., Schmitt, J. 2001. Susceptibility to UV damage in *Impatiens capensis* (Balsaminaceae): testing for opportunity costs to shade-avoidance and population differentiation. American Journal of Botany. 88(8): 1401-1408.

Dusek, D. A., R. D. Jackson, and J. T. Musick. 1985. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. *Remote Sens. Environ.* 18:255-267.

Etchevers, J. D. 1997. Análisis de suelo, planta y agua como herramienta de decisión para el manejo de los cultivos. p: 81-110. En: Curso Nacional de Fertirrigación. Universidad Autónoma de Sinaloa y Fundación Produce Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.

FAOSTAT. 2007. FAO Statistical Databases & Data-sets. Food and Agriculture Organization of the United Nations. faostat.fao.org. (Consultado: octubre de 2009).

FAOSTAT. 2009. FAO Statistical Databases & Data-sets. Food and Agriculture Organization of the United Nations. faostat.fao.org. (Consultado: junio, 2010).

FAOSTAT. 2010. FAO Statistical Databases & Data-sets. Food and Agriculture Organization of the United Nations. faostat.fao.org. (Consultado: diciembre, 2010).

Feild, T. S., Lee, D. W., Holbrook, N. M. 2001. Why leaves turn red in autumn. The role of anthocyanins in senescing leaves of red-osier dogwood. *Plant Physiology.* 127(2): 566-574.

Fernández, S., D. Vidal, E. Simon and L. Solé-Sugrañes. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sens.* 15:1867-1884.

García, M. S. 2007. Respuestas agronómicas y fisiológicas del pepino a diferentes concentraciones de cloruro de sodio. Tesis Maestría. IRENAT. COLPOS. 148 pp.

Gates, D. M., Keegan, H. J., Scheleter J. C. y V. R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics.* 4: 11-20.

Gitelson, A. A. and M. N. Merzlyak. 1998. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Adv. Space Res.* 22:689- 692.

- Gitelson, A. A., A. Viña, V. Ciganda, D. C. Rundquist and T. J. Arkebauer. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letter*.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers*. 6^a. Edición. Prentice Hall. 499 p.
- Hawkins, T. S., E. S. Gardiner, and G. S. Comer. 2009. Modeling the relationship between extractable chlorophyll and SPAD-502 readings for endangered plant species research. *Journal for Nature Conservation*. 17:125-129.
- Hecht, E. 2000. *Óptica*. Tercera Edición. Traducción al español de: Raffaello, D. C. Addison Wesley Iberoamericana. Madrid, España.
- INFOASERCA. 2010. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA). www.infoaserca.gob.mx (Consultado: diciembre, 2010).
- Innes, J.L., Ghosh, S., Schwyzer, A. 1996. A method for the identification of trees with unusually color foliage. *Canadian Journal of Forest Research*. 26(9): 1548-1555.
- Jackson, R.D., P.N. Slater, and P.J. Rinter, 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing Of the Environment*, v. 15,p.187-208.
- Jiménez, M. V. 2009. Propiedades ópticas de trigo y deficiencias de nitrógeno. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 51 pp.
- Jones G. H. 1983. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Londres, Inglaterra. 323 pp.
- Jones G. H. 1986. *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Londres, Inglaterra. 323 pp.
- Jones, M. J. 1997. *Organic chemistry*. W. W. Norton and Company, New York. *Ecology* 50:663-666.

Jones, J., B. Jr. 1999. Tomato plant culture "In the field, greenhouse and home garden". CRS Press. Florida, USA.

Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50:663-666.

Kampmann, H.H., Hansen, O.B. 1994. Using colour image analysis for quantitative assesment of powdery mildew on cucumber. *Euphytica*. 79: 19-27.

Kupper, H., Kupper F., Spiller M. 1996. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. *J Exp Bot* 47, 259–266.

Kupper, H., Kupper F., Spiller M. 1998. *In situ* detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants. *Photosynth Res* 58, 123–133.

Lawlor, D. W. 1993. Photosynthesis: molecular, physiological and environmental processes. Longman Scientific and Technical. Hong Kong. 318 pp.

Lee, D. W., O'Keefe, J., Holbrook, N. M., Field, T.S. 2003. Pigment dynamics and autumn leaf senescence in a New England deciduous forest, eastern USA. *Ecological Research*. 18(6): 677-694.

Lihong, X.; Weixing, C.; Weihong, L.; Tingbo, D. and Y. Zhu. 2004. Monitoring leaf nitrogen status in rice with Canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal*. 96:135-142.

Lillesand, T. and R. W. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0471305758.

López, Z. C. 2003. Guía Técnica: Cultivo del pepino. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). Guía Técnica No. 17. El Salvador. <http://centa.gob.sv/uploads/documentos/Guia%20pepino%202003.pdf>

Major, D. J., F. Baret y G. Guyot. 1990. A ratio vegetation Index adjusted for soil brightness. *Int. J. Remote Sens*. Vol. 11: 727- 740.

Malavolta, E. 1981. Manual de Química agrícola. Adobos e edubacao. Sao Paulo, Edit. Agronómica "CERES", 1a. Cd-, 594 pp.

Maroto, J. V. 2002. Elementos de horticultura general. Segunda edición. Ed. Mundi-Prensa. Barcelona, España.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. Londres Inglaterra. 674 pp.

Martin, D. P., Rybicki, E. P. 1998. Microcomputer-based quantification of maize streak virus symptoms in *Zea mays*. *Phytopathology*. 88(5): 422-427.

McSwain, B. D., Tsujimoto, H. Y. & Arnon, D. I. 1976. Effects of magnesium and chloride ions on light-induced electron transport in membrane fragments from a blue-green alga. *Biochim. Biophys. Acta* 423, 313-322.

Merzlyak, M. N., Chivkunova, O. B. 2000. Light-stress-induced pigment changes and evidence for anthocyanin photoprotection in apples. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 55: 155-163.

Mills H. A. y Jones B. J. 1996. Plant analysis handbook II. Micro Macro Publishing, Inc. Georgia USA.

Munson R y W. Nelson. 1981. Principles plant and practices in plant analysis. L. M. Walsh and J. D. Beaton (eda). Soil Science of Society of American Madison. Wisconsin pp 223-248.

Murakami, P. F., M. R. Turner, A. K. Van de Berg, *et al.* 2005. An Instructional Guide for Leaf Color Analysis using Digital Imaging Software. USDA. General Technical Report NE-327.

Navarrete, G. R. 2005. Curvas de absorción de nutrientes en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus L.*) bajo condiciones de campo. Tesis Licenciatura. Zamorano.

Navarro, B. S. y G. Navarro G. 2003. Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda Edición. Editorial Mundi-Prensa. Barcelona, España. 487 p.

Neill, S., Gould, K. S. 1999. Optical properties of leaves in relation to anthocyanin concentration and distribution. *Canadian Journal of Botany*. 77: 1777-1782.

Núñez, E. R. 2008. El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. *In: Nutrición de Cultivos*. Editorial Mundi-Prensa. México. 438 p.

Olmstead, J. W., Lang, G. A. 2001. Assessment of severity of powdery mildew infection of sweet cherry leaves by digital image analysis. *Hort. Science*. 36: 107-111.

Ommen, O. E., Donnelly, A., Vanhoutvin, S. *et al.* 1999. Chlorophyll content of spring wheat flag leaves grown under elevated CO₂ concentrations and other environmental stresses within the 'ESPACE-wheat' project. *European Journal of Agronomy*. 10: 197-203.

Orit, S. 2002. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *In: BioMetals*. Vol. 15: 309–323.

Osborne, S.L.; Schepers, J.S.; Francis, D.D. and M.R. Schlemmer. 2002. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal*. 94:1215-1221.

Palacios, V, E Y J. E. Palacios-Sánchez. 2003. Introducción a los Sensores Remotos y a los Sistemas de Información Geográfica (Agricultura Asistida por Sensores Remotos). Notas de Curso. Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Papenbrock, J., M. Hans- Peter, R. Tanka, E. Krusse and B. Grimm. 2000. Role of magnesium chelatase activity in the early steps of the tetrapyrrole biosynthetic pathway. *Plant Physiology*. 122: 1161-1170.

Pedrerros, D., G. L. Aguilar y G. Senay. 2004. Reporte decadal sobre balanceo hídrico para el maíz, segunda década. Sistema Mesoamericano de Alerta Temprana para Seguridad Alimentaria, Boletín No. 14, Guatemala, Guatemala.

Peñuelas, J., J. A. Gamon, A. L. Freedman, J. Merino, and C. B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen water-limited sunflower leaves. *Remote Sens. Environ.* 48:135-146.

Peñuelas, J., Isla, R., Fuella, I. y Araus, J. L., 1997. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. *Crop Sci.*, 37:198-202.

Pérez, A. J., López, F., Benlloch, J. V., Christensen, S. 2000. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture.* 25: 197-212.

Pierce, J. 1986. Determinants of substrate specificity and the role of metal in the reaction of ribulosebiphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant physiol.* 81: 943-945.

Pietrini, F., Iannelli, M. A., Massacci, A. 2002. Anthocyanin accumulation in the illuminated surface of maize leaves enhances protection from photo-inhibitory risks at low temperature, without further limitation to photosynthesis. *Plant, Cell and Environment.* 25: 1251-1259.

Piñeros, M. y Tester M. 1995 Characterization of a voltage dependent Ca^{2+} -selective channel from wheat roots. *Planta* 195, 478–488.

Piñeros, M. y Tester M. 1997 Calcium channels in higher plant cells: Selectivity, regulation and pharmacology. *J Exp Bot* 48, 551– 577.

Porra, R.J., W.A. Thompson, and P.E. Kriedemann. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochim. Biophys. Acta.* 975:384-394.

Price, T. V., Gross, R., Ho Wey, J., Osborne, C. F. 1993. A comparison of visual and digital image-processing methods in quantifying the severity of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). Australian Journal of Experimental Agriculture. 33: 97-101.

Pulido, M. L. 2000. Estimación del área cultivada en el Distrito de Riego 038 Rio Mayo, a través de imágenes de satélite. Memorias del X Congreso Nacional de Irrigación. Chihuahua, Chih.

Rabideau, G.S., C.S. French, and A.S. Holt. 1946. The absorption and reflection spectra of leaves, chloroplast suspensions, and chloroplast fragments as measured in an Ulbricht Sphere. Am. J. Bot. 33:769-777.

Reay, P. F., Fletcher, R. H., Thomas, V. J. 1998. Chlorophylls, carotenoids and anthocyanin concentrations in the skin of 'Gala' apples during maturation and the influence of foliar applications of nitrogen and magnesium. Journal of the Science of Food and Agriculture. 76: 63-71.

Reuter, D. J. Y robinson, J. D. 1986. Plan Analysis "An Interpretation Manual". Innata-Press. Brunswick- Victoria, Australia. p. 2.

Ritchie, L. G. 2003. Use of ground- based canopy reflectance to determine ground cover, nitrogen and water status and final yield in wheat. Press Utah State University. USA.

Rivas, J. 2000. La luz y el aparato fotosintético. En: Azcon-Bieto, J. y Talon, M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. España. pp. 131-153.

Rosenberg, N. J., Blad, B. y Verma S. 1983. Microclimate the Biological Environment. John Whiley Sons. New York. E. U. A. 495 PP.

SAGARPA. 2003. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. 1995-2003. México.

Sánchez, G. P., C. Molinos da Silva., G. Alcántar G. y M. Sandoval V. 2008. Diagnóstico nutrimental en plantas. *In: Nutrición de Cultivos*. Editorial Mundi-Prensa. México. 438 p.

SAS, 1999. SAS/STAT User's Guide: Statistics. Versión 8th ed. SAS institute, Inc. Cary, N.C. 956 p.

SAS Institute. 2001. The SAS system for Windows, release V8. SAS Institute Inc., Cary, NC.

Schaberg, P. G., Van den Berg, A. K., Murakami, P. F. *et al.* 2003. Factors influencing red expression in autumn foliage of sugar maple trees. *Tree Physiology*. 23: 325-333.

Schrevens, E., Raeymaeckers, L. 1992. Colour characterization of golden delicious apples using digital image processing. *Acta Horticulturae*. 304: 159-166.

SIAP. 2010. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA. México. www.siap.sagarpa.gob.mx. (Consultado: diciembre, 2010).

Sibley, J. L., Eakes, D. J., Gilliam, C. H. *et al.* 1995. Growth and fall color of red maple selections in the southeastern United States. *Journal of Environmental Horticulture*. 13(1): 51-53.

Sibley, J. L., Eakes, D. J., Gilliam, C. H., *et al.* 1996. Foliar SPAD-502 meter values, nitrogen levels, and extractable chlorophyll for red maple selections. *Hort Science*. 31:468–470.

Sims, D. A. and J. A. Gamon. 2002. Relationship between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages. *Remote Sens. Environ.* 81:337- 354.

Soria R., J; Ortiz S., C.A.; Islas G., F. y V. Volke H. 1998. Sensores remotos. Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en

México. Publicación especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (S. M. C.S.) Chapingo, México.

Soria, R. J. 1999. Determinación de sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) a través de sensores remotos. Tesis. COLPOS. México.

Steiner, A. 1984. The Universal Nutrient Solution. Pp. 633-649. *In*: Proceeding of the 6th International Congress on Soilles Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands.

Strimbeck, G. R. 1997. Cold tolerance and winter injury of montane red spruce. Burlington, VT: The University of Vermont. 124 p. Ph.D. dissertation.

Swain, P. and S. Davis. 1978. Remote sensing: the quantitative approach. N.Y.: Mac Graw-Hill Book Co.s

Thomas, J. R., Wiegand, C. L., y V. I. Myers. 1967. Reflectance of cotton leaves and its relation to yield. *Agronomy Journal*. 59:551-554.

Thomas, J. R. y G. F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal*. 83:11-13.

Townsend, A. M., McIntosh, M. S. 1993. Variation among full-sib progenies of red maple in growth, autumn leaf color, and leafhopper injury. *Journal of Environmental Horticulture*. 11: 72-75.

Verdin, J., D. Pedreros y G. Eilerts . 2003. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). FEWS. Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica. USGS/EROS.

VERSTRAETE, M. M. y PINTY, B. 1991. Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 34: 1254-1265.

Vervaeke, F., Schrevens, E., Verreydt, J. *et al.* 1994. The use of digitized video images for monitoring color and color evolution of Jonagold apples during shelf life. Proceedings of the sixth international congress on engineering and food; 1993 May 23-27; Chiba, Japan. London, UK: Blackie Academic and Professional: 200-202.

White, P. J; Piñeros, M; Tester, M; y Ridout M. S. 2000 Cation permeability and selectivity of a root plasma membrane calcium channel. *J Membr Biol* 174, 71–83.

Woodall, G. S; Dodd, I. C; Stewart, G. R. 1998. Contrasting leaf development within the genus *Syzygium*. *Journal of Experimental Botany*. 49(318): 79-87.

Zhang, M; De Baerdemaeker, J; y Schrevens E. 2003. Effects of different varieties and shelf storage conditions of chicory on deteriorative color changes using digital image processing and analysis. *Food Research International* 36 (2003) 669–676

8. ANEXOS

Anexo 1. Conceptos de radiación

Absorbancia (α): se define como la fracción de la radiación incidente de una longitud de onda específica del espectro, que es absorbida por un material (Wm^{-2}) (Jones, 1983).

Absorción: es el proceso por el cual la energía radiante incidente es transferida a la estructura de las moléculas de una sustancia (Jones, 1983).

Emisividad (ϵ): es una longitud de onda particular, es la fracción de radiación máxima posible en una longitud de onda que puede ser emitida por un cuerpo con determinada temperatura. Un material ideal que es un perfecto absorbedor y emisor de radiación en todas las longitudes de onda es denominado cuerpo negro (Jones, 1983).

Energía radiante o electromagnética: se refiere a la forma de energía que se dispersa en forma de ondas. En realidad se trata de ondas de pequeñas partículas materiales conocidas como fotones. Estas viajan como paquetes discretos de energía llamados quanta o quantum (quanto en singular). La cantidad de energía de un cuanto depende de la longitud de onda con que viaja el fotón; entre más corta, mayor es la cantidad de energía que posee (Lawlor, 1993).

Irradiancia: es la cantidad de energía de radiación que incide sobre una unidad de superficie plana en un cierto intervalo de tiempo. La irradiancia se mide en unidades radiométricas (basadas en la energía producida por unidad de espacio y tiempo), cuánticas (basadas en el número de fotones incidentes en una superficie por unidad de tiempo) o fotométricas (basadas en el brillo producido por la intensidad de radiación) (Lawlor, 1993).

Radiación fotosintéticamente activa: también llamada irradiancia fotosintética o flujo fotónico fotosintético. Se refiere a la irradiancia cuya longitud de onda está

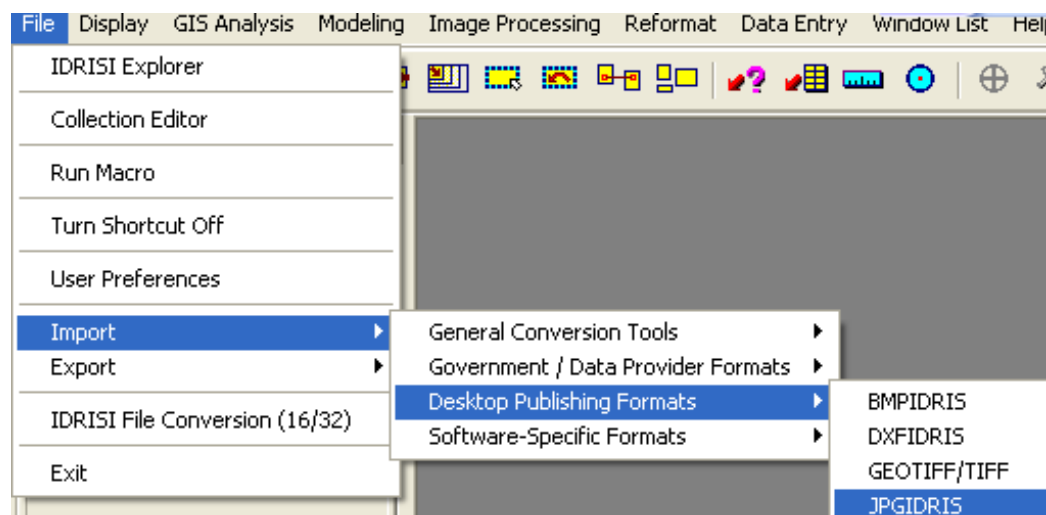
comprendida entre los 400 y 700 nm, es decir, el espectro de luz visible que tiene influencia sobre el proceso fotosintético (Jones, 1986).

Reflectividad (r): es la porción de energía radiante reflejada del total que incide sobre la superficie (Rosenberg *et al.*, 1983).

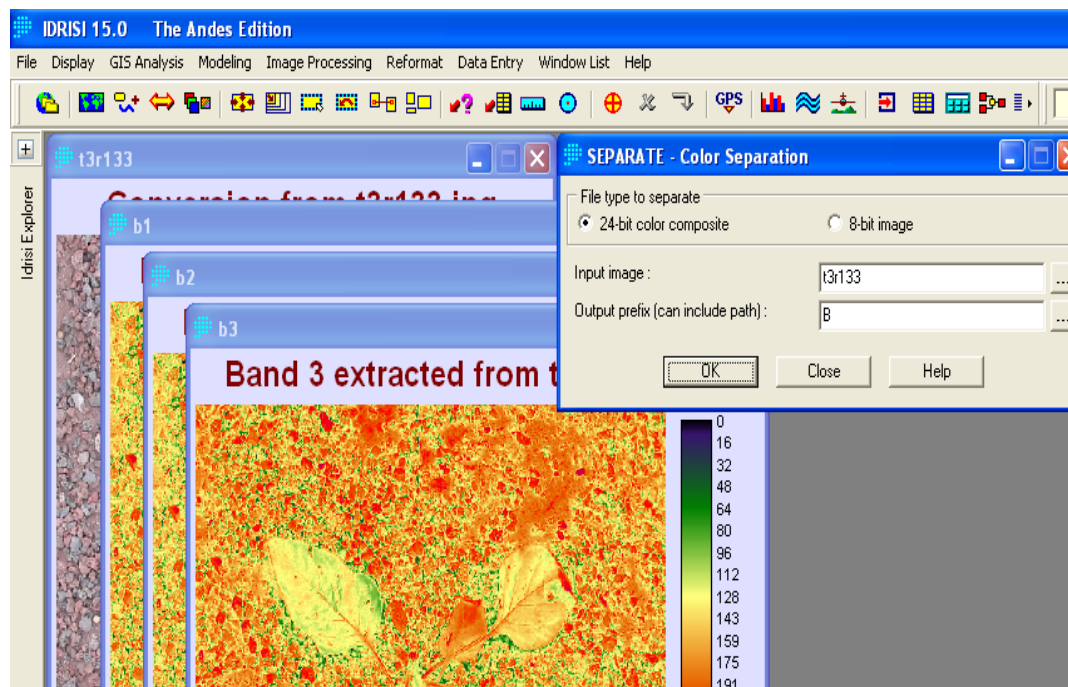
Transmisividad o trasmitancia (t): es la porción de la radiación transmitida del total incidente. La suma de $\alpha + r + t$ en cualquier longitud de onda es uno. En forma práctica t y r se miden, y α y ϵ se calculan (Rosenberg *et al.*, 1983).

Anexo 2. Instrucciones para obtener la reflectancia del tejido vegetal en bandas azul, verde y roja, utilizando el paquete de cómputo Idrisi Andes.

1. Se Importan Las Imágenes cambiando de formato JPG a IDRISI.



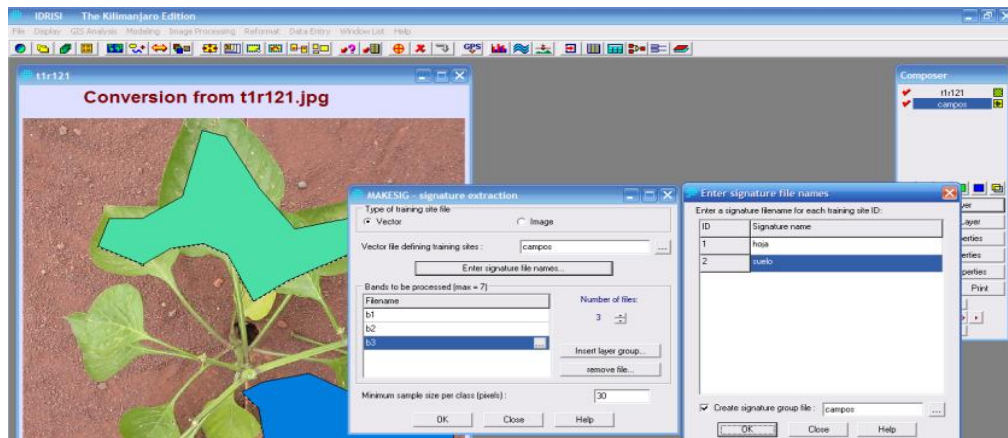
2. Las imágenes ya en formato de IDRISI se separan en 3 bandas (azul, verde y roja)



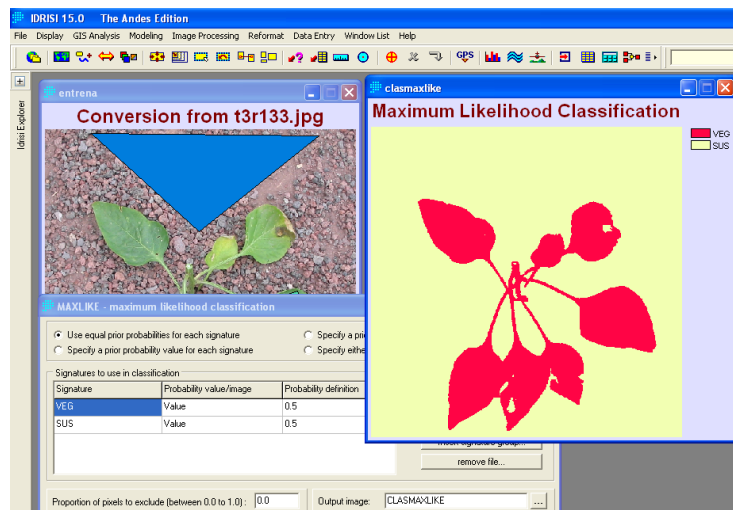
3. Se procede a digitalizar los campos de entrenamiento



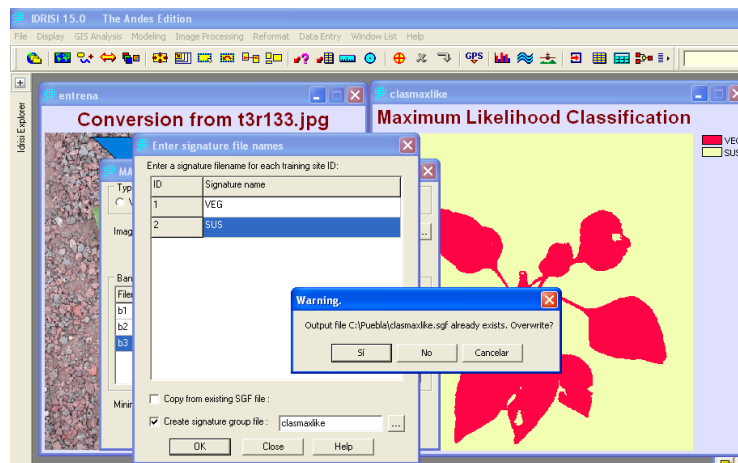
4. Se extraen las firmas de los campos de entrenamiento utilizando las 3 bandas



5. Con las firmas obtenidas se procede a clasificar la imagen.



6. Se calcula nuevamente la reflectancia utilizando la imagen clasificada



7. Se pide el histograma de la clase que se desea, en nuestro caso la vegetación

