



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CAMPUS MONTECILLO  
POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

## **REFLECTANCIA E ÍNDICES ESPECTRALES EN PIMIENTO PARA EL DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL DE NITRÓGENO**

**DE LA CRUZ DURÁN JAIRO AARÓN**

TESIS  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2008

La presente tesis titulada: “**Reflectancia e índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno**” realizada por el alumno: Ing. Jairo Aarón de la Cruz Durán bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EDAFOLOGIA

## CONSEJO PARTICULAR

Consejero \_\_\_\_\_

Dr. Prometeo Sánchez García

Asesor \_\_\_\_\_

Dr. Arturo Galvis Spínola

Asesor \_\_\_\_\_

Dr. José Alfredo Carrillo Salazar

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Junio de 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la ejecución de mis estudios de maestría.

A mi Consejo Particular de quienes reconozco su liderazgo como profesores e investigadores, creadores de nuevos conocimientos que impulsan el progreso agrícola de México.

Al Dr. Prometeo Sánchez García por su sociabilidad, calidad humana y apoyo en la construcción de esta tesis.

Al Dr. Arturo Galvis Spínola por su confianza, amistad y motivación en la superación profesional.

Al Dr. José Alfredo Carrillo Salazar un excelente científico, por su aceptación y colaboración otorgada.

A Dr. Manuel Sandoval Villa por su amistad y sus comentarios que ayudaron a mejorar las ideas de esta investigación.

A la Dra. Libia Iris Trejo Tellez por su apoyo, estímulo, enseñanza y confianza brindada sin reservas. Por su amistad y gran calidad humana.

Al Dr. Juan Luis Tirado Torres por su confianza, amistad tan generosa y buenas vibras, gracias.

A Laurita (Nutrición Vegetal-CP), Lupita (Nutrición Vegetal-CP), Antero Hernández Vera (Fitotecnia-UACH) y Telesforo †(Fitotecnia-UACH) por su buena disposición y amistad.....Gracias.

A mis amigos de estudios que juntos compartimos experiencias: Rosalino Gasga Peña, José Luis Ruiz, Ricardo Mendoza Páez y Víctor Jiménez.

# DEDICATORIAS

**A la vida por los días oscuros y soleados que han acrecentado mi fortaleza y forjado mi carácter.**

**A mi madre Fabiola Durán Guiral por su amor y enseñanza de la vida que ha sido mi proposición para un constante progreso.**

**A mi siempre querida hermana Fabiola Noemí por su correspondencia y momentos felices que me ha regalado durante mi vida.**

**A mis amigos y familiares con los que compartí parte de mi destino: La familia Franco Durán, Robles Oliveti, Gallegos Goytia y todos los amigos de los Toros Salvajes de Fútbol Americano.**

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de pimienta (miles de toneladas) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.....	14
Cuadro 2. Superficie cultivada de pimienta (miles de hectáreas) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.....	15
Cuadro 3. Rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.....	16
Cuadro 4. Producción, superficie cultivada y rendimiento de chiles en México 1990 al 2004.....	17
Cuadro 5. Superficies sembrada (ha), producción (toneladas) y rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) de pimienta morrón en los principales estados productores de México 2003 - 2004.....	18
Cuadro 6. Valores críticos y óptimos de concentración de nutrientes en hojas y pecíolos para diferentes etapas fenológicas en el cultivo de chile Bell.....	46
Cuadro 7. Concentración nutrimental en algunos órganos de referencia en distintas etapas fenológicas del cultivo de chile <i>C. annuum</i> (Piggott, 1988).....	47
Cuadro 8. Contenido de elementos minerales a nivel foliar de referencia para el cultivo de pimienta.....	48
Cuadro 9. Niveles foliares de referencia para cultivo del pimienta (en base a %MS).....	48
Cuadro 10. Extracción de nutrimentos de las diferentes partes de la planta de pimienta.....	49
Cuadro 11. Rangos óptimos de concentración foliar para pimienta (en base a % de MS) propuestos por Cadahia (2000).....	49
Cuadro 12. Concentración de nutrimentos mediante el análisis de savia en el cultivo de chile Bell (Burgueño <i>et al.</i> , 1994).....	50
Cuadro 13. Rangos óptimos de concentración en savia ( $mg*1^{-1}$ ) para pimienta, propuestos por Cadahia (2000) .....	50
Cuadro 14. Extracción de nutrientes por el cultivo de pimienta.....	52
Cuadro 15. Diseño de tratamientos.....	56
Cuadro 16. Micronutrimentos empleados.....	56

Cuadro 17. Índices espectrales para el análisis de las propiedades de reflectancia de la hoja.....	58
Cuadro 18. Patrones de reflectancia, obtenidos con un espectro-radiómetro en plantas de pimiento con diferentes niveles de nitrógeno y días después del trasplante (DDT).....	60
Cuadro 19. Relación de la cobertura vegetal digitalizada y la tasa normalizada verde/rojo NDVI560/NDVI660 en pimiento.....	62
Cuadro 20. Relación de NDVI560 y NDVI660. ....	62
Cuadro 21. Modelo verde para la identificación oportuna de la clorosis. ....	65
Cuadro 22. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja con la reflectancia simple del espectro verde del radiómetro. ....	66
Cuadro 23. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja con la reflectancia simple del espectro verde en escáner . ....	67
Cuadro 24. Comparación de la concentración de nitrógeno de hoja con lecturas SPAD.....	67
Cuadro 25. Función ajustada a la relación variable biofísica pendiente en escáner (azul a verde) y variable bioquímica nitrógeno total.....	69
Cuadro 26. Función ajustada a la relación variable biofísica verdor y variable bioquímica nitrógeno total.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema que indica el Sistema Pasivo de Energía Reflejada.....	26
Figura 2. Esquema que indica el Sistema Pasivo de Energía Emitida.....	26
Figura 3. Esquema que indica el Sistema Activo de Energía Reflejada.....	27
Figura 4. Firma espectral de un cultivo de maíz sano y uno con estrés.....	31
Figura 5. Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo ( <a href="http://ltpwww.gsfc.nasa.gov">http://ltpwww.gsfc.nasa.gov</a> ).....	32
Figura 6. Patrones de reflectancia, obtenidos con un espectro-radiómetro en plantas de pimiento con diferentes niveles de nitrógeno y días después del trasplante “DDT” (A: 36 DDT; B: 46 DDT; C: 51 DDT; D: 60 DDT).....	59
Figura 7. Ajuste lineal entre índice de área foliar estimado (IAFest) y cobertura vegetal (medida por digitalización de imágenes) en pimiento a los 51 DDT.....	61
Figura 8. Relación lineal de la tasa NDVI560 / NDVI660 y N% exp2 51 DDT.....	63
Figura 9. Relación lineal de la tasa NDVI560 / NDVI660 y lecturas SPAD con un coeficiente de correlación de -0.82789 a los 51 DDT.....	64

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	10
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	12
2.1. La producción y la comercialización del pimiento .....	12
2.1.1. Producción .....	13
2.1.2 Superficie cultivada .....	14
2.1.3 Principales países exportadores .....	16
2.1.4 Situación del pimiento en México .....	16
2.1.5 Principales estados productores .....	18
2.2. Técnicas de diagnóstico nutrimental .....	19
2.2.1 Análisis mineral .....	19
2.2.1.1 Principios del análisis foliar .....	20
2.2.1.1.1 Muestreo .....	20
2.2.1.1.2 Análisis químico del tejido vegetal .....	21
2.2.2 Medidor portátil de clorofila SPAD-502 .....	22
2.2.3 Percepción remota .....	23
2.2.3.1 Vehículos o plataformas .....	25
2.2.3.2 Sistema de obtención de datos .....	25
2.2.3.3 Aplicación de los sensores remotos en la agricultura .....	27
2.2.3.3.1 Bandas espectrales .....	30
2.3 Conceptos y leyes de la radiación .....	32
2.4. Interacciones planta-radiación .....	36
2.5. Interacciones hoja versus radiación visible e infrarrojo cercano .....	36
2.6. Instrumentación .....	37
2.7. Reflectancia de la hoja y estrés de la planta .....	38
2.8. Ángulo del sensor .....	39
2.9. Ángulo solar y hora del día .....	39
2.10. Cubierta del suelo y fondo de suelo .....	40
2.11. Índices espectrales .....	41
2.11.1. Tasa e índices de diferencia vegetal .....	42
2.11.2. Índices vegetales ajustados por el suelo .....	42
2.11.3. Índices de derivadas .....	43
2.12 El nitrógeno en el Pimiento .....	45
2.12.1 Importancia del nitrógeno en la planta .....	45
2.12.2 Síntomas de deficiencia de N en la planta .....	51
2.12.3 El nitrógeno como mejorador de la absorción del fósforo .....	51
2.12.4 Extracción nutrimental .....	52
CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LITERATURA .....	53
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	54
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	55
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	59
6. CONCLUSIONES .....	70
7. LITERATURA CITADA .....	71

## RESUMEN

El conocimiento de las firmas espectrales en la valoración de parámetros fisiológicos y nutrimentales, serán de gran utilidad en una agricultura mayormente competitiva. El objetivo de esta investigación consistió en obtener firmas espectrales en hojas de pimiento mediante un espectrómetro e imágenes digitales (escáner) durante el desarrollo del cultivo, para el diagnóstico de estrés por carencias y excesos de nitrógeno. Se determinó la reflectancia de las hojas de pimiento en tres bandas del espectro visible (RGB) y dos del infrarrojo cercano (NR), se obtuvieron imágenes de plantas para la determinación del índice de área foliar (IAF) y se colectaron muestras foliares para el análisis de nitrógeno, el cual se determinó por el método de microkjeldahl.

La aplicación de los índices de vegetación, tales como la tasa normalizada (NDVI 560 / NDVI 660), en la interpretación de las firmas espectrales obtenidas mediante el espectrómetro, es una herramienta que permite diagnosticar la cobertura vegetal y el estado nitrogenado del cultivo de pimiento.

La aplicación de los índices de vegetación, como el modelo verde (830 nm / 560 nm) -1 y tasa normalizada (NDVI 560) / (NDVI 660), en la interpretación de las firmas espectrales obtenidas mediante el espectrómetro CROPSCAN, permitió establecer niveles críticos de reflectancia en índices de vegetación los cuales mostraron una alta correlación ( $r^2 > 0.8$ ) con niveles de deficiencia menor de 3% de nitrógeno.

El índice de vegetación verdor (SPAD \* área foliar) y pendiente (verde-rojo) demostraron fortaleza para el diagnóstico-pronóstico de las variables biofísicas y bioquímicas estudiadas y para establecer la etapa crítica y escalas de valores de estrés por nitrógeno.

**Palabras clave:** Sensores remotos, reflectancia, NDVI, nitrógeno, espectrómetro, escáner, cámara digital, firmas espectrales, nivel crítico de reflectancia.

## SUMMARY

The knowledge of the spectral signatures in the valuation of physiological parameters and nutritional, they will be of great utility in an agriculture competitive mainly. The lens of this research consisted of obtaining spectral signatures in leaves of pepper by spectrometer and digital images (scanner) during the development of the culture, for the nutritional diagnosis of stress for lacks and excesses of nitrogen. The reflectancia of the plant was evaluated in three bands of the visible spectrum (RGB) and two of the near infrared (NR), images took to determination the index of foliate area (IAF) and were collected foliate for the nitrogen analysis, with the method of microkjeldahl.

The application of the vegetation indexes, such as the rate normalized (NDVI 560 / NDVI 660), in the interpretation of the spectral signatures obtained by the spectrometer, is a tool that allows to diagnose the vegetable coverage and the nitrogenous condition of the culture of pepper.

The application of the indexes of vegetation, as the green model (830 nm / 560 nm)-1 and normalized rate (NDVI 560) / (NDVI 660), in the interpretation of the spectral signatures obtained by the spectrometer CROPSCAN, allowed to establish critical levels of reflectance in indexes of vegetation which showed a high correlation ( $r^2 > 0.8$ ) with levels of minor deficiency of 3% of nitrogen.

The index of vegetation greenery (SPAD \* foliate area) and slop (green - red) they demonstrated strength for the diagnosis - forecast of the biophysics changeable and biochemistries studied and to establish the critical stage and sets of values of stress for nitrogen.

**Index words:** remote sensors, reflectance, nitrogen, NDVI, nitrogen, spectrometer, scanner, digital camera, spectral signatures, critical level of reflectance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción del pimiento con tecnologías de punta es una alternativa con grandes perspectivas, debido a los precios que alcanza este producto, tanto en el mercado interno como en el de exportación. La nutrición vegetal es uno de los principales factores que se deben tomar en cuenta en todo sistema de producción agrícola ya que contribuye al buen desarrollo y crecimiento de la planta.

La absorbancia de la luz por las hojas de las plantas en el espectro de la luz visible depende principalmente de la concentración de clorofilas y carotenoides. Las hojas verdes absorben entre 75 y 90% de la luz en la parte azul (cerca de 450 nm) o roja (cerca de 675 nm) del espectro electromagnético. La absorbancia es menor en la región de longitud de onda alrededor de 550 nm, donde el pico de la reflectancia es usualmente menor de 20%. **Benedict y Swidler (1961)** reportaron una relación inversa entre la reflectancia y el contenido de clorofila en plantas de soya y en cítricos, además demostraron que las mediciones de reflectancia pueden ser usadas como indicador del cambio en la concentración de clorofila.

La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos en la banda visible, región de absorción de clorofila que la banda del infrarrojo cercano (NIR), región de alta reflectancia del componente celulósico. Cuando la vegetación sufre estrés, la reflectancia en la banda visible aumenta, mientras que en la banda del NIR decrece (**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 material y permite distinguirlos (**Sabins, 1986**). Se denomina banda a la porción de radiación electromagnética que presenta un comportamiento similar, y la organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencias se llama espectro electromagnético.

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. 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**). Los componentes que

afectan la reflectancia de las hojas son: clorofila, agua, proteínas, y materiales de la pared celular. La deficiencia de nitrógeno disminuye el rendimiento y calidad al limitar la síntesis de aminoácidos y clorofila. Los síntomas visuales de estrés por nitrógeno producen clorosis y senescencia de las hojas (**Marschner, 1995**).

El espectro de reflectividad de las hojas depende de la morfología, concentración de pigmentos, estructura celular y contenido de agua. La deficiencia de uno o algunos nutrientes disminuyen la formación de pigmentos y como consecuencia, el color de la hoja es menos intenso, de tal manera que esto incrementa la reflectancia y transmitancia debido a la baja absorbancia de la radiación. La fertilización nitrogenada promueve una disminución de la reflectancia en el rojo y un incremento en el infrarrojo; lo contrario sucede cuando no se aplica N. La búsqueda de estimadores físicos ha sido objeto de diversas investigaciones dentro de las técnicas de percepción remota, que se basan en la radiometría (en particular la reflectancia), estas técnicas pueden proveer información valiosa del estado nutricional del cultivo a través de obtener medidas instantáneas del estado fisiológico de un cultivo (**Thomas, 1972, Ram, 1971 y Gausman, 1969**).

La cobertura del suelo por el cultivo, por sí misma, no estima la salud de la planta. Aunque los índices de reflectancia del follaje han sido relacionados con el estatus de nitrógeno (**Fernández et al., 1994**), estos parámetros están estimados con base en el área de suelo, y los índices no hacen diferencia entre hoja y suelo (**Adams et al., 1999**).

**Blackmer, et al. (1995)** encontraron después de una serie de pruebas, que la respuesta a la fertilización nitrogenada en híbridos de maíz, mostró por medio de un espectro radiómetro áreas del espectro visible en que el cultivo es sensible al estrés por nitrógeno.

Las mediciones ópticas o espectrales han demostrado las posibilidades de usar índices de reflectancia de banda ancha y angosta para determinar la salud de la planta.

La meta de esta investigación fue identificar estrés por nitrógeno en plantas de pimiento con base en características de reflectancia de las hojas en la fase exponencial de la curva de crecimiento.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. La producción y la comercialización del pimiento

El chile (*Capsicum annuum L.*) es uno de los cultivos hortícolas más importantes de México. Después del jitomate y la papa, el chile es la solanácea que más se consume ya sea en fresco, seco, o en conserva, además es de un alto valor nutritivo, ya que contiene alta cantidad de vitaminas A, C y proteínas entre otros (Namesny, 1996).

De acuerdo con la FAO (2005), a nivel mundial en el 2004 se sembraron un total de 1,652,516 hectáreas de pimiento, con las que se obtuvo una producción de 24,392,993 toneladas, siendo los principales países productores China, México, Turquía, España, Estados Unidos de América y Nigeria, que en conjunto aportan cerca del 78.97 % de la producción mundial.

El pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*) es uno de los tipos importantes de chiles que se cultivan en México, no sólo por la superficie cultivada y su volumen de producción en el mercado nacional, sino también por ser una especie hortícola de exportación. En 2004 se sembraron alrededor de 1,630 hectáreas con una producción de 64,872.73 toneladas (SIAP SAGARPA, 2005). La principal zona productora tanto a campo abierto como en invernadero es el noroeste del país, siendo los estados productores más importantes de esta hortaliza Baja California, Baja California Sur y Sinaloa.

De acuerdo con la SIAP-SAGARPA (2005), 10% de la superficie nacional cultivada con chile es destinada a la exportación, de ésta el 80% del volumen es de chile morrón (también conocido como chile dulce o chile bell) y el resto de los chiles picantes (anaheim, fresno, serrano, jalapeño y otros). El principal estado exportador es Sinaloa; el cual en el año 2003 exportó 89,000 toneladas con un valor de la producción de 102 millones de dólares. Las exportaciones se realizaron durante los meses de noviembre a mayo y se destinaron principalmente hacia los Estados Unidos y Canadá (CAADES, 2005). La cercanía de nuestro país con Estados Unidos uno de los principales destinos de exportación, representa una oportunidad de alcanzar altos precios. Por otro lado, en México se está incrementando el consumo de esta hortaliza, y con ello la demanda en el mercado interno.

La producción del pimiento morrón en invernadero asegura una mejor producción y una mayor calidad para su consumo en el mercado, tanto nacional como internacional. El cultivo bajo invernadero implica una inversión alta, por lo que se deben obtener altos rendimientos por unidad de superficie y programar la producción para que las fechas de cosecha coincidan con temporadas de alto precio. Para el pimiento morrón el precio en el mercado generalmente es alto, particularmente en los meses de marzo a junio y septiembre a diciembre, lo que hace que esta hortaliza sea atractiva para los agricultores.

El chile se encuentra extendido de manera general en las regiones templadas y cálidas, y ocupa el 5° lugar de producción y superficie cultivada entre las principales hortalizas. Según **Nuez et al. (1996)** este cultivo tiene una tendencia general a aumentar la superficie cultivada y el volumen por unidad de superficie.

### **2.1.1. Producción**

En el 2004, la participación de los países fue: China 50.09 %, México 7.71 %, Turquía 7.4 %, España 4.1 %, Estados Unidos 3.8 %, Indonesia 2.61 % y Nigeria 2.99 %; estos países concentran el 78.97 % de la producción mundial (**FAO, 2005**).

China, México y Turquía son los países que ocupan los tres primeros lugares en producción. Para el año 2004, China produjo 12,220,448 toneladas lo que presenta el máximo volumen de producción durante su historia, es decir participó con un 49.6% de la producción mundial; México en el año 2001 presentó el máximo volumen de producción con un total de 1,900,824.2 toneladas (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Producción de pimiento (miles de toneladas) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.**

Año	País							Mundo
	China	México	Turquía	España	E.U.A	Indonesia	Nigeria	
1990	3169	643	914	914	484	423	762	10932
1991	3276	773	934	743	569	431	660	11128
1992	3479	881	969	767	664	447	609	11511
1993	4394	889	980	745	700	355	584	12260
1994	5100	778	1024	754	708	321	602	13009
1995	5580	933	1097	803	653	1615	621	15241
1996	6629	998	1168	881	766	1060	643	16480
1997	7145	1468	1148	907	689	814	756	17416
1998	7399	1879	1422	904	670	862	720	18646
1999	7966	1825	1485	938	717	1023	726	19629
2000	9587	1762	1503	961	927	739	726	21076
2001	10041	1900	1584	994	871	589	726	21668
2002	10703	1813	1778	1073	882	645	731	22633
2003	11713	1883	1818	1010	947	561	731	23723
2004	12220	1883	1818	1022	993	639	731	24392
Media anual	7227	1354	1309	894	749	702	688	17316

Fuente: **FAO (2005)**.

### 2.1.2 Superficie cultivada

En términos de superficie cultivada, China sobresale como el principal productor, en segundo lugar se encuentra México, y Nigeria en tercero. En el periodo de 1990 a 2004, China presentó un crecimiento constante, así, en el año 1990 tenía una superficie cultivada de 182,371 ha y para el año 2004 aumentó su superficie a 602,500 ha, que representó un incremento del 330.37 % (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Superficie cultivada de pimiento (miles de hectáreas) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.**

Año	País							Mundo
	China	Indonesia	México	Nigeria	Turquía	E.U.A	España	
1990	182.3	190.0	66.4	85.0	48.6	25.0	28.4	1060.9
1991	187.8	190.0	73.3	75.0	49.8	26.0	25.9	1061.4
1992	172.4	190.0	96.1	70.0	56.1	27.6	26.4	1081.8
1993	247.3	170.0	102.3	70.0	53.3	27.5	25.2	1146.1
1994	286.9	161.0	83.5	70.0	54.0	26.5	24.5	1161.3
1995	302.4	182.2	75.9	70.0	57.0	27.3	22.9	1196.3
1996	352.4	169.7	82.7	75.0	60.0	27.4	23.2	1298.7
1997	383.1	161.6	99.6	85.0	60.0	22.7	22.8	1335.9
1998	403.2	164.9	155.9	89.0	70.0	22.9	22.3	1437.3
1999	443.7	183.3	163.5	90.0	73.0	22.9	22.6	1526.5
2000	503.2	174.7	145.4	90.0	75.0	37.9	23.2	1565.9
2001	533.0	142.5	146.8	90.0	78.0	35.0	22.7	1560.3
2002	573.0	150.5	140.1	91.0	88.0	33.9	21.9	1624.5
2003	602.5	176.2	140.6	91.0	88.0	33.5	22.0	1672.5
2004	602.5	154.5	140.6	91.0	88.0	34.4	21.8	1652.5
Media anual	385.1	170.7	114.2	82.1	66.6	28.7	23.7	1358.7

Fuente: **FAO (2005)**.

Los países que tienen mayor rendimiento por hectárea a nivel mundial son España, E.U.A. y Turquía, ya que éstos cuentan con una mayor tecnología de producción como son invernaderos altamente tecnificados e híbridos de alta productividad; México ocupa el quinto lugar en este aspecto (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) de los principales países productores en el periodo 1990 - 2004.**

Año	País							
	España	E.U.A	Turquía	China	México	Nigeria	Indonesia	Mundo
1990	32.21	19.36	18.77	17.37	9.69	8.96	2.22	10.30
1991	28.69	21.49	18.76	17.43	10.54	8.80	2.27	10.48
1992	29.06	24.09	17.25	20.17	9.17	8.70	2.35	10.64
1993	29.58	25.44	18.37	17.76	8.69	8.34	2.09	10.69
1994	30.79	26.72	18.96	17.77	9.31	8.60	1.99	11.20
1995	35.07	23.92	19.25	18.45	12.28	8.88	8.86	12.73
1996	37.99	27.98	19.47	18.80	12.06	8.57	6.24	12.68
1997	39.70	30.31	19.13	18.64	14.73	8.90	5.04	13.03
1998	40.46	29.24	20.32	18.34	12.04	8.09	5.22	12.97
1999	41.54	31.19	20.34	17.95	11.16	8.07	5.58	12.85
2000	41.45	24.42	20.04	19.05	12.11	8.07	4.23	13.45
2001	43.65	24.86	20.32	18.83	12.94	8.07	4.13	13.88
2002	48.85	26.01	20.20	18.67	12.93	8.03	4.28	13.93
2003	45.91	28.27	20.66	19.43	13.38	8.03	3.18	14.18
2004	46.88	28.87	20.66	20.28	13.38	8.03	4.13	14.76
Media anual	38.12	26.14	19.50	18.59	11.62	8.40	4.12	12.50

Fuente: FAO (2005).

### 2.1.3 Principales países exportadores

En lo que se refiere a las transacciones comerciales, las exportaciones del pimiento en volumen a nivel mundial se han mantenido, en general, en un constante crecimiento.

### 2.1.4 Situación del pimiento en México

El pimiento morrón es una especie hortícola muy importante en México sobre todo para exportación, y por su importancia social, debido a la enorme cantidad de mano de obra que

demanda durante todo su ciclo agrícola. Se cultivan en los estados del noroeste de México como son Sinaloa, Sonora y Baja California Sur, que son las regiones en donde se cuenta con condiciones favorables para el cultivo, tanto para su producción como para su comercialización hacia su principal mercado, los Estados Unidos (Velasco, 2002).

En términos generales, la producción de chiles en México ha mantenido una tendencia a la alza en los últimos años. De acuerdo con la FAO (2005) en 1990 se sembraron 66,413 ha y 140,693 ha en 2004 (Cuadro 4), lo cual representó un incremento del 211.8% de la superficie. En 1999 se tuvo la mayor superficie cultivada con 163,533 ha teniendo un descenso para el año siguiente de 18,106 ha.

**Cuadro 4. Producción, superficie cultivada y rendimiento de chiles en México 1990 al 2004.**

<b>Año</b>	<b>Superficie cultivada (ha)</b>	<b>Producción (Toneladas)</b>	<b>Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>)</b>
1990	66,413	643,814.8	9.69
1991	73,360	773,396.4	10.54
1992	96,104	881,924.5	9.17
1993	102,347	889,535.5	8.69
1994	83,589	778,982.4	9.31
1995	75,972	933,186.8	12.28
1996	82,722	998,166.1	12.06
1997	99,655	1,468,854.5	14.73
1998	155,980	1,879,151.9	12.04
1999	163,533	1,825,952.1	11.16
2000	145,427	1,762,384.0	12.11
2001	146,890	1,900,824.2	12.94
2002	140,174	1,813,092.6	12.93
2003	140,693	1,883,267.7	13.38
2004	140,693	1,883,267.7	13.38
Media anual	114,236.8	1,354,386.7	11.62

Fuente: FAO (2005).

El rendimiento durante los últimos años, en general se ha mantenido de forma constante, pero como consecuencia del aumento de la superficie, el volumen de la producción nacional del año 1990 a 2004 se incrementó en un 292.5 % (Cuadro 4) y el mayor volumen de la producción se destinó a Estados Unidos y Canadá (FAO, 2005).

### 2.1.5 Principales estados productores

En el año 2003, Sinaloa obtuvo en promedio un rendimiento de 39.9 t ha<sup>-1</sup> seguida por Baja California Sur con 11.118 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 5). Para el año 2004 el estado de Baja California obtuvo un rendimiento de 64 t ha<sup>-1</sup> superando en este aspecto a Sinaloa, que obtuvo 38.11 t ha<sup>-1</sup>.

**Cuadro 5. Superficie sembrada (ha), producción (toneladas) y rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) de pimiento morrón en los principales estados productores de México 2003 - 2004.**

Año	Estado	Superficie Sembrada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )
2003	Baja California Sur	48.00	537.00	11.18
	Sinaloa	1,286.00	51,271.00	39.90
	Total	1,334.00	51,808.00	38.86
2004	Baja California	67.00	1,256.00	18.74
	Baja California Sur	163.00	10,547.73	64.71
	Sinaloa	1,400.00	53,069.00	38.11
	Total	1,630.00	64,872.73	39.98

Fuente: SIAP-SAGARPA (2005).

Como se observa en el Cuadro 5, Sinaloa es el estado con mayor producción del país, más del 75% de las siembras de chile morrón se realizan de septiembre a noviembre; el resto se lleva a cabo en diciembre a abril. Este calendario de siembras ocasiona que durante el periodo comprendido de enero a marzo se encuentre en producción más del 80 % de la superficie sembrada, para que de marzo a junio, tanto la superficie en pie como la superficie en producción

comiencen a descender aceleradamente; lo anterior es para aprovechar la ventana del mercado estadounidense que disminuye considerablemente en dicha época (**Velasco, 2002**).

De acuerdo con la **SIAP-SAGARPA (2005)**, en el año 2003 se tenía una superficie cultivada de 1,334.0 ha, siendo el productor principal el estado de Sinaloa con 1,286 ha y Baja California Sur con 48 ha. Para el año 2004 la superficie total cultivada fue de 1,630 ha, es decir hubo un incremento de 296 ha. En cuanto al volumen de producción del 2003 al 2004 hubo un incremento de 13,064 toneladas, debido al aumento de la superficie cultivada.

## **2.2. Técnicas de diagnóstico nutrimental**

Para los cultivos, la falta o exceso de un elemento modifica el estado nutrimental de las plantas, teniendo como consecuencia, poner en riesgo ciertos factores de producción como son un crecimiento pobre o un bajo rendimiento.

El potencial del rendimiento depende de factores internos (constitución genética y externa, condiciones climáticas, características del suelo, factores nutrimentales). Los factores nutrimentales pueden ser controlados de manera precisa por medio del diagnóstico nutrimental (**Castro et al., 2000**).

En la actualidad, los métodos de diagnóstico en la nutrición de cultivos se están utilizando en una manera significativa, estos métodos comúnmente 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.

### **2.2.1 Análisis mineral**

El análisis químico de tejido vegetal es la técnica de diagnóstico mayormente empleada en la nutrición integral de cultivos. A continuación se describen las principales fases que conlleva a establecer un buen diagnóstico nutrimental.

### 2.2.1.1 Principios del análisis foliar

Es importante destacar que no es necesario analizar la planta entera para evaluar la fertilidad del suelo y 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 a un no ha entrado en senescencia refleja bien el estado nutricional de la planta (**Malavolta, 1981**).

Cuando se emplea el método de diagnóstico foliar para evaluar el estado nutricional de la fertilidad del suelo y la dosis de abono que debe ser aplicada, la propia planta funciona como “solución extractora”. El uso del método se basa en tres premisas dentro de ciertos límites y deben existir relaciones directas entre:

- Dosis de abono (X) a nivel de fertilidad del suelo y la producción (Y).
- Dosis de abono (X) y la concentración foliar (Y).
- Concentración foliar (X) y la producción (Y).

De acuerdo con **Munson y Nelson (1981)**, mencionan que 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, también define la concentración óptima como aquella en la cual se obtiene el máximo crecimiento o rendimiento de la planta.

Con esta técnica 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 nutricional de los cultivos y el suelo. El análisis de plantas, se emplea principalmente para diagnosticar deficiencias nutrimentales y como base para formular recomendaciones para fertilización (**Jones, 1999; Marschner, 1995; Mengel y Kirkby, 1987; Mills y Benton, 1996**).

#### 2.2.1.1.1 Muestreo

Para la realización del análisis vegetal es muy importante la fase de muestreo ya que la variación en los resultados del análisis de la planta recae en esta fase, el procedimiento de colecta de material vegetal requiere de mucho cuidado para que no haya contaminación o mezcla posible, puesto que los resultados del análisis solo serán útiles si el muestreo se ha realizado correctamente (**Alcantar y Sandoval, 1999**).

Hay que considerar el número de partes que se deberá coleccionar, así como el número de plantas por muestra, debido a la gran diversidad morfológica (**Alcantar et al., 1992**).

Es de gran importancia mencionar el tamaño de la muestra que se toma dependiendo del tipo de planta y el grado de variabilidad experimental (**Etchevers 1988**).

Otro factor a considerar de suma importancia es el órgano que habrá de muestrearse, ya que la acumulación de nutrimentos dentro de las plantas varía en los distintos órganos, dependiendo de las funciones de estos. De igual forma hay que considerar el estado fenológico de la planta, ya que las plantas jóvenes contienen mayor concentración de nutrimentos y conforme transcurre el tiempo y alcanza su madurez disminuye en términos de concentración. No es recomendable muestrear plantas cubiertas de polvo o suelo, cuando presentan daños por insectos o alguna enfermedad, ni tampoco plantas que se encuentran marchitas por falta de agua o exceso de temperatura (**Alcantar et al., 1992**).

#### **2.2.1.1.2 Análisis químico del tejido vegetal**

El análisis químico de tejidos vegetales se ha empleado como instrumento de diagnóstico del estado nutricional de las plantas por muchos años (**Etchevers, 1988**). Ya que son muchos los problemas a que se enfrenta la agricultura que originan disminución del rendimiento de los cultivos. Estos problemas pueden ser causados por muy diversos factores: bióticos, climáticos, genéticos y nutricionales (**Alcantar et al., 1992**).

El análisis mineral de las plantas se efectúa principalmente con fines de diagnóstico para evaluar el estado nutricional de los cultivos, en ocasiones se puede realizar con otros objetivos, más bien relacionados con estudios fisiológicos.

**Etchevers (1988)**, plantea los principales objetivos del análisis químico de plantas.

- A) Diagnosticar o confirmar el diagnóstico de deficiencias, toxicidad o imbalances, hecho mediante la técnica de síntomas visuales.
- B) Identificar o predecir deficiencias nutricionales que no son aparentes.
- C) Servir de base para hacer recomendaciones de fertilización.

- D) Controlar la efectividad de prácticas de fertilización.
- E) Determinar la cantidad de un elemento que es removida del suelo por un cultivo y sus residuos.
- F) Estimar el estado nutricional general de ciertas regiones, distritos o tipos de suelo.
- G) Predecir rendimientos.
- H) Estudiar niveles de nutrientes disponibles.
- I) Estudiar tendencias nutricionales dentro de un año o entre años.

En contraste, **Munson, (1998)**, menciona que los resultados de los análisis son utilizados para:

- Determinar si un elemento es esencial para el crecimiento de la planta.
- Verificar la asociación de un nutrimento con síntomas de deficiencia o toxicidad.
- Establecer concentraciones óptimas o valores críticos para elementos asociados con un óptimo o máximo rendimiento económico.
- Determinar la disponibilidad de nutriente del suelo o disponibilidad y recuperación de elementos aplicados.
- Evaluación y comparación de distintas áreas o sitios de producción en campo, huertos o forestales.
- Monitoreo de cultivos, entre otros.

### **2.2.2 Medidor portátil de clorofila SPAD-502**

El medidor portátil de clorofila es una herramienta que ya se considera en los programas de fertilización de diferentes cultivos como maíz (**Piekielek et al.,1995**), algodón (**Wood et al., 1992**), trigo (**Reeves et al., 1993**) y patata (**Minotti et al., 1994**), entre otros.

El medidor portátil de clorofilas Minolta SPAD-502 debe ser calibrado para la especie e incluso, para la variedad y cultivar en la que se quieran hacer las medidas. Una de las limitaciones de este medidor es que sus lecturas no se han estandarizado para diferentes especies, variedades, localizaciones y estados de crecimiento. Estos autores también aseguran en su estudio, 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 al abonado nitrogenado.

El propio manual del Minolta SPAD-502 indica que los valores SPAD mayores de 50 unidades no son fiables.

La relación entre los valores SPAD y el contenido de nitrógeno de la planta depende, en gran medida, del estado fenológico del cultivo, de las condiciones de crecimiento del cultivo y de las condiciones climáticas (**Takebe y Yoneyama, 1989 y Woód et al., 1992**). La relación entre los valores SPAD y el contenido de nitrógeno también depende del factor varietal (**Takebe y Yoneyama, 1989**).

Diversos autores (**Takebe y Yoneyama, 1989 y Wood et al., 1992**), afirman que no todo el nitrógeno de la planta está asociado a la molécula de clorofila. Así, en estudios realizados en maíz y arroz, se han obtenido regresiones curvilíneas para la relación SPAD-nitrógeno, debido a que en algunos estados de crecimiento el nitrógeno nítrico de la planta no está asociado a la clorofila. Como el SPAD-502 mide la intensidad de color verde (debido a las clorofilas), si no todo el nitrógeno está asociado a las clorofilas, las lecturas con el SPAD pueden subestimar el contenido en nitrógeno con lo cual la relación es curvilínea.

### **2.2.3 Percepción remota**

Cuando el hombre vio por primera vez al planeta Tierra desde el espacio, hacia fines de los años 60s, quedó sorprendido por la belleza, fragilidad y la naturaleza finita del planeta. A principios de los años 70s, cuando la NASA lanzó los primeros satélites de la serie Landsat que estaban diseñados para tomar imágenes de la superficie terrestre con fines pacíficos, nacía la ciencia de la observación de la Tierra, también conocida como Percepción Remota o Teledetección. Desde esos tiempos, los satélites de observación terrestre han portado una amplia gama de instrumentos y sensores, los cuales han recolectado una gran cantidad y variedad de datos acerca de nuestro planeta, su naturaleza y la actividad del hombre que en ella se desarrolla (<http://www.fcagr.>, **2005**).

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**).

**Sakthivadiel (1997)**, define la percepción remota como la medición de las propiedades de los objetos de la superficie terrestre usando datos desde aviones y satélites. Es medir algo a distancia, con resultados iguales.

**Chuvienco (1990)**, comenta que la percepción remota es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya sea por emisión propia.

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**).

Los índices de reflectancia se basan en ecuaciones con operaciones simples y longitudes de onda específicas, que resumen gran cantidad de información, contenida en un espectro de reflectancia. El índice de reflectancia del dosel (NDVI) mide el contraste de reflectancia en el espectro rojo (680 nm) e infrarrojo (900 nm) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{RNIR} - \text{RRED}}{\text{RNIR} + \text{RRED}}$$

Donde: RNIR y RRED es la reflectancia del espectro infrarrojo cercano y rojo, respectivamente.

El NDVI puede utilizarse como un indicador de la biomas del dosel, índice de área foliar (IAF), radiación interceptada y capacidad fotosintética de un cultivo. Probablemente es el índice más usado para analizar la vegetación a nivel continental y global. Durante el ciclo de crecimiento de un cultivo el NDVI puede evaluar la absorción de radiación, uno de los parámetros que determina biomasa y rendimiento final. Con medidas periódicas de NDVI durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, puede evaluarse la absorción de radiación, pues determina biomasa total y el rendimiento final.

El NDVI mostró una correlación alta con la radiación interceptada, biomasa, índice de área foliar y con el rendimiento final. La biomasa del frijol incremento con la aplicación de N, se observo que el NDVI puede ser un estimador de rendimiento biológico y agronómico en frijol (**Gutiérrez et al., 2004**).

### **2.2.3.1 Vehículos o plataformas**

De acuerdo a la plataforma donde se ubique el sensor, se distinguen tres grandes tipos de sistemas de teledetección: terrestre, aéreo y espacial. En el caso muy particular de nuestra situación se utiliza el aéreo y es el que describiremos a continuación:

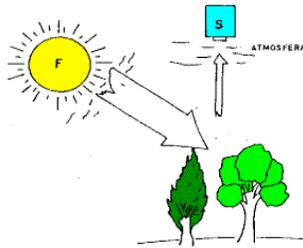
Existen dos tipos de sensores aéreos, los ópticos y los electrónicos, en los primeros, los objetos quedan plasmados en un papel fotosensible (película), luego mediante la técnica del revelado se logran los productos fotográficos que todos conocemos (fotos). En los sensores electrónicos la información es almacenada en un formato digital conocido como RASTER. Este consiste en una matriz de filas y columnas, cada celda constituye el píxel (el mínimo tamaño que puede detectar el sensor) que está definido por un valor X (columnas), un valor Y (filas) y un valor Z o N° digital, que es el que contiene la información de ese píxel. Los productos provenientes de los sensores electrónicos se conocen como imágenes (no son fotos).

### **2.2.3.2 Sistema de obtención de datos**

Los objetos emiten energía electromagnética lo que significa que todo emite radiación. Sin embargo, esta radiación se emite en longitudes de onda que están usualmente fuera de la banda de luz visible. Por lo que no hay forma de ver la mayoría de la energía a simple vista o con el ojo humano. La mayor parte de lo que vemos es energía reflejada. Cuando la energía electromagnética, como la del sol, pega en un objeto, hay tres cosas que pueden pasar con ella, esta puede ser reflejada, absorbida y transmitida.

### **Sistema Pasivo de Energía Reflejada**

Este sistema tiene gran similitud con la visión normal del ser humano; también es el sistema que adopta la fotografía convencional. Se tiene separada la fuente de energía (p. ej. el sol), el objeto en estudio y el sensor (Figura 1).

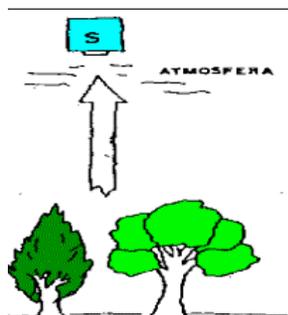


**Figura 1. Esquema que indica el Sistema Pasivo de Energía Reflejada.**

En este caso, la característica más importante es que el sensor mide la energía REFLEJADA por el objeto. Los sensores de este tipo miden energía en la porción reflectiva del espectro (visible e infrarrojo cercano y medio). Este es el más común.

### **Sistema Pasivo de Energía Emitida**

En este caso, la fuente y el objeto son uno solo, luego el sensor solo está midiendo la energía EMITIDA por un objeto (fuente). Los elementos de la superficie terrestre “absorben” parte de la energía proveniente del sol y la transforman en calor, esa energía en forma de calor es re-irradiada hacia el espacio, es así como bajo este sistema, los elementos de la superficie terrestre son objeto y fuente de energía a la vez (Figura 2).

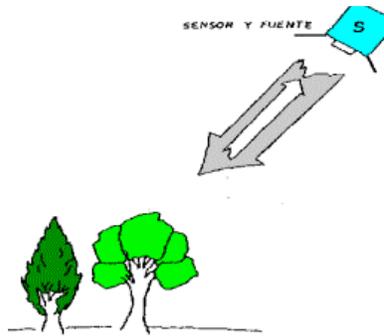


**Figura 2. Esquema que indica el Sistema Pasivo de Energía Emitida.**

Como ejemplo se pueden citar los sensores meteorológicos que miden la temperatura de las nubes, corrientes marinas, vientos, etc.

### **Sistema Activo de Energía Reflejada**

En este sistema el sensor tiene su propia fuente de energía, generalmente se trata de una antena radar que emite energía en el rango de las microondas hacia la superficie terrestre y mide la proporción de la energía REFLEJADA por el objeto (Figura 3).



**Figura 3. Esquema que indica el Sistema Activo de Energía Reflejada.**

Debido a características particulares de este tipo de ondas, estos sistemas poseen la ventaja de poder realizar mediciones en horarios nocturnos (debido a que no necesitan de la luz solar), o con cobertura nubosa (la onda es capaz de penetrar las nubes sin ser interferida). Estos sistemas se denominan “radar” y tienen mayor aplicación en países o regiones con una alta frecuencia de días nublados o para estudios oceanográficos (<http://www.fcagr.unr.edu.ar/> 2005).

#### **2.2.3.3 Aplicación de los sensores remotos en la agricultura**

La percepción remota ha sido usada en aplicaciones agronómicas desde la década de los 30s, esta práctica sufre todavía un gran desarrollo como una herramienta de manejo para la producción vegetal.

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. Por lo que constituye es importante dar continuidad en estas investigaciones en aspectos específicos, que benefician a la humanidad.

Las imágenes de satélite se han empleado en la agricultura principalmente para estimar superficies cultivadas y rendimiento de cultivos (González, 1990; Soria, 1999).

**Pulido *et al.*, (2000)**, utilizaron imágenes de satélite Landsat TM para estimar el área cultivada en el distrito de riego 038 Rio Mayo, obteniendo 99% de precisión en la cuantificación del área cultivada. Además, mediante esta metodología fue posible detectar un total de 5,178 ha que fueron regadas fuera de la superficie autorizada por su distrito de riego.

**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 del 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.

Recientemente en otros países, la percepción remota se ha utilizado para realizar estimaciones de biomasa de los cultivos. En México, **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.

Otras aplicaciones son la identificación de suelos salinos, flujo de calor sensible y calculo de la evapotranspiración potencial en grandes áreas, un ejemplo de esto, es el trabajo realizado por **Pulido *et al.*, (1999)**, en el que utilizaron imágenes Landsat TM y un sensor electromagnético portátil para identificar áreas con problemas de sales en el Distrito de Riego 075 Rio Fuerte, Sinaloa. El estudio se realizó para cuatro cultivos (maíz, trigo, algodón y sorgo). De acuerdo a los resultados obtenidos, la conductividad eléctrica se desarrolla linealmente con las reflectancias de las bandas 2, 3 y 4 de las imágenes Landsat TM. Los coeficientes de regresión se encontraron en el rango de 0.67 a 0.85.

**Sakthivadivel *et al.*, (1999)**, usaron técnicas de sistema de información geográfica y sensores remotos para evaluar el sistema de riego de Bhakra, India; en el cual se estimó la superficie cultivada con trigo y se elaboraron modelos matemáticos para predicción de rendimientos en este cultivo, relacionándolo con el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas, por sus siglas en ingles). Se encontró que el rendimiento en este cultivo tiene una relación directamente proporcional con el NDVI.

El Landsat 5 pertenece al programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA. Pesa 2,200 Kg y tiene una longitud aproximada de 4 m. Lleva a bordo un sensor denominado Thematic Mapper (TM) que opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas.

❖ **Banda 1:** (0.45 a 0.52 micrones – azul). Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo, coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

❖ **Banda 2:** (0.52 a 0.60 micrones – verde). Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y al igual que la banda 1, para determinar la presencia o no de limonita.

❖ **Banda 3:** (0.63 a 0.69 micrones – rojo). Es una banda de absorción de clorofila, y muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las diferentes rocas y para detectar limonita.

❖ **Banda 4:** (0.76 a 0.90 micrones – infrarrojo cercano). Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de los cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

❖ **Banda 5:** (1.55 a 1.75 micrones – infrarrojo medio). Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

❖ **Banda 6:** (10.40 a 12.50 micrones – infrarrojo termal). El infrarrojo termal es útil en el análisis de estrés de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.

❖ **Banda 7:** (2.08 a 2.35 micrones – infrarrojo medio). Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

Estas siete bandas pueden combinarse con tres o más, produciendo una gama de imágenes de color compuesto que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los productos naturales.

El sensor mapeador temático (TM) tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño del píxel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 m. Esto permite la clasificación de zonas tan pequeñas como 2.5 o 3 hectáreas. ([http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html), 2005).

Los índices espectrales de vegetación son transformaciones desarrolladas para caracterizar las cubiertas vegetales reforzando la contribución espectral debida a la cubierta vegetal, en tanto que minimizan la influencia de factores distorsionantes, como el suelo, la irradiación solar, el ángulo de elevación del sol y la propia atmósfera (Nieuwenhuis, 1986; UNESCO,1994).

#### **2.2.3.3.1 Bandas espectrales**

La visualización de los datos de la superficie es posible gracias a la energía reflejada y emitida por la misma. Parte de la energía que emite el sol es interceptada por la atmósfera y el resto de la señal que impacta sobre la tierra, parte es absorbida, parte emitida y parte reflejada.

Podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. 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. Las siguientes bandas espectrales son las más frecuentes empleadas en teledetección (Verstraete y Pinty, 1991):

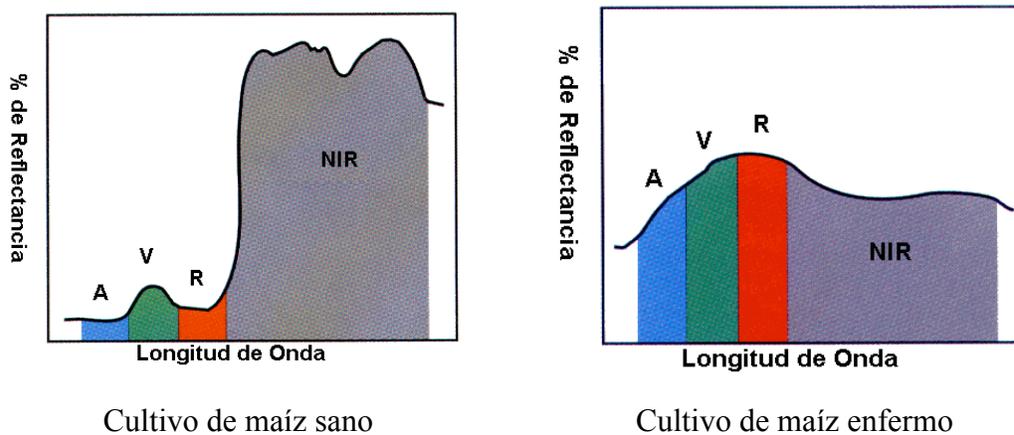
- a. Espectro visible (0.4 a 0.6  $\eta\text{m}$ ). Se llama así por ser la única radiación que pueden percibir nuestros ojos. Dentro de éste rango suelen distinguirse 3 bandas elementales, azul, verde y rojo, por los colores asociados a esas longitudes de onda.
- b. Infrarrojo cercano (0.7 a 1.3  $\eta\text{m}$ ). Es de gran importancia por su capacidad de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- c. Infrarrojo medio (1.3 a 8  $\eta\text{m}$ ). Donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- d. Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\eta\text{m}$ ). Incluye la fracción emisiva del espectro.
- e. Micro ondas (a partir de un mm). De gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

Hay bandas del espectro que permiten distinguir mejor cada elemento de su entorno. La firma espectral es uno de los elementos cuyo análisis conduce a la interpretación de la información de las imágenes (**Tucker, 1979; Lillesand y Kiefer, 1994**).

Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que iniciaría las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. Dos bandas del espectro, la azul (430  $\eta\text{m}$ ) y la roja (580-680  $\eta\text{m}$ ) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (725-1100  $\eta\text{m}$ , región invisible para el ojo humano) actúa justo de forma inversa. La mayor absorción de rojo y azul, junto con la fuerte reflexión del infrarrojo cercano es la diferencia espectral de la respuesta de toda la vegetación, y ha sido usada durante mucho tiempo como forma de diferenciación de las superficies con y sin vegetación.

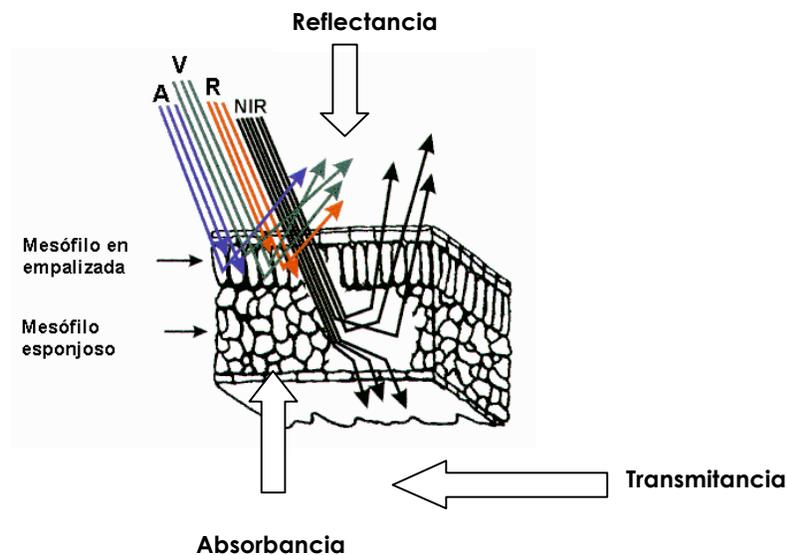
La vegetación verde y vigorosa refleja mucho menos en la banda visible roja (banda 1), región de absorción de la clorofila, que en la banda cercana infrarroja (banda 2), región de alta reflectancia en el componente celulósico.

Cuando la vegetación sufre estrés, los valores de reflectancia de la banda visible aumentan y los de la banda del NIR decrecen (Figura 4) (**Jackson *et al.*, 1983**).



**Figura 4. Firma espectral de un cultivo de maíz sano y uno con estrés.**

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 5).



**Figura 5. Energía reflejada, absorbida y transmitida sobre la hoja de un cultivo (<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov>).**

Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. refleja la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada.

Esto nos lleva a concluir que las firmas espectrales de un cultivo son diferentes de acuerdo a la concentración de elementos que éste contenga.

### **2.3 Conceptos y leyes de la radiación.**

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. Un término también usado como sinónimo, aunque no tan preciso es el de intensidad luminosa. 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**).

La absorbancia ( $\alpha$ ) se define como la fracción de la radiación incidente de una longitud de onda específica del espectro, que es absorbida por un material ( $\text{Wm}^{-2}$ ). La absorción es el proceso por el cual la energía radiante incidente es transferida a la estructura de las moléculas de una sustancia. De forma similar, la emisividad ( $\epsilon$ ) en 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. La emisión máxima posible es llamada radiación de cuerpo negro. El proceso de emisión o absorción de radiación representa un cambio correspondiente en el potencial de energía del material (**Jones, 1983**).

El flujo radiante o de radiación ( $R$ ;  $\text{W m}^{-2}$ ) emitido por un cuerpo sigue la ley de Stephan-Botzman:

$$R = \sigma T^4 \epsilon$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stephan-Botzman ( $5.6 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^{-4}$ ),  $T$  es la temperatura del cuerpo en  $^\circ\text{K}$  y  $\epsilon$  el coeficiente de emisividad (**Rosenberg *et al.*, 1983**).

La longitud de onda de la radiación emitida o absorbida depende de la magnitud del cambio de energía, y de la transición entre los posibles estados de ésta. Un cuerpo químicamente complejo puede tener un número infinito de posibles transiciones de energía cubriendo todas las longitudes de ondas, de modo que éste podría tener un espectro más o menos continuo de emisión o absorción (**Jones, 1983**).

La reflectividad ( $r$ ) es la porción de energía radiante reflejada del total que incide sobre la superficie.

Transmisitividad o transmitancia ( $t$ ) es la porción de la radiación transmitida del total incidente. La suma de  $\alpha + r + t$  en cualquier longitud de onda es uno (**Rosenberg *et al.*, 1983**). En forma practica,  $t$  y  $r$  se miden, y  $\alpha$  y  $\epsilon$  se calculan.

La ley del coseno de Lambert señala que cuando la  $I$  incide formando un ángulo  $A$  con la perpendicular hacia la superficie, la  $I$  debe expresarse como:

$$I = I_0 \cos A$$

donde  $I_0$  es la irradiancia sobre una superficie perpendicular a los rayos del sol (**Jones, 1986**).

La ley de Beer describe la reducción en la densidad de flujo de un rayo de luz, como una función de la profundidad dentro de un medio homogéneo absorbente:

$$I = I_0 \exp^{-k x}$$

donde  $I_0$  es la irradiancia inicial de los rayos,  $I$  es la irradiancia después de pasar a través de una profundidad  $x$  de un medio con coeficiente de extinción  $k$  (**Rosenberg *et al.*, 1983**).

La ley de Raleigh indica que la eficiencia de la dispersión es proporcional a  $1/\lambda^4$ . Así, la luz azul con  $\lambda$  equivalente a 400nm puede ser dispersada cerca de 10 veces más que la luz roja con  $\lambda$  igual a 700 nm (**Rosenberg *et al.*, 1983**).

Radiación fotosintéticamente activa.- Se llama también irradiancia fotosintética o flujo fotónico fotosintético. Se refiere a la irradiancia cuya longitud de onda está comprendida entre los 400 y 700 nm (milimicras) es decir, el espectro de luz visible que tiene influencia sobre el proceso fotosintético. Cuando se habla en términos de fotones se refiere al flujo de fotones fotosintéticos; algunos autores hablan de densidad de flujo de fotones fotosintéticos, pero el término de densidad es redundante con el flujo. Casi todas las mediciones de la irradiancia se reportan en términos de radiación fotosintéticamente activa (RFA), sin embargo hay que considerar que se puede estar hablando de irradiancia total o radiación solar incidente total (RST), que es aproximadamente el doble de la primera (sobre todo cuando se habla de  $\text{cal cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  o  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) (**Jones, 1986**).

Aunque la clorofila es el pigmento más importante en la fotosíntesis, en el proceso intervienen otros pigmentos auxiliares que la complementan. Así, existen en la membrana interna de los cloroplastos la clorofila "a" (azul-verdoso), la clorofila "b" (verde-amarillenta) y en menor grado carotenos y xantofilas formando (junto con proteínas portadoras) dos sistemas de pigmentos llamados foto sistema I (FSI) y foto sistema II (FSII), cada uno con cierto número de moléculas individuales. El FSI contiene moléculas de clorofila a, clorofila b y carotenos. El FSII contiene en otras proporciones las dos clorofilas mencionadas y carotenos. Cada tipo de pigmento absorbe ciertas longitudes de onda de luz con preferencia a otras. Al haber un sistema formado con diferentes pigmentos, es más amplia la gama de ondas luminosas que pueden absorberse. Parece ser que la energía de excitación del electrón puede transferirse de molécula en molécula por un fenómeno llamado resonancia magnética y que los receptores finales de esta energía son ciertas moléculas de la clorofila "a" a las que se les ha dado el nombre de centros de reacción. Ahí los electrones son excitados hasta un grado energético tal que abandonan la molécula y fluyen, por una cadena de sustancias captadoras y transportadoras de electrones a través de reacciones de oxido-reducción.

Existen aproximadamente unas 400 moléculas de pigmentos receptores de fotones en el centro de reacción; al conjunto de dichas moléculas se da el nombre de antena o complejo cosechador de luz. Se piensa que sólo las moléculas que constituyen los centros de reacción son capaces de lanzar electrones fuera de la clorofila, hacia los compuestos receptores de electrones.

Todas las demás moléculas de clorofila "a", clorofila "b" y demás pigmentos actúan como "antenas" para captar diversas longitudes de onda (azul a rojo) y transmitir esta energía de excitación de molécula en molécula hasta los centros de reacción.

En el FSI las moléculas de clorofila "a" que se activan (oxidán) por una longitud de onda de 700 nm son las que constituyen el centro de reacción. Por ello al FSI también se le conoce como P<sub>700</sub>. En el FSII, el centro de reacción lo constituyen las moléculas de clorofila "a" activadas con longitudes de onda de 680 nm. Al FSII también se le conoce como P<sub>680</sub> (**Salisbury y Ross, 1994**).

## **2.4. Interacciones planta-radiación**

La reflectancia y transmisión son definidas como las tasas de radiación reflejada o transmitida con la radiación incidente. Se presume que la radiación incidente que no es reflejada o transmitida por la hoja es absorbida. La reflectancia y la transmisión se presentan como un porcentaje o una fracción de radiación incidente. La absorción se caracteriza como una tasa de radiación incidente, o una función de densidad óptica (**Porra *et al.*, 1989**).

## **2.5. Interacciones hoja versus radiación visible e infrarrojo cercano**

La interacción de la radiación solar con las moléculas de las plantas controla la reflectancia visible e infrarroja. Los componentes bioquímicos y estructurales influyen la tendencia de las plantas para absorber, transmitir, y reflejar diferentes longitudes de onda de la radiación solar de onda corta 300 - 3000 nm.

La absorción de radiación de onda corta por parte de las plantas es controlada por interacciones moleculares dentro del tejido vegetal, donde los electrones absorben la radiación solar entrante en longitudes de onda controladas por uniones químicas y estructura (**Gates, 1980; Jones, 1997**). Por lo tanto, los cambios en las concentraciones de químicos absorbentes proveen una base para los cambios en absorción, transmisión, y reflectancia vegetal.

Los dos componentes de absorción visible e infrarroja principales en las hojas de las plantas son clorofila y agua. La absorción por clorofila es principalmente afectada por las transiciones de electrones entre 430 y 460 nm, y 640 y 660 nm (**Curran, 1989; Taiz y Zeiger, 2002**), mientras que las bandas de absorción del agua se centran alrededor de 970 nm, 1200 nm, absorbentes importantes incluyen proteínas, lípidos, almidón, celulosa, nitrógeno, y aceites. La identificación de las concentraciones bioquímicas de estos componentes por medio de la reflectancia infrarroja es difícil dados los traslapes de las bandas de absorción de varios compuestos bioquímicos.

## 2.6. Instrumentación

Los instrumentos que miden las cantidades de radiación de onda corta usan detectores hechos de materiales fotoexcitables como el silicio o Iridio Galio Arsénico (InGaAs). El silicio es un material fotoexcitable común que produce una corriente eléctrica en respuesta a la radiación visible y casi infrarroja (NIR) (300-1100 nm). Sin embargo, el silicio no responde a radiaciones por encima de los 1100 nm, así que se usan materiales más caros (mezcla de varios elementos) como detectores de InGaAs, para mediciones de onda corta de infrarrojo (comúnmente entre 1000 y 25000 nm).

Un espectrómetro mide radiación a intervalos discretos de longitud de onda en una región espectral definida. Los espectrómetros de onda angosta característicamente tienen resoluciones espectrales de diez nanómetros, o menos, en las regiones espectrales NIR visibles, y de 50 nm o menos en las regiones de onda corta de infrarrojo medio (ASD, 1999). Un espectrómetro puede ser calibrado a la luz estándar para obtener mediciones de radiación, o puede medir la radiación reflejada o transmitida como una tasa de radiación incidente.

La radiación solar incidente se mide generalmente como radiación reflejada de una placa altamente reflectante posicionada a 90° del receptor. Esto permite un estimado de radiación incidente estandarizado sin la necesidad de un agregado de corrección de coseno. Dos ejemplos de materiales reflectantes apropiados son sulfato de bario y politetrafluoroetileno prensado (PTFE) (Weidner y Hsia, 1981). Estos materiales muestran más de 97% de reflectividad entre 300 y 1600 nm. Además de medir la radiación incidente y reflectada, un espectrómetro debe compensar la corriente transmitida por los sensores aún en ausencia de radiación entrante. Esta corriente por temperatura es a menudo llamada corriente oscura o ruido. Por lo tanto, una medición de reflectancia completa se describe en la siguiente ecuación:

$$R = (\theta_{REF} - C_{INTERFERENCIA}) / (\Theta_0 - C_{INTERFERENCIA})$$

donde  $\theta_{REF}$  es la radiación reflejada medida,  $\Theta_0$  es la radiación incidente medida, y  $C_{INTERFERENCIA}$  es la corriente de interferencia "ruido" (Baret et al., 1987).

La tasa de radiación reflejada-incidente no tiene dimensión, entonces las mediciones de

reflectancia a nivel de suelo no requieren calibración de los instrumentos.

La transmisión y reflectancia de cada hoja puede ser medida usando luz eléctrica en lugar de radiación solar como fuente. Las mediciones de transmisión usan ya sea una esfera integrante (**Carter y Spiering, 2002**) o medición de rayo directo (**Monje y Bugbee, 1992**) para determinar la transmisión de un material. Una herramienta comúnmente usada para medir la transmisión es el medidor de clorofila SPAD-502 de Minolta (Minolta, ramsey, NJ), un medidor de longitud de onda dual que emite luz desde un "LED" (diodo o sensor de emisión de luz) rojo e infrarrojo en secuencias a través de la lámina foliar para medir la absorción de la hoja (**Monje y Bugbee, 1992**).

## **2.7. Reflectancia de la hoja y estrés de la planta**

La clorofila domina la reflectancia y transmisión de radiación visible de la hoja. El nitrógeno es un componente principal de la clorofila (**Taiz y Zeiger, 2002**), y la concentración de clorofila a menudo se correlaciona estrechamente con la concentración de nitrógeno en las hojas (**Costa et al., 2001**). La clorofila absorbe la radiación roja y azul, resultando en poca reflectancia de esos colores en la vegetación verde.

El pico de absorción azul se traslapa con la absorción de carotenoides, por lo tanto, la reflectancia azul generalmente no es usada para estimar la concentración de clorofila (**Sims y Gamón, 2002**). La máxima absorción roja se da entre 660 y 680 nm (**Curran, 1989**), pero relativamente bajas concentraciones de clorofila pueden saturar esta región de absorción (**Sims y Gamón, 2002**). Por lo tanto, la concentración de clorofila se predice generalmente de la reflectancia en el rango de 550 ó 700 nm, porque estas regiones se saturan con mayores concentraciones de clorofila. Los cambios en la forma del espectro de reflectancia entre 550 y 660 nm a veces pueden ser usados para identificar clorosis (**Cárter y Spiering, 2002**).

El mesófilo de la hoja refleja una gran proporción de la radiación NIR (**Taiz y Zeiger, 1998**). La región de rápido incremento en reflectancia entre las regiones roja e infrarroja del espectro, llamada rojo lejano o profundo, es a menudo usada para indicar la salud de la planta (**Jago et al., 1999**). **Horler et al. (1983b)** observaron que la concentración de clorofila en las hojas se correlaciona con la máxima pendiente de reflectancia en el límite entre los dominios espectrales

rojo y NIR. El rojo lejano o profundo tiende a ser sensible a un amplio rango de concentración de clorofila, pero es sensible a tipo de planta y cambios en la cubierta del suelo (**Carter y Spiering, 2002**).

**Peñuelas et al (1994)** identificaron un incremento en reflectancia entre los 500 y 600 nm en hojas de girasol estresadas por nitrógeno, comparadas con hojas no estresadas y lo examinaron usando espectros derivados. **Gamón et al. (1992)** notaron un patrón similar en la reflectancia de la cubierta foliar en girasol, y específicamente observaron cambios entre las 8:00 a.m. y medio día en reflectancia entre plantas estresadas y no estresadas.

## **2.8. Ángulo del sensor**

El efecto que tiene el ángulo en la reflectancia se ha conocido por años. Por ejemplo, **Woodley (1971)** reportó cambios en la reflectancia de la hoja entre los 400 y 2500 nm basados en el ángulo del sensor. El mostró que la reflectancia absoluta incrementó a medida que el ángulo varió y que las propiedades de reflectancia cambian con base en el análisis de la superficie abaxial o adaxial. **Pinter et al. (1987)** también observaron que las tasas de banda espectral eran afectadas significativamente en vistas fuera de nadir, y que la tasa NIR/Rojo era mayor cuando el sensor se apuntaba a un lugar 'caliente' (al este en la mañana y al oeste en la tarde) en la cubierta vegetal, y menor cuando se hacia al revés. Según **Otterman et al. (1995)** el terreno vegetado muestra fuertes variaciones de frente y de espaldas.

## **2.9. Ángulo solar y hora del día**

Las mediciones de reflectancia diurnas en cubiertas de trigo en las regiones visibles y NIR del espectro sugieren que la reflectancia visible se mantiene casi constante a lo largo del día, y la reflectancia infrarroja aumenta junto con el ángulo de acimut. **Asrar et al. (1985)** observaron que un ángulo de cénit solar superior generalmente incrementaba los estimados de LAI que usaban índices espectrales rojos e infrarrojos., debido al aumento en infrarrojo. **Pinter et al. (1987)** reportan que los cambios en el ángulo solar impactaron significativamente la tasa NIR/rojo del trigo de invierno. Encontraron que los máximos en la tasa NIR/rojo se lograban a media mañana y media tarde, y los mínimos coincidían con la posición solar más alta cerca del mediodía. Los estudios espectrales a menudo se hacen cerca del cénit solar para evitar los efectos del ángulo

solar sobre la reflectancia de la cubierta vegetal (**Osborne et al., 2002**).

La posición solar también puede influenciar la reflectancia vegetal, al influenciar la cantidad de luz que incide sobre la planta. **Gamón et al. (1992)** sugieren que los cambios químicos de xantofila debido a cambios en la intensidad de la luz son parcialmente responsables por los cambios en eficiencia de absorción y los cambios en la reflectancia de la hoja entre la mañana y la tarde.

## **2.10. Cubierta del suelo y fondo de suelo**

Un tema importante en los experimentos de reflectancia de cubierta vegetal total es la variación entre la cubierta de plantas verdes y el fondo del suelo. Durante las etapas de crecimiento tempranas el suelo constituye una gran parte de la reflectancia de la cubierta. La principal variable en la reflectancia del suelo es la luminosidad, dado que casi todos los datos espectrales para suelo caen en una línea que se extiende desde el origen (**Kauth y Thomas, 1976**).

Los suelos claros de alta reflectancia influyen los Índices más que los suelos oscuros de baja reflectancia (**Jackson et al., 1983**). Las diferencias espectrales entre suelos se pueden atribuir a variaciones en humedad superficial, distribución de partículas por tamaño, mineralogía, estructura del suelo, rugosidad de la superficie, encostrado, y la presencia de sombras (**Huete et al., 1985**). Muchos índice de reflectancia son sensibles a la cubierta del suelo porque ésta afecta la reflectancia roja y NIR. **Jackson et al. (1983)** establecieron que los cambios en las tasas de reflectancia del suelo son mínimos en caso de humedad, dado que un cambio en la reflectancia del suelo por concentración de agua es casi la misma en las regiones visibles e infrarrojas (NIR) del espectro. También señalan que dado que la reflectancia vegetal es muy diferente a la reflectancia del suelo, la tasa de reflectancia roja y NIR es teóricamente un buen discriminador de vegetación. Finalmente concluyen que la tasa no es un buen discriminador para cubiertas vegetales verdes menores a 50%, pero se vuelve muy sensible a medida que incrementa la cubierta del suelo.

## 2.11. Índices espectrales

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 estudios de datos tanto de hoja (**Peñuelas et al., 1994**) como de cubierta vegetal (**Peñuelas et al., 1997**) sugieren el uso de bandas infrarrojas de absorción de agua para detectar estrés hídrico.

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 estimados de área de la hoja usando varias bandas se correlaciona mejor con IAF que los estimados hechos usando dos bandas ( $r^2 = 0.73$  vs  $r^2 = 0.69$ ), 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.

Los espectrómetros de banda angosta son comúnmente usados en plataformas fijas o en imágenes aéreas, mientras que los satélites con capacidades de imagen espacial suficientes para medir los cultivos generalmente usan espectrómetros de banda ancha. **Baret et al. (1987)** notaron que aún si los datos espectrales de alta resolución se correlacionan bien con la información de banda ancha clásica, la relación parece depender de la etapa fenológica del cultivo. También mencionan que una resolución espectral de cerca de 5 nm parece ser suficiente para mostrar los detalles de las características espectrales de banda angosta. Los índices espectrales de banda angosta miden

pendiente (**Peñuelas et al., 1994**), forma (**Tian et al., 2001**), y profundidad (**Curran et al., 2001**) de las bandas de absorción, mientras que los índices de banda ancha se limitan a medir la densidad del follaje (IAF).

### **2.11.1. Tasa e índices de diferencia vegetal**

Los índices de tasa de radiación reflejada y transmitida han sido usados desde finales de los años 1960 para estimar el crecimiento de la planta. **Jordán (1969)** fue el primero en publicar sobre el índice vegetal de tasa simple (RVI), donde usó la tasa de radiación transmitida a 800 nm con 675 nm para estimar el índice de área de la hoja en un bosque.

**Rouse et al., (1973)** introdujo una variación del RVI en la que normalizó la tasa de reflectancia para compensar el ángulo solar. Este índice, después conocido como índice Vegetal de Diferencia Normalizada (NDVI), incluye las reflectancia NIR y roja en el numerador y en el denominador. Otros investigadores han usado una variación del NDVI llamada NDVI verde, o GNDVI para medir las variaciones en la reflectancia verde en vez de la roja (**Gitelson y Merzlyak, 1997**). EL NDVI y el RVI son los dos índices vegetales más comunes usados en sensores remotos hoy en día.

### **2.11.2. Índices vegetales ajustados por el suelo**

Un enfoque de cómo trabajar con el fondo de suelo es tratar de eliminarlo usando índices que corrijan la "línea del suelo". Uno de los primeros intentos por corregir la línea del suelo fue presentado por **Kauth y Thomas (1976)**, y es conocido como índice Vegetal Perpendicular (PVI). El PVI calcula la luminosidad el suelo al dar una pendiente para el suelo (A) y un origen (b) derivado de NIR versus base lineal roja del suelo.

El índice Vegetal Ajustado para Suelo (SAVI) simplifica la relación del suelo con la reflectancia de la cubierta vegetal al agregar un factor de luminosidad simple (L), el cual se establece típicamente como 0.5, pero puede ser de 0 a 1 (**Elvidge y Chen, 1995**). Esto permite un buen estimado de cubierta de suelo, aunque sea difícil determinar un coeficiente de luminosidad exacto.

### 2.11.3. Índices de derivadas

Una técnica novedosa de reflectancia de banda angosta minimiza los efectos de fondo de suelo en las firmas espectrales de la cubierta vegetal, por medio del uso de espectros derivados de alta resolución (**Delvidge y Chen, 1995**). Esta permite la discriminación de espectros vegetales del fondo de suelo.

El uso de derivadas no es nuevo; los químicos analíticos las han usado para eliminar el ruido de fondo durante décadas. **Martín (1957)** menciona el uso de derivadas de primer y segundo orden para reducir la interferencia de fondo. **Savitzky y Golay** introdujeron un método para suavizar los datos espectrales para análisis derivado en 1964, el cual se sigue usando. Sin embargo, la utilidad de los espectros derivados no había sido reconocida en espectros vegetales sino hasta la década de 1980 (**Demetriades-Shah et al., 1990**).

**Elvidge y Chen (1995)** usaron índices vegetales integrados de espectros derivados, con una línea base de suelo, para calcular el índice de cubierta foliar y porcentaje de cubierta verde en una cubierta de pino de piñón con cinco fondos de grava diferentes. Las derivadas integradas, o anti-derivadas, se relacionan con los espectros derivados por el teorema fundamental mostrado por la ecuación siguiente:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(x) \delta x = R(\lambda_1) - R(\lambda_2)$$

Este teorema establece que la suma de cambios instantáneos es una cantidad igual al cambio total. Por lo tanto, la derivada integral entre dos longitudes de onda es el valor de la segunda longitud de onda menos el valor de la primera, y el índice integrado derivado es análogo al índice de diferencia vegetal (DVI). Una corrección de línea de base mejora los cálculos de cubierta de suelo en varios fondos porque ahoga los efectos de la pendiente del suelo. Las derivadas también se pueden analizar por la forma, ubicación, y altura de sus picos para extraer información sobre la salud de la planta (**Peñuelas et al., 1994**), aunque estas características pueden cambiar entre los niveles de medición de hoja y cubierta vegetal.

**Elvidge y Chen (1995)** probaron los cálculos de cubierta verde derivados usando índices de primer y segundo orden. El índice derivado de primer orden fue normalizado a la pendiente espectral a 626 nm. Los autores observaron que un índice derivado de vegetación verde de primer orden, integrado entre (626 y 795 nm con una línea base local, daba las relaciones más lineales con IAF y porcentaje de cubierta verde en varios fondos de suelo ( $r^2=0.945$ ), seguido de cerca por el segundo índice derivado de vegetación verde. Se encontró que estos índices derivados eran superiores a PVI y SAVI para calcular la cubierta de suelo y IAF. Sin la línea base local, las correlaciones de la primera derivada eran sustancialmente más pobres que las correlaciones de la segunda derivada.

El análisis de primer orden es esencialmente una aplicación del DVI simple, con una corrección de la pendiente del fondo de suelo agregado por medio de la línea base local. El análisis de la derivada de segundo orden no mostró mejora sustancial al usar este método de corrección por su habilidad inherente para eliminar la pendiente del suelo.

Otra aplicación del análisis de derivadas se propuso por **Adams *et al.*, (1999)** como método para determinar la concentración de clorofila. El índice de amarillamiento es una aproximación de tres puntos de la segunda derivada entre 550 y 650 nm y ha mostrado resultados positivos en identificar la concentración de clorofila de plantas de soya deficientes de manganeso. La premisa del índice de amarillamiento es que la forma de los espectros de reflectancia verde cambia a medida que la planta se vuelve clorótica. Un segundo análisis derivado de esta forma acentúa estos cambios de forma, permitiendo la identificación de plantas cloróticas basándose en este cambio de forma. Este método asume que todas las plantas cloróticas exhiben esta característica. Los autores notaron que aunque se use el rango de 550 a 650 nm para su estudio, otras longitudes de onda pueden ser apropiadas, dependiendo en la especie del cultivo y otros factores ambientales y fisiológicos.

## **2.12 El nitrógeno en el Pimiento**

### **2.12.1 Importancia del nitrógeno en la planta**

El N es necesario para la síntesis de la clorofila y como parte de la molécula de la clorofila está involucrado en el proceso de la fotosíntesis. La carencia de N y en consecuencia, la carencia de clorofila no permite que la planta utilice la luz solar como fuente de energía en el proceso de la fotosíntesis y la planta pierde la habilidad de ejecutar funciones esenciales como la absorción de nutrimentos.

El pimiento es una planta muy exigente en nitrógeno durante las primeras fases del cultivo, decreciendo la demanda de este elemento tras la recolección de los primeros frutos verdes, debiendo controlar muy bien su dosificación a partir de este momento, ya que un exceso retrasaría la maduración de los frutos.

Teniendo en cuenta que las extracciones del cultivo a lo largo del ciclo guardan una relación de 3.5-1-7-0.6 de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O y MgO, respectivamente.

Tras el cuajado de los primeros frutos se riega con un equilibrio N-P-K de 1-1-1, que va variando en función de las necesidades del cultivo hasta una relación aproximada de 1.5-0.5-1.5 durante la recolección.

Los fertilizantes de uso más extendido son los abonos simples en forma de sólidos solubles (nitrato cálcico, nitrato potásico, nitrato amónico, fosfato monopotásico, fosfato monoamónico, sulfato potásico y sulfato magnésico) y en forma líquida (ácido fosfórico y ácido nítrico), debido a su bajo costo y a que permiten un fácil ajuste de la solución nutritiva, aunque existen en el mercado abonos complejos sólidos cristalinos y líquidos que se ajustan adecuadamente, solos o en combinación con los abonos simples, a los equilibrios requeridos en las distintas fases de desarrollo del cultivo.

De los estudios realizados por diversos investigadores, la fertigración nitrogenada es la que más se ha estudiado. Ello obedece a que es un nutrimento móvil en el suelo y las fuentes fertilizantes que se emplean presentan una alta solubilidad.

El cultivo de chile presenta en general una buena respuesta a la aplicación de N. **Payero et al. (1990)** señalaron que el N influenciaba el crecimiento y desarrollo del cultivo de chiles para producción de frutos, y que este efecto depende de la disponibilidad de N en el suelo y de la cantidad de N aplicado. Por otra parte, **Stroehlein y Oebker (1979)** indicaron que un suministro óptimo de N en el cultivo de chile es esencial para alcanzar una alta producción de frutos de gran calidad (para exportación).

Para el manejo adecuado de los fertilizantes nitrogenados, es importante considerar también la época de aplicación de éstos en los cultivos. De acuerdo a lo anterior, **Batal y Smittlle (1981)** los altos rendimientos y frutos de buena calidad se obtienen cuando se suministra suficiente N para mantener una concentración de 20 mg\*kg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub> en la solución del suelo en la estación de primavera y 30 mg\*kg<sup>-1</sup> en el período de lluvias. Se requiere mayor concentración de N-NO<sub>3</sub> en la solución del suelo durante el período de lluvias debido a que éstos pueden ser fácilmente lixiviados, y por lo tanto pueden presentarse deficiencias de N en el cultivo.

En México, **Burgueño et al. (1994)** presentan valores de algunos nutrimentos en términos de concentración, obtenidos mediante el análisis de hojas y pecíolos (en seco) del cultivo de chile Bell para tres etapas fenológicas (Cuadro 6).

**Cuadro 6. Valores críticos y óptimos de concentración de nutrientes en hojas y pecíolos para diferentes etapas fenológicas en el cultivo de chile Bell (Burgueño et al., 1994).**

Etapa	N-NO <sub>3</sub>	P-PO <sub>4</sub>	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
Fenológica	-----ppm-----		-----%-----			-----ppm-----			
<b>Floración</b>									
Óptimo	16000	4000	7.0	1.8	0.85	130	30	45	90
Crítico	12000	3500	6.0	1.2	0.75	110	15	35	70
<b>Formación de frutos</b>									
Óptimo	14000	3000	6.5	2.0	0.8	120	25	40	80
Crítico	11000	2500	5.5	1.5	0.7	100	10	30	60
<b>Producción</b>									
Óptimo	12000	2800	6.0	2.5	0.8	110	25	30	80
Crítico	9000	2000	5.0	1.8	0.7	90	10	25	50

Desafortunadamente, los autores mencionados anteriormente no indican sobre la posición que ocupa el órgano de referencia dentro de la arquitectura de la planta: sin embargo, para el cultivo de chile (pimiento dulce o morrón) **Martinez-Cañadas et al. (1985a)** en un trabajo para determinar la influencia de la posición de la hoja en la planta sobre parámetros de control nutricional, y para proponer el tipo de hoja más adecuado para su muestreo, dividieron la planta en tres partes (tercio basal, tercio medio y tercio apical); dentro de lo más sobresaliente encontraron que en el tercio medio se presentó la menor variabilidad en la concentración nutrimental.

**Piggott (1988)** hace una recopilación de trabajos publicados por diversos autores (Cuadro 7), sobre el rango de concentración (deficiente y adecuado) de varios nutrimentos, señalando, además, información del tipo de órgano muestreado y estado de crecimiento del cultivo de chile al momento del muestreo.

**Cuadro 7. Concentración nutrimental en algunos órganos de referencia en distintas etapas fenológicas del cultivo de chile *C. annuum* (Piggott, 1988).**

Nutrimento	Etapa fenológica	Parte de la planta Muestreada*	Rango de concentración	
			Deficiente	Adecuado
N	Vegetativa intermedia	HRM + P	--	3.00 - 4.50
(%)	Inicio de fructificación	HRM + P	--	2.90 - 4.60
N-NO <sub>3</sub>	Vegetativa inicial	PHRM	0.80	1.20
(%)	Inicio de fructificación	PHRM	0.30	0.50
P	Vegetativa intermedia	HRM + P	--	0.30 - 0.70
(%)	Inicio de fructificación	HRM + P	--	0.30 - 0.50
PO <sub>4</sub> -P	Vegetativa inicial	PHRM	0.20	0.40
(%)	Inicio de fructificación	PHRM	0.15	0.25

\*HRM+P Hojas de reciente maduración más el pecíolo, PHRM Pecíolos de las hojas de reciente maduración, PAP = Parte aérea de la planta.

En la absorción de los nutrimentos influyen diversos factores como: genotipo, ambiente, calidad de agua de riego y técnicas del cultivo (Nuez *et al.*, 1996). Estos autores, mencionan que las hojas son las que muestran una información más precisa de la absorción de los nutrimentos; sus contenidos se muestran en el Cuadro 8.

**Cuadro 8. Contenido de elementos minerales a nivel foliar de referencia para el cultivo de pimiento.**

Elemento	Alto	Normal	Medio
Nitrógeno (%)	5.1 — 6.0	4— 5	3 —3.9
Fósforo (%)	0.7 — 0.8	0.3 — 0.7	0.2 — 0.3
Potasio(%)	5.6—6.0	4.5—5.5	3.5—4.5
Calcio(%)	4.1—5.0	2.0—4.0	0.5—1.9
Magnesio (%)	1.8 — 2.5	1.0 — 1.7	0.5 — 0.9

Fuente: Nuez *et al.* (1996).

En el cuadro 9 se indican los niveles foliares normales en la planta adulta.

**Cuadro 9. Niveles foliares de referencia para cultivo del pimiento (en base a %MS)**

N	P	K	Ca	Mg
3.0-5.0	0.3-0.8	3.5-5.5	1.5-4.0	0.8-1.7

De las cantidades totales extraídas, los frutos extraen la mayor parte de nitrógeno (64%) y fósforo (75%), siendo el resto de órganos vegetativos (hojas, tallos y pecíolos) los que acumulan la mayor cantidad de calcio (94.3%) y magnesio (67%). Los órganos vegetativos acumulan el 81% del potasio (Cuadro 10).

**Cuadro 10. Extracción de nutrimentos de las diferentes partes de la planta de pimiento**

Parte de la planta	Rendimiento en materia fresca (kg ha <sup>-1</sup> )	Elemento extraídos en kg ha <sup>-1</sup>					Rendimiento en materia seca (kg ha <sup>-1</sup> )
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	
Hojas y tallos	22800	95	19	214	148	20	3050
Frutos	54000	101	36	49	9	12	3070
Raíces	1360	5	1	6	3	0.6	210
Total	78160	201	56	269	160	30.6	6330

Fuente: Rico (1983).

**Cuadro 11. Rangos óptimos de concentración foliar para pimiento (en base a % de MS) propuestos por Cadahia (2000).**

Período	N	P	K	Ca	Mg
Fructificación	4.4	>0.2	4.5-4.4	1.4-1.7	0.6-0.7
Maduración de frutos	4.3	>0.2	4.6-4.9	2.4-2.7	0.8-0.9

En referencia al análisis de savia, Burgueño *et al.* (1994) propusieron dividir la concentración de los elementos minerales en la savia en tres niveles para el cultivo de chile Bell (Cuadro 12):

- Nivel 1. Concentración de los elementos minerales en donde las plantas presentan niveles de crecimiento óptimo, habiendo tendencia a concentraciones superiores que indiquen un exceso de aplicación de fertilizantes.
- Nivel 2. Concentración de elementos minerales en donde las plantas se desarrollan normalmente.
- Nivel 3. Concentraciones cercanas a niveles de carencia de nutrientes, siendo necesaria una intervención oportuna.

**Cuadro 12. Concentración de nutrimentos mediante el análisis de savia en el cultivo de chile Bell (Burgueño *et al.*, 1994).**

Nivel	Concentración de elementos minerales										pH	CE dS m <sup>-1</sup>
	N-NO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	K	Ca	Mg	Na	Zn	Cu	Fe	Mn		
1	1700	280	7660	80	700	70	3	5	2	6	5.6	21
2	1200	220	7000	40	550	30	2.5	3	1.5	5	5.4	20.5
3	900	160	6500	30	400	18	1	1	0.5	2.5	5.3	19

Hartz *et al.*, (1993) mencionaron que el rendimiento máximo de frutos y del peso seco total de la planta fue obtenido en aquellas plantas que mantuvieron concentraciones de N-NO<sub>3</sub> en el pecíolo seco >5,000 µg g<sup>-1</sup> (ppm) cerca del período de llenado de fruto.

Estos valores son muchos más bajos que los mostrados por Burgueño *et al.* (1994) que presenta valores de 9,000 a 14,000 ppm, para los periodos señalados. Sin embargo, la concentración de nitratos en el pecíolo, es un reflejo de la cantidad de N realmente disponible para el metabolismo de la planta. Por lo anterior, un buen seguimiento de estas concentraciones permitirá conocer el estatus del N en cultivos que reciben fertigración, donde a disponibilidad del N del suelo puede ser modificado y/o ajustado a futuro.

**Cuadro 13. Rangos óptimos de concentración en savia (mg\*1<sup>-1</sup>) para pimiento, propuestos por Cadahia (2000)**

Período	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>
Fructificación	4.743-6.058	214-265	6.018-7.127	67-130	750-1,00
Maduración de frutos	5.394-5.549	>70-80	8.5-8.557	90-190	600-700

A continuación se presenta rangos de niveles adecuados como guía en el análisis foliar para el cultivo de pimiento, los macronutrientes están expresados en porcentajes (%):

Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio	Azufre
3.0 – 6.0	0.4 – 0.8	4.0 – 6.5	0.75 – 2.50	0.5 – 1.0	0.3 – 0.6

**Ramírez (2000)**

Se debe considerar que la mayor absorción de nutrientes ocurre en las primeras 8 a 14 semanas de crecimiento y nuevamente después de la primera cosecha. Por ello, altos niveles de nitrógeno son requeridos durante el estado inicial de crecimiento de la planta, con aplicaciones suplementarias después del estado inicial de fructificación. Ramírez (2000).

### **2.12.2 Síntomas de deficiencia de N en la planta.**

Cantidades adecuadas de N producen hojas de color verde oscuro, debido a que éstas tienen una alta concentración de clorofila. La deficiencia de N resulta en clorosis (amarillamiento) de las hojas debido a presencia de cantidades reducidas de clorofila.

El pigmento verde de la clorofila absorbe la energía de la luz necesaria para iniciar la fotosíntesis. La clorofila ayuda a convertir el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) en azúcares simples. Estos azúcares y los productos de su transformación son usados para el crecimiento y desarrollo de la planta.

### **2.12.3 El nitrógeno como mejorador de la absorción del fósforo**

El fósforo es vital para el crecimiento inicial de las plantas y el nitrógeno influye favorablemente en la absorción de dicho elemento.

El fósforo es más disponible para la planta cuando se aplica con nitrógeno, que cuando se aplica sin este nutrimento.

La influencia de nitrógeno sobre la absorción de fósforo es muy clara durante el crecimiento inicial. En algunos casos hasta el 65% del fósforo en la planta proviene del fertilizante fosfórico aplicado temprano en el ciclo del cultivo.

El amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) afecta significativamente la disponibilidad y absorción del fósforo. El  $\text{NH}_4^+$  en altas concentraciones reduce las reacciones de fijación de fósforo. De igual manera, la absorción de  $\text{NH}_4^+$  ayuda a mantener una condición ácida en la superficie de la raíz, mejorando de esta forma la absorción del fósforo (De Villa y Alfaro, 1997).

#### 2.12.4 Extracción nutrimental

Las cantidades de nutrientes extraídos por las plantas de pimiento depende del tipo de crecimiento, del ciclo de producción y principalmente de las variedades utilizadas (Cuadro 14).

**Cuadro 14. Extracción de nutrientes por el cultivo de pimiento**

Nutriente	Kg t <sup>-1</sup> de fruto				
	Vivancos, 1989	Nuez <i>et al.</i> , 1996	INTA, 1997	Moreno Valencia, 2006	INPOFOS, 2006
Nitrógeno (N)	4.615	3.605	2.357	2.93	6.8
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.23	0.775	0.271	0.33	2.577
Potasio (K <sub>2</sub> O)	5.692	5.273	2.341	3.833	10.8
Calcio (Ca)		3.31	0.266	1.207	
Magnesio (Mg)		0.692	0.166	0.631	2.13

## **CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE LITERATURA.**

Se conoce ampliamente la utilidad de los sensores de percepción remota en la agricultura. Muchos trabajos se han enfocado en analizar las imágenes satelitales para diferenciar masas vegetales. Algunos trabajos muestran la utilidad de la reflectancia medida con espectroradiómetros. Sin embargo, estas técnicas no están al alcance de todos por cuestiones económicas y de otra índole. Por lo que es relevante considerar otras técnicas que permitan obtener los mismos resultados con la misma calidad y menor costo, tales como las imágenes digitales de escáner.

### **3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

#### **Objetivo general**

Determinar el estrés por nitrógeno mediante la obtención de la reflectancia en hojas de pimiento.

#### **Objetivos particulares**

Obtener firmas espectrales de hojas de pimiento desarrollado en condiciones de deficiencia y exceso de nitrógeno.

Determinar el contenido de nitrógeno en plantas de pimiento desarrolladas en tratamientos con deficiencias y excesos de este elemento.

Correlacionar la reflectancia y lecturas SPAD con el contenido de nitrógeno, en hojas de pimiento.

Determinar la viabilidad de usar un espectrómetro e imágenes digitales, para obtener información en tiempo real durante la fase exponencial de desarrollo del cultivo, para el diagnóstico de nitrógeno.

Establecer niveles críticos de reflectancia (NCR) para el diagnóstico-pronóstico del estado de sanidad del cultivo.

#### **HIPÓTESIS**

La reflectancia de la hoja permite estimar deficiencia y toxicidad de nitrógeno.

En los espacios espectrales visible e infrarrojo cercano se detectan cambios en las propiedades ópticas (fitoelementos) de la hoja, resultado del estrés por nitrógeno.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental

La investigación se hizo de junio a diciembre de 2006 en los invernaderos del Colegio de Postgraduados en el km. 36.5 de la carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

### Manejo experimental

El cultivo de pimiento (*Capsicum annum L.*) cv Orion se estableció en un invernadero tipo baticenital. La fecha de siembra fue el 7 de junio de 2006, colocando 200 semillas pre-germinadas por charola de 200 cavidades. Se aplicó una lámina de riego promedio de 3 mm diariamente a las charolas. Cuando las plántulas alcanzaron una altura de 15 cm, se transplantaron a vasos de unicel de 1 L de capacidad que contenían tezontle como sustrato, con una granulometría de 5 a 10 mm. El suelo se mantuvo a capacidad de campo. Se colocó una planta por vaso, posteriormente, cuando ésta alcanzó 30 cm de altura se trasplantó a bolsa de polietileno negra de 30X35cm.

Se montaron dos experimentos:

El primero consistió de 6 soluciones nutritivas con diferentes niveles de nitrógeno: 0, 4, 8, 12, 16 y 20 me L<sup>-1</sup>, a partir de la solución Steiner (Cuadro 15). Se establecieron 108 unidades experimentales, provenientes de los 6 tratamientos por 3 repeticiones y 6 muestreos (muestreo semanal). Los tratamientos se comenzaron a aplicar después del segundo mes después de germinación.

El segundo consistió de 4 soluciones nutritivas con diferentes niveles de nitrógeno: 0, 4, 12 y 20 me L<sup>-1</sup>, a partir de la solución Steiner (Cuadro 15). Se establecieron 84 unidades experimentales, provenientes de los 4 tratamientos por 3 repeticiones y 7 muestreos (muestreo semanal). Los tratamientos se comenzaron a aplicar después del tercer mes después de germinación.

El diseño experimental fue el completamente al azar con tres repeticiones.

El pH de las soluciones nutritivas se mantuvo diariamente en un rango de 5.5-6.5, mediante la adición de 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Los riegos con solución nutritiva se realizaron por las mañanas y por las tardes durante todo el experimento.

**Cuadro 15. Diseño de tratamientos**

meq L <sup>-1</sup> de Nitrógeno	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	CE
	meq L <sup>-1</sup>								dS m <sup>-1</sup>
0	9	4	7	0	0	1	7	12	1.6
4	9	4	7	0	4	1	7	8	1.7
8	9	4	7	0	8	1	7	4	1.9
12	9	4	7	0	12	1	7	0	2.0
16	9	4	7	2	14	1	7	0	2.3
20	9	4	7	4	16	1	7	0	2.5

Solución nutritiva universal de Steiner al 100 %, CE = conductividad eléctrica

Las soluciones nutritivas se mantuvieron en recipientes con capacidad de 20 litros, con su respectiva 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 manguera con goteros, dispuestos cada 30 cm y por gravedad.

En el Cuadro 16 se indica las fuentes y concentraciones de micronutrientes adicionados a las soluciones nutritivas.

**Cuadro 16. Micronutrientes empleados**

H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	MnCl <sub>2</sub> . 4H <sub>2</sub> O	ZnSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	CuSO <sub>4</sub> . 5H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	Fe-EDTA(7%)
----- g L <sup>-1</sup> -----					
2.88	1.81	0.22	0.18	0.1	71.48

Para tal efecto, se aplicó un mL de micronutrientes por cada litro de solución Steiner.

### Medición de área foliar

El índice de área foliar (IAF) se calculó a partir del área foliar medida con un integrador de área foliar LI-3100, (LI-COR, Lincoln, NE, USA) tomando una densidad de 6 plantas\*m<sup>2</sup>. Se obtuvieron los promedios de tres mediciones por unidad experimental del IAF.

El porcentaje de cobertura vegetal verde fue medido con una cámara digital (Canon PowerShot A300, 3.2 Mega-píxeles) colocada a 1 metro sobre cada punto de monitoreo (unidad experimental), teniendo claro el área cubierta por la fotografía y sacando el porcentaje de esta área cubierto por vegetación mediante clasificación de los píxeles en el programa de computo (IDRISI KILIMANJARO) mediante las instrucciones Image Processing-Signature Development-MAKESIG, posteriormente se sigue la instrucción Image Processing-Signature Development-SIGCOMP y finalmente Image Processing-Hard Classifiers-MAXLIKE y para obtener el área es GIS Análisis-Database Quero-AREA.

### **Análisis espectral y muestreo de hojas**

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

La medición de la reflectancia de hojas de pimiento se realizó con un espectrómetro (CROPSCAN modelo MSR5) a una altura de 1m, cubriendo un área de 0.25 m<sup>2</sup>, obteniendo valores de la mezcla suelo-vegetación. El espectrómetro mide tres bandas en la porción visible del espectro (485, 560 y 660 nm) y dos bandas en el rango del infrarrojo (830 y 1650 nm). También se usó un escáner (GENIUS, ColorPage-Vivid 1200XE escaneando a 400dpi) para la obtención de imágenes, que posteriormente se separaron en tres bandas (azul, verde y roja) y se obtuvo la reflectancia de cada una de estas bandas en el área cubierta por material vegetal, esto utilizando el programa de computo IDRISI que permite realizar estas manipulaciones de imágenes digitales

Las reflectancias espectrales en hojas de pimiento en el primer experimento se midieron los días 11, 18 y 24 de septiembre; 1, 8 y 16 de octubre de 2006.

Las reflectancias espectrales en hojas de pimiento en el segundo experimento se midieron los días 9 y 29 de octubre; 5, 12, 21 y 27 de noviembre y 6 de diciembre de 2006.

Esta información se analizó utilizando índices espectrales que han sido correlacionados con el estado de salud de la planta y concentraciones de compuestos bioquímicos de las hojas (Cuadro 17).

## Análisis químico de nitrógeno en tejido vegetal

El muestreo de hojas para el análisis químico se realizó cada vez que se midió la reflectancia con el espectrómetro: estos muestreos fueron destructivos y se consideraron 3 repeticiones. Las muestras de tejido vegetal se secaron hasta peso constante en una estufa con circulación forzada de aire a 70°C durante 48 horas.

Para la cuantificación de nitrógeno se utilizó la técnica de microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982).

**Cuadro 17. 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	$(\text{NIR} - \text{ROJO}) / (\text{NIR} + \text{ROJO})$	Rouse <i>et al.</i> , 1973
NDVI 560	Índice de vegetación diferencial normalizada verde	$(\text{NIR} - \text{VERDE}) / (\text{NIR} + \text{VERDE})$	Gitelson y Merzlyak, 1998
NDVIverde /NDVIrojo	Tasa normalizada verde /rojo	NDVI560 /NDVI660	Ritchie, 2003
Mv	Modelo Verde	$(830\text{nm}/560\text{nm}) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> , 2005

## Análisis estadísticos

Los índices de vegetación y de las variables IAF, el porcentaje de cobertura vegetal y nitrógeno, se sometieron a un análisis de varianza y modelación lineal usando GLM, procesado en SAS (ver. 8.2) y Microsoft Excel. Para determinar diferencias estadísticas significativas entre tratamientos se realizó una prueba de comparación de medias por Tukey al 5% de probabilidad para todas las variables. Además, se hizo un análisis de correlación entre ellos para probar las hipótesis propuestas, mediante el programa estadístico SAS.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Patrones de reflectancia

En la Figura 6 se aprecian cambios en los valores de la reflectancia entre 830 y 1650 nm, para los niveles de nitrógeno, los cuales fueron usados para identificar el estado de estrés nutrimental del cultivo (Carter y Spiering, 2002).

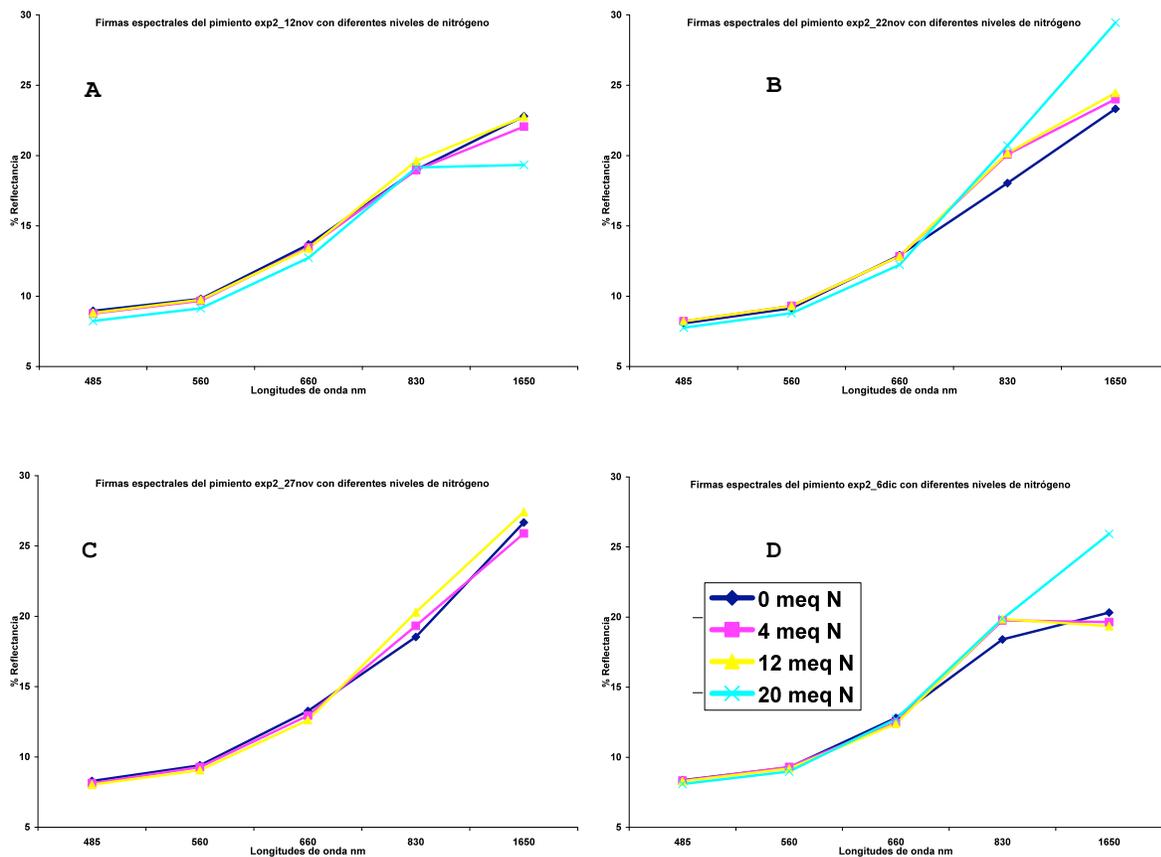


Figura 6. Patrones de reflectancia, obtenidos con un espectralradiómetro en plantas de pimiento con diferentes niveles de nitrógeno (A: 36 DDT; B: 46 DDT; C: 51 DDT; D: 60 DDT).

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 Gamón, 2002). Así mismo, 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 Gamón, 2002), por lo que la concentración de clorofila es usualmente predicha a partir de reflectancias entre los 550 y 700 nm.

El Cuadro 18 muestra los patrones de reflectancia dentro del espectro 485 - 1650 nm, los cuales variaron a través de las etapas de crecimiento del cultivo. Esto debido a que la reflectancia es influenciada por el Índice del área foliar (IAF) de la planta (Taiz y Zeiger, 2002).

**Cuadro 18. Patrones de reflectancia, obtenidos con un espectroradiómetro en plantas de pimiento con diferentes niveles de nitrógeno y días después del trasplante (DDT).**

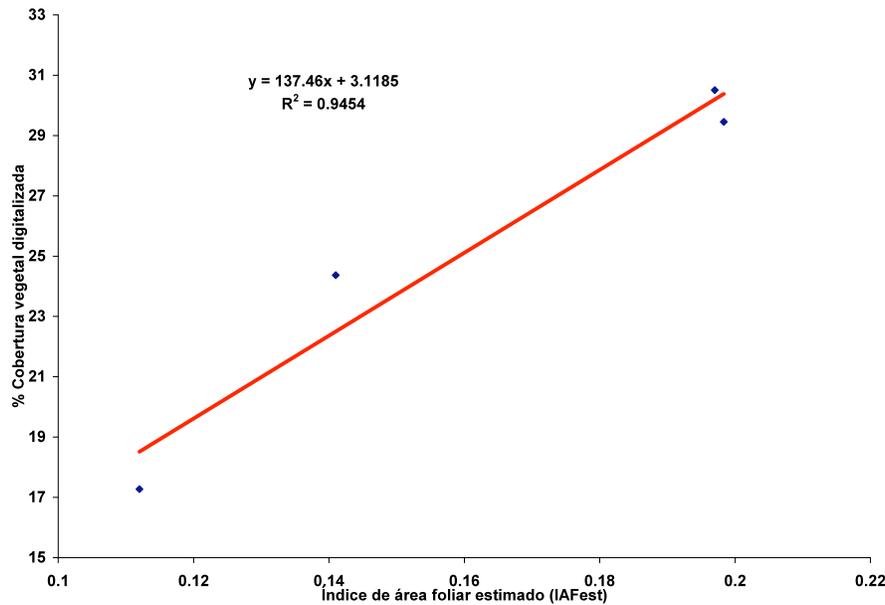
36 DDT																
Tratamiento	IRR	485 nm		560 nm		660 nm		830 nm		1650 nm		N%		CM2		
1	186	a	9.0	a	9.8	a	13.7	a	19.0	a	22.8	a	2.7	c	470	b
2	182	a	8.8	ba	9.7	ba	13.5	a	19.0	a	22.1	a	3.3	b	494	b
3	192	a	8.8	ba	9.8	a	13.4	a	19.6	a	22.8	a	3.4	b	605	a
4	232	a	8.2	b	9.1	b	12.7	b	19.2	a	19.3	b	4.2	a	654	a
46 DDT																
1	233.8	a	8.1	a	9.1	a	12.9	a	18.0	b	23.3	a	1.9	d	457	b
2	223.0	a	8.2	a	9.3	a	12.8	ba	20.1	a	24.0	a	2.7	c	721	a
3	227.6	a	8.2	a	9.3	a	12.8	ba	20.2	a	24.5	a	3.2	b	689	a
4	242.7	a	7.8	a	8.8	a	12.2	b	20.7	a	29.5	a	3.5	a	754	a
51 DDT																
1	237.7	a	8.3	a	9.4	a	13.3	a	18.5	c	26.7	a	1.9	d	432	C
2	237.8	a	8.1	ba	9.3	a	12.9	b	19.3	bc	25.9	a	2.6	c	609	B
3	238.9	a	8.0	b	9.1	b	12.6	c	20.3	ba	27.4	a	2.9	b	736	A
4	230.6	b	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3.3	a	763	A
60 DDT																
1	209.1	a	8.4	a	9.3	a	12.8	a	18.4	b	20.3	ba	2.3	d	456	B
2	208.7	a	8.3	a	9.3	a	12.5	b	19.8	a	19.6	b	2.6	c	670	A
3	209.8	a	8.3	a	9.2	ba	12.4	b	19.9	a	19.4	b	3.0	b	696	A
4	228.4	a	8.1	a	9.0	b	12.7	a	19.9	a	25.9	a	3.7	a	599	A

*Cifras con diferente letra presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey al 5% de probabilidad).*

## Índices espectrales

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.

En el experimento, la estimación de la cobertura vegetal digitalizada y el IAF (6 plantas\*m<sup>-2</sup>) tuvieron una relación altamente significativa (Figura 7), por lo que se puede realizar una medición indirecta del IAF sin la necesidad de utilizar un integrador de área foliar y de una manera mucho más práctica y sin dañar tejido vegetal alguno, al menos dentro de los primeros 60 DDT.



**Figura 7. Ajuste lineal entre índice de área foliar estimado (IAFest) y cobertura vegetal (medida por digitalización de imágenes) en pimiento a los 51 DDT.**

El modelo estadístico utilizado para comparar cobertura vegetal y la tasa normalizada verde/rojo NDVI 560 nm / NDVI 645 nm (Cuadro 19) fue  $y = ax+b$ ; donde “y” es la tasa normalizada verde/rojo, “a” es la pendiente de la recta, “x” es la fracción de cobertura vegetal, y “b” es la ordenada al origen, por lo que se puede inferir que las mediciones realizadas con el espectroradiómetro (CROPSCAN) y con la cámara digital nos arrojan resultados muy similares en cuanto a la estimación de cobertura vegetal. Puesto que la cámara digital es una herramienta accesible, se puede utilizar ésta para estimar los valores de la tasa normalizada verde/rojo.

**Cuadro 19. Relación de la cobertura vegetal digitalizada y la tasa normalizada verde/rojo NDVI560/NDVI660 en pimiento.**

DDT	Modelo	R <sup>2</sup>
36	$y = -0.0305x + 2.5905$	0.978
46	$y = -0.0324x + 2.6266$	0.996
51	$y = -0.0328x + 2.6703$	0.999
60	$y = -0.026x + 2.3768$	0.964

y= tasa normalizada verde/rojo NDVI560/NDVI660; x= % cobertura vegetal digitalizada; DDT=días después de trasplante

**Comparación de índices espectrales versus contenido de nitrógeno para la identificación de clorosis**

El modelo verde (830 / 560) -1 y la tasa normalizada NDVI<sub>560</sub> / NDVI<sub>660</sub> se utilizaron para identificar alguna clorosis en el cultivo: ambos índices son simples y presentan un alto coeficiente de determinación al correlacionarlos con las concentraciones de nitrógeno, mientras que la tasa normalizada también lo tiene con las imágenes digitalizadas de cobertura vegetal. El índice NDVI<sub>560</sub> fue comparado con NDVI<sub>660</sub>; ambos índices normalizados por la reflectancia del infrarrojo cercano (830 nm) minimizan el efecto de la fracción de la cobertura vegetal sobre la comparación directa de la reflectancia del verde (560 nm) y del rojo (660 nm) (Ritchie, 2003).

**Cuadro 20. Relación de NDVI560 y NDVI660.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>
1	45	$y = 0.6322x + 0.2153$	0.697
1	37	$y = 0.6041x + 0.2399$	0.906
1	30	$y = 1.0207x + 0.1287$	0.897
1	23	$y = 0.7303x + 0.2016$	0.962
2	60	$y = 0.7472x + 0.1972$	0.752
2	51	$y = 0.8299x + 0.1863$	0.997
2	46	$y = 0.819x + 0.188$	0.992
2	36	$y = 0.8202x + 0.1841$	0.970

x= NDVI 660nm; y= NDVI 560nm; DDT=días después de trasplante.

Los resultados de la comparación del NDVI<sub>560</sub> con el NDVI<sub>660</sub> durante la etapa de crecimiento fueron previsibles porque la reflectancia del verde es sensible a rangos amplios de concentración de clorofila (Cuadro 20), mientras que la reflectancia del rojo es insensible a concentraciones altas de clorofila (Gitelson y Merzlyak, 1998). Desviaciones a partir de la relación entre estos índices para un cultivo sin estrés hídrico puede presentar cambios de firmas espectrales en NDVI<sub>560</sub> debido a cambios en el contenido de clorofila. La regresión lineal de NDVI<sub>560</sub> versus NDVI<sub>660</sub> para los tratamientos mostraron altos coeficientes de determinación (Cuadro 20).

El comportamiento en cambio de pendientes, mostrados en el Cuadro 20 y Figura 8 se debe a que las deficiencias de nitrógeno se asocian a bajos contenidos de clorofila total. Por tanto, el porcentaje de reflectancia del verde es alto y resulta un valor bajo del NDVI<sub>560</sub>. El resultado de NDVI<sub>660</sub> (valor tendiente a uno) es un caso contrario.

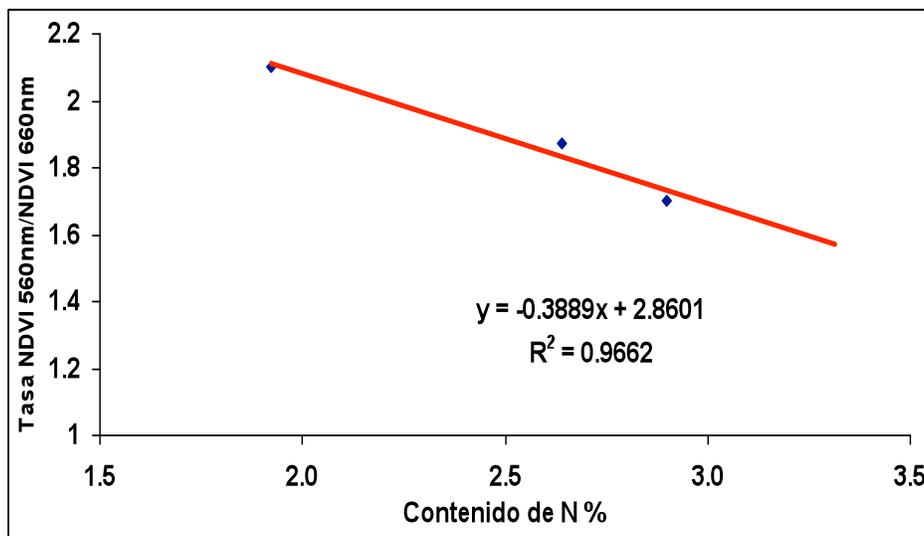
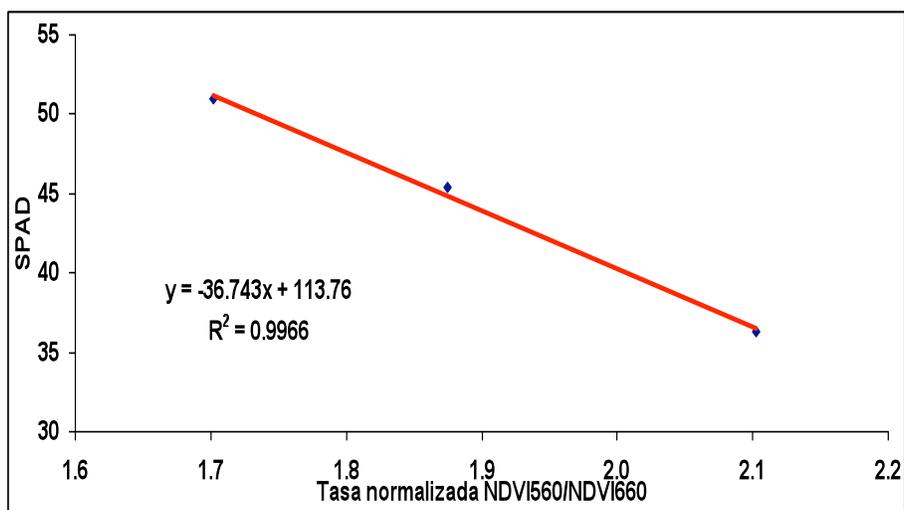


Figura 8. Relación lineal de la tasa NDVI560 / NDVI660 y N% exp2 51 DDT.

En la Figura 9 se muestra la relación de la tasa normalizada NDVI<sub>560</sub> / NDVI<sub>645</sub> con las lecturas SPAD. El ajuste de este modelo permite establecer el nivel crítico de 1.7 de la tasa normalizada verde/rojo de la reflectancia asociado a un valor de lecturas SPAD de 50 que corresponde a un 3% de contenido de nitrógeno en el pimiento. Este valor, es un criterio que ayuda en la selección de decisión para el manejo de la nutrición de una agricultura sustentable o de bajo impacto ambiental.



**Figura 9. Relación lineal de la tasa NDVI560 / NDVI660 y lecturas SPAD con un coeficiente de correlación de -0.82789 a los 51 DDT.**

El modelo verde es un estimador remoto de la clorofila propuesto por **Gitelson *et al.* (2005)**. En el Cuadro 21 se modela linealmente la relación entre el modelo verde y la concentración de nitrógeno en las hojas con  $R^2 > 0.8$  y residuales menores de 0.1 (diferencia entre lo observado y lo predicho).

Aunque ambos índices muestran buen ajuste a las funciones no lineales, estas fueron analizadas como funciones lineales.

En el Cuadro 21 se establece el nivel crítico de la concentración de nitrógeno total (3%), por debajo de éste nivel la planta de pimiento presentará deficiencia de N y esto se encuentra asociado con índices de reflectancia del modelo verde menores de 1.3 (nivel crítico de reflectancia-NCR). En éste cuadro también se señalan los parámetros estadísticos de una regresión lineal. Por tanto, el uso de estos modelos lineales permite diagnosticar la concentración de nitrógeno en la fase del crecimiento del pimiento. Actualmente el modelo verde se utiliza en los sensores aéreos y espaciales, como MODIS y MERIS (**Gitelson *et al.*, 2005**).

**Cuadro 21. Modelo verde para la identificación oportuna de la clorosis.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	NCR
1	30	$y = 0.088x + 0.9601$	0.8023	<b>1.224</b>
2	60	$y = 0.1415x + 0.7229$	0.7857	<b>1.147</b>
2	51	$y = 0.2494x + 0.4911$	0.8826	<b>1.239</b>
2	46	$y = 0.2219x + 0.5538$	0.9033	<b>1.220</b>
2	36	$y = 0.1056x + 0.6548$	0.9352	<b>0.972</b>
2	2	$y = 0.2178x + 0.4601$	0.8876	<b>1.114</b>

x= N%; y= modelo verde (830nm/560nm)-1; NCR = nivel crítico de reflectancia; DDT=días después de trasplante.

Los dos índices tienen comportamiento lineal significativo con diferencias marcadas en sus coeficientes de determinación y residuales. Esto se debe a que la tasa normalizada, propuesta por **Ritchie (2003)**, es un índice que permite identificar deficiencias de nitrógeno a partir de la cobertura vegetal digitalizada; no así el modelo verde ajustado para la estimación de la clorofila usando las longitudes de onda 545 -565 nm (**Gitelson et al., 2005**). Ambos índices de reflectancia vegetal han sido desarrollados para sensores de espectroradiómetros pasivos instalados en satélites. Los resultados presentados en esta investigación con el uso de un espectroradiómetro pasivo, demuestra la factibilidad de establecer niveles críticos de reflectancia confiables ( $P < 0.05$ ) que coadyuven en el diagnóstico-pronóstico de la nutrición nitrogenada y rendimiento de los cultivos, a escala pequeña de una agricultura de precisión, abierta o protegida.

#### **Identificación de deficiencia de nitrógeno a partir de datos de espectrómetro.**

La reflectancia de la radiación en las bandas roja y verde por las plantas es fuertemente influenciada por la absorción de la clorofila, de igual manera la deficiencia de nitrógeno está altamente correlacionada con una reducción en el contenido de clorofila y el incremento de la reflectancia de la radiación del espectro verde (**Costa et al., 2001**).

En el Cuadro 22 se muestra una función de ajuste lineal de la concentración de nitrógeno total en hojas y la reflectancia de la radiación con longitud de onda 560 nm (verde). El cultivo desarrollado en un medio deficiente de nitrógeno presentó, un nivel crítico de reflectancia mayor al 9.5%, asociado con concentraciones menores de 3% de nitrógeno. Cuando el cultivo se encontró con suficiente nitrógeno, la reflectancia fue menor a 9.5%.

En los Cuadros 22 a 24 se presentan resultados de los parámetros estadísticos de la regresión lineal, aplicados a los porcentajes de reflectancia simple del espectro verde (560 nm), obtenidos con el espectroradiómetro, escáner y SPAD los cuales establecieron significancia y residuales aceptables para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en plantas de pimiento.

**Cuadro 22. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja con la reflectancia simple del espectro verde del radiómetro.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	NCR
1	45	$y = -0.1512x + 10.298$	0.861	9.844
1	37	$y = -0.1529x + 9.5366$	0.688	9.078
1	30	$y = -0.3159x + 10.831$	0.639	9.883
2	60	$y = -0.2232x + 9.8395$	0.903	9.170
2	51	$y = -0.3088x + 10.013$	0.822	9.087
2	46	$y = -0.1428x + 9.5452$	0.158	9.117
2	36	$y = -0.4417x + 11.094$	0.822	9.769

x= N%; y= reflectancia del espectro verde del radiómetro; NCR= nivel crítico de reflectancia; DDT=días después de trasplante.

**Cuadro 23. Comparación de la concentración de nitrógeno de la hoja con la reflectancia simple del espectro verde en escáner.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	NCR
1	45	$y = -3.5726x + 29.461$	0.955	18.743
1	37	$y = -1.7526x + 26.138$	0.802	20.880
1	30	$y = -1.8362x + 34.515$	0.693	29.006
2	60	$y = -2.3497x + 24.809$	0.732	17.760
2	51	$y = -5.1806x + 32.752$	0.942	17.210
2	46	$y = -3.277x + 26.735$	0.958	16.904
2	36	$y = -1.0946x + 28.471$	0.998	25.187
2	29	$y = -3.643x + 32.795$	0.754	21.866

x= N%; y= Reflectancia del espectro verde en escáner; NCR= nivel crítico de reflectancia; DDT=días después de trasplante.

**Cuadro 24. Comparación de la concentración de nitrógeno de hoja con lecturas SPAD.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	NC
1	45	$y = 8.9008x + 22.873$	0.932	49.575
1	30	$y = 4.6294x + 34.006$	0.534	47.894
2	60	$y = 9.5019x + 19.813$	0.898	48.319
2	51	$y = 12.667x + 12.334$	0.971	50.335
2	46	$y = 9.3207x + 20.965$	0.993	48.927
2	36	$y = 3.7749x + 35.865$	0.583	47.190
2	2	$y = 5.3611x + 30.505$	0.741	46.588

x= N%; y= Lecturas SPAD; NC= nivel crítico; DDT=días después de trasplante.

**Sims y Gamón (2002)** explicaron el comportamiento de la relación de la tasa normalizada verde/rojo y la concentración de nitrógeno, señalando que concentraciones relativamente bajas de clorofila fueron suficientes para saturar la absorción luminosa en el intervalo 660 - 680, lo cual reduce la sensibilidad de estas longitudes de onda para diagnosticar situaciones de altos niveles de clorofila. Los datos de este experimento coinciden con esta idea, porque las desviaciones (saturación) ocurren también a contenidos altos de clorofila.

Por último, la reflectancia en 560 nm, mostró alta correlación con la concentración de nitrógeno de la hoja, en los dos casos estudiados (utilizando un espectroradiómetro y escáner). Otros autores, usando un espectroradiómetro pasivo, señalan a los factores de reflectancia en el intervalo 550 nm y 660 nm con alta correlación a la concentración de nitrógeno total de la hoja (**Fernández *et al.*, 1994**) y contenido de clorofila, respectivamente (**Adams *et al.*, 1999**).

### **Firmas espectrales de reflectancia en diferentes etapas de crecimiento.**

Los dos atributos que definen la apariencia de un cultivo son: su color y las particularidades de la superficie foliar. El color está determinado por la distribución de la energía espectral de la luz dispersa (afectado por la calidad e intensidad de la iluminación), medida ésta en términos de reflectancia y transmitancia, y los atributos de la superficie foliar están determinados por la distribución espacial de la luz, medida ésta en términos de la función de distribución bidireccional superficie-dispersión (siglas en inglés BDF) (**Baranoski y Rokne, 2004**).

La estructura de la hoja de los cultivos más comunes presenta un mesófilo compuesto por dos capas: una de células ordenadas y compactas denominadas parénquima empalizada, y otra capa de células desordenadas y menos compactas conocida como mesófilo esponjoso. Las células empalizadas tienen forma cilíndrica y presentan una mayor concentración de cloroplastos que contienen pigmentos identificados como clorofila (principalmente clorofila *a* y *b*) y carotenoides. La concentración y distribución de estos pigmentos, la estructura interna y grosor de la hoja controlan la absorción de la luz en la región del espectro visible (400 - 700 nm) y su reflectancia por las hojas (**Baranoski and Rokne, 2004**).

Experimentos de **Woolley (1971)**, demostraron que la reflectancia de las hojas es relativamente baja en la región visible del espectro de luz (400-700 nm), contrario a la absorbencia. La absorción selectiva en esta región es causada por pigmentos encontrados en los cloroplastos de las hojas (**Glassner, 1995**). La clorofila (*a* y *b*) es la más importante y abundante de los pigmentos encontrados en el parénquima empalizada, conteniendo dos a tres veces más clorofila *a* que *b*. Estas dos formas de clorofila presentan similar espectro de absorción (**Taiz y Zeiger, 2002**). En el Cuadro 25 muestra esta particularidad, en donde la aplicación de la pendiente (verde-rojo) del escáner presentó alta correlación con el nitrógeno.

**Cuadro 25. Función ajustada a la relación variable biofísica pendiente en escáner (azul a verde) y variable bioquímica nitrógeno total.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	Modelo	NCP
1	45	$y = -0.04x + 0.2561$	0.969	$N\% = -24.226y + 6.3092$	0.136
1	37	$y = -0.0176x + 0.1809$	0.818	$N\% = -46.38y + 9.0442$	0.128
1	30	$y = -0.0238x + 0.219$	0.721	$N\% = -30.275y + 7.6841$	0.148
2	60	$y = -0.0316x + 0.2325$	0.915	$N\% = -28.94y + 6.9742$	0.138
2	51	$y = -0.0495x + 0.2809$	0.910	$N\% = -18.384y + 5.4077$	0.132
2	46	$y = -0.0371x + 0.239$	0.969	$N\% = -26.116y + 6.3299$	0.128
2	36	$y = -0.0103x + 0.1518$	0.938	$N\% = -90.941y + 14.02$	0.121

x= N%; y= Pendiente (azul a verde); DDT= días después de trasplante; NCP= nivel critico de pendiente

**Modelación lineal ajustada al índice de vegetación del modelo conceptual y variables biofísicas y bioquímicas.**

El verdor es una variable biofísica que se obtiene del producto de las lecturas SPAD y áreafoliar específica (cm<sup>2</sup>). Esta variable ha sido utilizada en los últimos 10 años como una manera de medir el estado de salud de planta asociada a índices de reflectancia, obtenidos por sensores remotos contemporáneos base espacial (Ma, 1996). El Cuadro 26 muestra el ajuste lineal promedio (r<sup>2</sup>=0.794) del verdor de la planta con el contenido de nitrógeno total en porcentaje; el mayor contenido de nitrógeno se asocia a valores de verdor más altos.

**Cuadro 26. Función ajustada a la relación variable biofísica verdor y variable bioquímica nitrógeno total.**

Experimento	DDT	Modelo	R <sup>2</sup>	Modelo	NCV
1	45	$y = 7164.5x + 13645$	0.698	$N\% = 1E-04y - 0.3101$	35139
1	30	$y = 6230.2x + 22497$	0.696	$N\% = 0.0001y - 1.3634$	41188
2	60	$y = 8431.6x + 6089.4$	0.460	$N\% = 5E-05y + 1.2348$	31384
2	51	$y = 19246x - 19784$	0.966	$N\% = 5E-05y + 1.0843$	37954
2	46	$y = 14253x - 7046.6$	0.930	$N\% = 7E-05y + 0.657$	35712
2	36	$y = 8449.5x - 1114.4$	0.881	$N\% = 0.0001y + 0.5206$	24234
2	2	$y = 12592x - 7414.3$	0.925	$N\% = 7E-05y + 0.824$	30362

x= N%; y= Verdor (SPAD x área foliar específica); DDT= días después del trasplante; NCV= nivel critico de verdor

## 6. CONCLUSIONES

La aplicación del índice de vegetación de la tasa normalizada (NDVI 560) / (NDVI 660) en la interpretación de las firmas espectrales obtenidas mediante el espectrómetro, es una herramienta que permite diagnosticar el porcentaje de cobertura del cultivo, en tiempo real, de manera sencilla y rápida.

Las variaciones del espectro de reflectancia visible 560 nm, fueron ocasionadas por alteraciones en el contenido de clorofila, relacionadas con concentraciones de nitrógeno total. Por lo tanto, estos cambios se pueden usar para identificar clorosis en tiempo real

El porcentaje de reflectancia del espectro verde (560 nm) es un indicador confiable para diagnosticar el estado de nitrógeno total en el tejido vegetal, ya que un nivel crítico de reflectancia (NCR) del espectro mayor del 9.5 y 21%, para radiómetro y escáner, respectivamente, indica que el cultivo tiene concentraciones menores de 3% de nitrógeno. En consecuencia, es una condición de deficiencia nutrimental respecto a ese elemento. El modelo verde fue un buen estimador de la concentración de nitrógeno, mediante firmas espectrales obtenidas con el espectrómetro. Un nivel crítico de reflectancia (NCR) menor de 1.3 se correlaciona con niveles de concentración menores de 3% de nitrógeno total.

La tasa normalizada verde/rojo permitió identificar en tiempo real el estado de la cobertura vegetal digitalizada.

Longitudes de onda 560 nm y 660 nm presentaron la mayor correlación con el contenido de nitrógeno, por lo cual las pendientes obtenidas de estas dos bandas también son útiles para diagnosticar los niveles bajos, medios y altos de nitrógeno (%).

La combinación de las lecturas SPAD y el área foliar con el índice de verdor presentaron una alta correlación con el contenido de nitrógeno, por lo cual es útil para diagnosticar los niveles de nitrógeno (%).

## 7. LITERATURA CITADA

- Adams, M.L. Philpot and W.A. Norvell. 1999. Yellowness index: an application of spectral second derivation to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *Int. J. Remote Sens.* 20:3663- 675.
- Alcántar G., G., J. Etchevers B. y A. Aguilar S. 1992. *Los Análisis Físicos y Químicos*. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Alcántar, G., G., y M. Sandoval V. 1999. *Manual Análisis Químico de Tejido Vegetal*. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- American Society of Photogrametry. 1983. *Manual of remote sensing*, Vol., 2 nd edition, Sheridan Press, U.S.A. p 2500.
- ASD.1999. *Analytical Spectral Devices, Inc. Technical guide*. 3ra.ed., Boulder, Colorado.USA.
- Asrar, G., E.T. Kanemasu, and M. Yoshida. 1985. Estimates of leaf area Index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sens. Environ.* 17:1-11.
- B.L. Ma. 1996. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agronomy J.* 88:915-920.
- Baranoski, G.V.G.,and J. G. Rokne. 2004. *Light interaction with plants. A computer graphics perspective*. Harwood Publishing Limited. Watergate, Chichester, England.
- Baret, F., I. Champion, G. Guyot, and A. Podaire. 1987. Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sens. Environ.* 22:367-378.
- Batal, K. M. and D. A. Smittle. 1981. Response of Bell pepper to irrigation, nitrogen and plant population. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106:256-262.
- Benedict, H. M.; Swidler, R.. 1961. Nondestructive Method for Estimating Chlorophyll Content of Leaves. *Science*, Volume 133, Issue 3469, pp. 2015-2016.
- Best, R.G., and J.C. Harian. 1985. Spectral estimation of green leaf area Index of oats. *Remote Sens. Environ.* 17:27-36.
- Carter, G.A., and B.A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leave for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31:1424-1432.
- Blackmer, T. M., J. S. Shepers and J. E. Mayer, 1995. Remote Sensing to Detect Nitrogen Deficiency in Corn. *Remote Sens. Environ.* ASA-CSSA-SSSA.
- Bolaños, M. 2000. Estimación de los volúmenes de agua usados en zonas de riego mediante usos en zonas de riego mediante uso de sensores remotos. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Brearen, L. y C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. Pp. 595-634. In: A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (Agronomy9)*. 2nd ed. ASA, SSSA. Madison, WI.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2*. C.A. Black, (ed). 9: 1149-1178. American Society of Agronomy, Madison, WI. USA.
- Burgueño, H., F. Uribe y M. Valenzuela. 1994. *La fertigación de cultivos hortícolas con acolchado plástico*. Bursag, S. A. de C. V., Culiacán, Sinaloa, México. 46p.
- Buschman, C., and E. Nagel. 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation, *Int. J. Remote Sens.* 14:711-722.
- CAADES, 2005. Confederación de Asociaciones Agrícolas del Estado de Sinaloa, 2005. Página electrónica. <http://www.caades.org.mx>.
- Cadahia López Carlos. 2000. *Fertirrigación Cultivos hortícolas y ornamentales*. Ediciones Mundi-Prensa. México.
- Carter, G.A. y B.A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* Vol. 31:1424-1432.
- Castro-Brindis, R., P. S. García., A. Peña-Lomeli., G. A. Gonzáles., G. Baca Castillo y R. M. López-Romero. 2000. Niveles Críticos de Suficiencia y Toxicidad de  $\text{NH}_3$  en el Extracto Celular de Pecíolos de Tomate de Cáscara. *Terra* 18(2): 141-145.
- Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp. Madrid, España.
- Costa, C., L.M. Dwyer, P. Dutilleul, D.W. Stewart, B.L. Ma., and D. Smith. 2001. Inter-relationships of applied nitrogen, spad and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. *J. Plant Nutr.* 24:1173-1194.
- Curran, P.J. 1989. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens. Environ.* Vol.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.
- Demetriades-Shah, T.H., M.D. Steven, and J.A. Clark. 1990. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 33:55-64.
- De Villa Roel y Alfaro Eroy 1997. *Manual internacional de fertilidad de suelos*. USA.
- Diccionario Real Academia Española. 2001. Vigésima segunda edición. Edición en CD-Rom. Versión 1.0.

- 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.
- Elvidge, C.D., and Z. Chen. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.
- Etchetvers B. 1988. Diagnostico de fertilidad del suelo. Centro de Edafología Chapingo, Mexico. pp 3966.
- FAO, 2005. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. 2005 Página electrónipa: <http://faostat.fao.org>
- Fernández, S., D. Vidal, E. Simón and L. Solé-Sugrañes . 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. RemoteSens.* 15:1867-1884.
- Gamón, J.A., J. Penuelas, and C.B. Field. 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* 41:35-44.
- Gates, D.M. 1980. Biophysical ecology. Springer-Verlag, New York.
- Gausman H. W., Allen W. A., Myers V. I. and Cardenas R.. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium birsutum* L. *Agronomy Journal*. Vol. 61: 374-376.
- Gitelson, A.A., and M.N. Merzlyak. 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18:2691-2697.
- Gitelson, A. A., U. Gritz, and M. N. Merzlyak. 2003a. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiology*, 160, 271-282.
- 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 Letters*.
- Glassner, A. 1995. Principles of digital image synthesis. Morgan Kaufmann, San Francisco, USA.
- González A.F. et al., 1990. Influencia de la información contenida en imágenes de satélite sobre la precisión de la estimación de superficie cultivada de cereal en una zona piloto de la comunidad autónoma de Navarra. Madrid, España.
- Gutiérrez-Rodríguez M., J. Alberto Escalante-Estrada, M. Teresa Rodríguez-González y Matthew P. Reynolds. 2004. Índices de reflectancia y rendimiento del frijol con aplicaciones de nitrógeno. *TERRA*. 22:4 409-416.

- Horler, D.N.H., M. Dockray, J. Barber, and A.R. Barringer 1983b. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. *Adv. Space Res.* 3:273-277.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F., 1985, Spectral Response of a Plant Canopy with Different Soil Backgrounds, *Remote Sens. Environ.* 17: 37-53.
- Jackson, R.D., Piater, P.N., and P.J. Pinter. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sens. Environ.* 13:187-208.
- Jago, R.A., M.E.J. Cutler, and P.J. Curran. 1999. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. *Remote Sens. Environ.* 68:217-224.
- 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"*. CRC Press. Florida, U.S.A.
- Kauth, R.J., and G.S. Thomas. 1976. The tasseled cap-A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*: 41-51.
- Lawlor, D. W. 1993. *Photosynthesis: molecular, physiological and environmental processes*. Longman Scientific and Technical. Hong Kong. 318 pp.
- Lillesand, T. and R.W. Kiefer, 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0471305758.
- Madakadze, I.C. y Madakadze, R.M. 1999. Field evaluation of the chlorophyll meter to predict yield and nitrogen concentration of switchgrass. *J. Plant Nutr.* Vol. 22: 1001-1010
- 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", la. Cd-, 594 pp.
- Martin, A.E. 1957. Difference and derivative spectra. *Nature* 180:231-233.
- Martínez-Cañadas, M.A., F. Martínez-Sánchez, J. Vera y C. F. Alcaraz. 1985. Sistemática de muestreo foliar en plantas de pimiento dulce cultivadas en invernadero bajo riego localizado. II. Influencia de la posición de la hoja en la planta sobre la composición mineral. *Anales de Edafología y Agrobiología* 44:513-527.
- Marshner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. Londres Inglaterra. 674 pp.

- Mengel, K. y E. A. Kikby. 1987. Principles of Plant Nutrition. 4th Edition. International Potash Institute. Switzerland.
- Mills, H. A. y J. Benton J. 1996. Plant Analysis Handbook II. Micro-Macro Publishing, Inc. Georgia U.S.A.
- Minotti PL, Halseth DE, Sieczka JB. 1994. Field chlorophyll measurements to assess the nitrogen status of potato varieties. Hort Science 29 (12): 1497-1500.
- Monje, O., and B. Bugbee. 1992. Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: a comparison of two types of meters. HortScience 27:69-71.
- 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.
- Munson, R. 1998. Principles of Plant Analysis, pp. 1-24 In: Kalra: Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press. U.S.A.
- Namesny A. V. 1996. El pimiento en el mundo. En: Compendios de horticultura. Pimientos. Namesny A. V. (ed). Ed. Horticultura S. L. Reus, España. pp. 13-20.
- Nieuwenhuis, G.. 1986. Thermography: Principles on Application in the Oost-Gelderland Remote Sensing Study Project. ITC Journal 19861-1, pp 51-57.
- Nuez V. F., O. Gil R. y J. Costa G. 1996. El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ed. Mundi Prensa. España. 607 p.
- Osborne, S.L., J.S. Schepers, D.D. Francis, and M.R. Schlemmer. 2002. Use of spectral radiance to estimate in-season biomass and grain yield in nitrogen- and water-stressed corn. Crop Sci. 42:165-171.
- Otterman, J., T. Brakke, and J. Smith. 1995. Effects of leaf transmittance versus leaf reflectance on bi-directional scattering from canopy/soil surface: an analytical study. Remote Sens. Environ. 54:4960.
- 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.
- Payero, J.O., M.S. Bhangoo and J.J. Steiner. 1990. Nitrogen fertilizer management practices to enhance seed production by 'Anaheim chili' peppers. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 115:245-251.
- Peñuelas, J., J.A. Gamon, A.L. Fredeen, 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.

- Piekielek WP, Fox RH, Toth JD, Macneal KE. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal* 87: 403-408.
- Piggott, T. J. 1988. Vegetable crops. pp: 148-187. In: D.J. Reuter and J.B. Robinson (eds.). *Plant analysis, an interpretation manual*. Inkata Press, Melbourne, Australia.
- Pinter, P.J., G. Zipoli, G. Maracchi, and R.J. Reginato. 1987. Influence of topography and sensor view angles on NIR:Red ratio and greenness vegetation indices of wheat. *Int. J. Remote Sens.* 8:953-957.
- 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.
- Pulido, M.L., et al. 1999. Identificación de la salinidad del suelo con imágenes de satélite Landsat TM y un sensor electromagnético en el Distrito de Riego 075 Río fuerte, Sin. *Memorias de la X reunión Nacional de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota y Sistemas de información Espacial (SELPER)*, Guanajuato, Gto. 11 y 12 de Noviembre de 1999.
- Pulido M.L et al 2000. Estimación del área cultivada en el distrito de Riego 038 Río Mayo, a través de imágenes de satélite. *Memorias del X Congreso Nacional de Irrigación*. Chihuahua, Chih. Del 16 al 18 de Agosto del 2000.
- Ram K. Gupta and Joseph T. Woolley. 1971. Spectral properties of soybean leaves. *Agronomy Journal*. Vol. 63: 123-126.
- Ramírez, F. 2000. Manejo nutricional y fertilización balanceada en el cultivo de pprika. *Manejo del cultivo de pprika*. Arequipa.
- Reeves DW, Mask PL, Wood CW, Delaney DP. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a hand held chlorophyll meter: influence of management practices. *Journal of Plant Nutrition* 16(5): 781-796.
- Rico A. J. 1983. Cultivo del pimiento de carne gruesa en invernadero. *Publicaciones de Extensin Agraria*. Madrid, Espana. 268 p.
- Ritchie, L. G. 2003. Use of ground-based canopy reflectance to determine ground cover, nitrogen and water status and final yield in wheat. *Utah State University*. UTAH. USA.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. y Verma S. 1983. *Microclimate the Biological Environment*. John Wiley Sons. New York. E.U.A. 495 pp.
- Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell and D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP- vol. 1: 309-317*. NASA, Washington, D.C.

- Sabins, F.F. JR. 1986. Remote sensing. Principles and interpretation. New York, Freeman y Co.
- Sakthivadiel, R. et al., 1997. Performance Evaluation of Bhakra Irrigation System, India using remote System and GIS techniques. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lonka.
- Sakthivadiel, R. and Thiruvengadachari, S. et al., 1999. Satellite remote sensing for assessing of irrigation system performance: a case study in India. International Water Management Institute. Cobmbo, Sri Lanka.
- Salisbury, B. F. Y C. W. Ross. 1994. *Fisología Vegetal*. Grupo Editorial Interamericana. México D. F. 759 pp.
- Savitzky, A., and M.J.E. Golay. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem.* 36:1627-1 639.
- SIAP-SAGARPA. 2005. Anuario Estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Pagina electrónica. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>
- Sims, D.A. and J.A. Gamón. 2002. Relationships 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 Ruiz Jesús. 1999. Determinación de sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) a través de sensores remotos. Tesis, CP, México.
- Stroehlein J. L. and N. F. Oebker. 1979. Effects of nitrogen and phosphorus en yields and tissue analysis of chili peppers. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10:551-563.
- Taiz L. and Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. 2a. ed. Sinauer Associates Sunderland, MA. The Benjamín/Cummings Company. Inc. California. USA.
- Takebe M, Yoneyama T. 1989. Measurements of leaf color scores and its implication to nitrogen nutrition of rice plants. *Japan Agric Res Q* 23: 86-93.
- Thomas J. R. and Oerther G. F..1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal*. Vol. 64: 11-13.
- Tucker, C.J.1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, v. 8, p.127-150.
- UNESCO, 1994. Information on Meteorological and Hotter Environmental Satellites. WMO #41, 3a Edition. Geneva.
- Velasco P. L. A. 2002. Evaluación de la rentabilidad y de la ventaja comparativa del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de fertirrigación en el estado de Guanajuato P/N 2001 y sus perspectivas de mercado. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. México. 110 p.

Wood CW, Tracy PW, Reeves DW, Edmisten KL. 1992. Determination of cotton nitrogen status with a hand held chlorophyll meter. *Journal of Plant Nutrition* 15(9): 1435-1448.

Woodley, J. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiology* 47: 656-662.

<http://www.fcagr.unr.edu.ar/catedras/mdt/GTS/zzonaedu/perremot11.htm> (febrero, 2006).

[http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html) (febrero, 2006)