



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**“Niveles nutricionales, color y reflectancia espectral de las hojas de los árboles en huertas de aguacate (*Persea americana*) en Michoacán.”**

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA

ELOY RUBICEL PAT LÓPEZ

DIRECTOR

DRA. MAYRA ELENA GAVITO PARDO

ASESORES

M.E. PATRICIA FRAGOSO SERVÓN

M.C.A. ALBERTO PEREIRA CORONA

M.G. GABRIELA CUEVAS GARCÍA

M.C. BENITO PREZAS HERNÁNDEZ



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2015



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DEL  
PROGRAMA DE LICENCIATURA Y APROBADA COMO REQUISITO  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIADO EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

COMITÉ DE TESIS



DIRECTOR:

*Mayra Elena Gavito Pardo*  
DRA. MAYRA ELENA GAVITO PARDO

ASESOR:

*Patricia Fragoso*  
M.E. PATRICIA FRAGOSO SERVÓN

ASESOR:

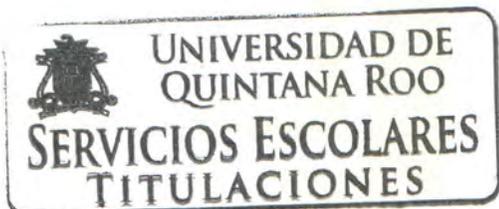
*Gabriela Cuevas*  
M.G. GABRIELA CUEVAS GARCÍA

ASESOR:

*Benito Prezas*  
M.C. BENITO PREZAS HERNÁNDEZ

ASESOR:

*Alberto Pereira*  
M.C.A. ALBERTO PEREIRA CORONA



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, ENERO DE 2015.

## **RECONOCIMIENTOS**

Muy en especial a mi directora de tesis, la Dra. Mayra E. Gavito Pardo, por el apoyo que me brindo, pero más por la paciencia y el tiempo que me dedico en las múltiples revisiones y correcciones a este trabajo, ya que sin ello no hubiera sido posible su elaboración y conclusión, gracias por ser mi asesora.

A la M.E. Patricia Fragoso Servón, a la M.G. Gabriela Cuevas García, al M.C.A. Alberto Pereira Corona y al M.C. Benito Prezas Hernández por su interés, comentarios y revisiones en este trabajo. Gracias por formar parte de mi comité de trabajo.

También agradezco a la Dra. Marta Astier Calderón por el apoyo que me brindo para concluir este trabajo.

Al M.C. Yair Merlín Uribe por su ayuda en campo, por los consejos que me brindo en este trabajo y sobre todo por su colaboración en la elaboración de la guía de colores, así como de su amistad incondicional.

A la Biol. Laura Villamil Echeverri de igual manera por su ayuda en campo.

A la IBT. Cruz Teresa Arredondo Torres por su ayuda en el procesamiento de muestras, así como de las facilidades que me brindo para el uso del laboratorio y el equipo.

A la M. C. Silvia Margarita Carrillo Saucedo por sus consejos y ayuda que me brindo en este trabajo.

Así mismo al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM TB100412-RR190412 "Métodos de monitoreo participativo de indicadores de impacto ambiental del cultivo de aguacate a escala parcela y regional".

A la fundación PRODUCE Michoacán y COFUPRO.

## AGRADECIMIENTOS

Dedico y agradezco este logro especialmente a mis padres Elsa y Juan por darme formación y apoyo en todos los aspectos, pero sobre todo por creer y estar junto a mí en todo momento. A mi hermana Otilia y a mi cuñado Juan Carlos por el apoyo, los regaños y consejos que me brindaron para para luchar y continuar en esta travesía.

A la Dra. Mayra Gavito por todas las oportunidades que me brindo, por permitirme crecer en base a sus conocimientos y su preocupación por que el trabajo quedara de la mejor manera.

A Yola y Fany (las cochass) mis dos grandes amigas y cómplices de tantas ocurrencias y risas. A Margarita Carillo por esa amistad tan bonita que me brindo y por supuesto sus postres. A Ricardo Leyva y Ana Lidia con quien conviví en campo, en laboratorio y por esas pláticas tan ocurrentes y motivarme a terminar. A Maribel Nava por su amistad y consejos. A Lilla por su sincera amistad. A Felipe Arreola por abrirnos las puertas de su laboratorio, sobre todo para tomarnos el café. A Donovan y José Hernández por permitirme ser parte de sus amigos. Yair Merlín, gracias hermano por todo lo que compartimos en campo y fuera del trabajo, todos esos consejos, aventuras, apoyo y amistad incondicional.

A mis amigos del CRyA, especialmente a Luis Lomelí y Jairo Alzate, que se convirtieron en mis dos grandes hermanos apoyándome y convirtiéndose en cómplices de tantas anécdotas, a Alex, Luis Ángel, el Oscuro, Alba.

A mi tía Beatriz Rivera y sus hijos Soyuki, Abiu, Egai.

A mis amigos de la carrera, Hermes con quien congenie desde el primer semestre y se convirtió en un gran hermano, Jonathan y Tania por ser siempre tan ocurrentes y brindarme su amistad en todo momento.

A la familia Cáhuil Lara por su amistad, consejos y por acogerme como a un hijo más en su familia. A mis amigos de trabajo y de la vida Jorge Luis Rodríguez García y Elías Yah Canche por todas las anécdotas y aventuras vividas.

## INDICE

INDICE DE TABLAS .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	VIII
RESUMEN .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
2.1 Suelo y factores ambientales en el cultivo de aguacate .....	5
2.2 Requerimientos nutricionales, disponibilidad de nutrientes y fertilidad .....	6
2.3 Fertilizantes aplicados en el cultivo de aguacate .....	7
2.4 Exceso de fertilizantes .....	10
2.5 Importancia y características de las deficiencias de N y P .....	10
2.6 Reflectancia y contenido de nutrientes (N y P) en las plantas .....	11
2.7 Manejo de la fertilización (nutrición) en las huertas aguacateras .....	14
2.8 Fertilización del suelo y niveles nutricionales en las hojas .....	15
2.9 Sistemas de cultivo orgánico y convencional .....	16
3. PROBLEMÁTICA .....	18
4. JUSTIFICACIÓN .....	19
5. OBJETIVOS .....	20
General .....	20
Específicos .....	20
Hipótesis .....	20
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
6.1. Área de estudio .....	21
6.2 Geología y litología .....	21
6.3 Edafología y geomorfología. ....	21
6.4 Hidrología .....	22
6.5 Altura, Clima y temperatura .....	22
6.6 Precipitación y humedad relativa .....	23
6.7 Heladas y granizadas .....	23
6.8 Contexto ecológico .....	24
6.9 Contexto socioeconómico .....	24

7. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25
8. DISEÑO DEL MUESTREO .....	25
8.1 Selección de huertas y arboles.....	25
8.2 Selección de hojas .....	29
8.3 Época de muestreo.....	29
8.4 Localización de las hojas .....	29
8.5 Medición del índice de verdor (NDVI) y escaneo de las hojas. ....	30
8.6 Transporte, descontaminación y molienda de las muestras .....	30
8.7 Determinación de N y P en material vegetal .....	30
8.8 Análisis estadístico .....	31
9. RESULTADOS .....	32
9.1 Categorización de concentraciones de N y P medidos en hojas en base a los rangos establecidos y re-categorización de los rangos propuestos. ....	32
9.2 Relación entre los niveles medidos de Nitrógeno y Fósforo y las cantidades de fertilizantes aplicadas.....	36
9.3 Relaciones del NDVI con el N y P total medido y aplicado en las hojas de aguacate .....	37
9.4 Relaciones de las bandas de color con el N y P total medidos en las hojas de aguacate. ....	38
9.5 Estructuración de la guía de color para verificar visualmente el nivel de N en las hojas de aguacate.....	40
10. DISCUSIÓN.....	41
11. CONCLUSIÓN .....	45
12. REFERENCIAS.....	47
13. ANEXO .....	57

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fertilizantes químicos usados en las huertas de aguacate Hass (Fuente: Salazar-García, 2002 y Tapia 2009).....	9
Tabla 2. Nutrientes y dosis recomendadas para un rendimiento de 250 a 350 Kg/árbol. 15	
Tabla 3. Fertilización de aguacate sugerida anualmente para una producción de 10 ton/ ..	15
Tabla 4. Rangos de concentración de N y P establecidos por Maldonado <i>et al.</i> (2007), para la franja aguacatera de Michoacán. ....	17
Tabla 5. Ubicación de las huertas muestreadas dentro de la franja aguacatera de Michoacán. ....	25
Tabla 6. Características de edad máxima de la plantación, tipo de manejo y la fertilización en las huertas de estudio. ....	27
Tabla 7. Re-categorización de rangos e intervalos de niveles de N (a) y rangos e intervalos de P (b) en las hojas. ....	34
Tabla 8. Promedios de componentes de color RGB, porcentaje de nitrógeno foliar y componentes de color CMYK. ....	40

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa en la que se aprecian los puntos de muestreo georeferenciados y marcados con banderas azules se encuentran entre Uruapan, Taretan, Ario de Rosales y Tingambato.. .....	26
Figura 2. Diseño del muestreo.....	29
Figura 3. Situación de la hoja.....	29
Figura 4. Distribución de la muestra de hojas de acuerdo a los niveles de concentración de N (a) y P (b) establecidos por Maldonado <i>et al.</i> (2007) para la zona de Michoacán. ....	32
Figura 5. Distribución de la muestra de hojas en base a las nuevas categorías de niveles de concentración de N propuestas.....	34
Figura 6. Distribución de la muestra de hojas agrupadas por tipo de manejo en base a las categorías propuestas de N (a) y P (b)......	35
Figura 7. Relaciones entre el N medido en hojas y el N aplicado como fertilizante (a) y el P medido en hojas y el P aplicado como fertilizante (b) en las hojas muestreadas. ....	36
Figura 8. Relaciones de NDVI entre Nt medido (a), N aplicado (b) y NDVI entre Pt medido (c), P aplicado (d). ....	37
Figura 9 Relaciones entre las bandas de color R, G y B y el Nt medido (figuras a, b y c) y el Pt medido (figuras d, e y f) en las hojas. ....	39

## RESUMEN

La gran extensión e importancia socioeconómica del sistema aguacatero y la problemática ambiental que se genera por el uso excesivo de fertilizantes, hacen necesario establecer herramientas que permitan a los productores identificar y diagnosticar la eficiencia de la fertilización de este frutal sin costo. Por ello el objetivo de este trabajo fue determinar la eficiencia de la fertilización mediante parámetros medidos en las hojas y crear una guía colorimétrica para las hojas de aguacate que sirva de apoyo a los productores en el diagnóstico visual de los niveles nutricionales. Esto se llevó a cabo relacionando los contenidos totales de nitrógeno y fósforo medidos en las hojas con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y la cuantificación del color (R, G, y B) y, para establecer una escala de color que permita diagnosticar visualmente los niveles nutricionales.

Se muestrearon las hojas en ocho huertas aguacateras bajo distintos tipos de manejo en Michoacán para determinar el color que tienen las hojas con contenidos deficientes, adecuados y excesivos de nitrógeno y fósforo. Los valores de nitrógeno y los colores se obtuvieron del análisis de 240 muestras de hojas provenientes de seis árboles de cada huerta.

Los análisis químicos de las hojas mostraron una buena relación del nitrógeno con el color de las hojas pero no en el caso del fósforo, porque todas las hojas tuvieron valores excesivos de P. También se observó que los niveles de N se relacionaron con los componentes rojo y verde del color pero no con el azul, mientras que los niveles de P no tuvieron relación con ningún componente del color. Tampoco hubo relación entre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y el N o el P medidos en las hojas. Los contenidos nutricionales difirieron entre las huertas que no habían sido fertilizadas por varios años y las huertas convencionales y orgánicas pero estas últimas mostraron valores muy similares. La relación de los valores de fertilizante aplicado y los niveles nutricionales medidos en las hojas reveló que los niveles óptimos de nitrógeno se alcanzaron con aplicaciones de 100 a 150 kg N ha<sup>-1</sup>, aunque algunas huertas aplicaron hasta 600 kg. En el caso del fósforo todas las aplicaciones eran innecesarias.

Por la falta de variación en los niveles de P, la guía de colores que se desarrolló funciona únicamente para verificar los niveles de nitrógeno de las hojas. Los resultados confirmaron que la fertilización en las huertas con frecuencia es excesiva y que se puede utilizar el color de las hojas para verificar al menos tres niveles: deficiente, óptimo y excesivo. De esta manera, a través del uso de la guía se promoverá el ahorro de fertilizantes para aplicar solo lo necesario y el uso racional de ellos reduciendo la lixiviación y la contaminación de los cuerpos de agua.

## 1. INTRODUCCIÓN

En México se distribuye una gran cantidad de variedades de aguacate (*Persea americana*), que pertenece a la familia de las Lauráceas, dentro de las cuales la de mayor importancia comercial es la variedad Hass. Se ha confirmado que a inicios del México precolombino este fruto ya era conocido, así mismo ya se aplicaba un manejo que se centraba en la obtención de frutos de mayor tamaño y de semillas (Sánchez, 2002). De acuerdo con Smith (1996), este fruto se consumía hace 7000 u 8000 años en Coaxcatlán, Puebla, donde ya contaban con experiencia acerca del aguacate y de su razas principales: aoácatl, quilaoácatl y tlacacoloácatl lo que equivale a las razas mexicana, guatemalteca y la antillana (Sánchez, 2002).

El aguacate es el principal cultivo del estado de Michoacán y tiene gran importancia nacional, ya que México es el principal productor a nivel mundial, con una extensión de más de 134,322 hectáreas (Secretaría de Economía, 2012) y el estado de Michoacán tiene una extensión de más de 90,000 hectáreas (Aguilar, 2009; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). En el 2009 México participó con el 27% de la superficie total mundial sembrada y fue el mayor exportador del mundo contribuyendo con un 40% (Secretaría de Economía, 2012). En años más recientes la producción rebasa un millón trescientas mil toneladas, lo que representa el 36.5% de la producción mundial y el 74% del total de la superficie nacional (INIFAP, 2012). El estado de Michoacán sobresale a nivel mundial por ser la principal región productora y exportadora de aguacate (INIFAP, 2012).

La franja aguacatera se encuentra dentro del Sistema Volcánico Transversal y se extiende sobre la latitud 20° atravesando el centro de México, desde el Pacífico hasta el Golfo de México (Ramírez-Ramírez, 2001). Desde la década de los setentas y ochentas del siglo pasado la franja aguacatera se expandió aceleradamente por lo favorables que son los suelos y el clima, así como por el intervalo altitudinal, la exposición del sol, la pendiente y la dirección del viento (INIFAP, 2012). Estos permiten el buen desarrollo de la planta e inclusive la obtención de fruto en casi todo el año debido al traslape de las diferentes fases fenológicas del árbol (INIFAP, 2012). Todas estas características impulsaron, además, que

el aguacate criollo fuera sustituido por el aguacate Hass, el cual tuvo una gran aceptación en el mercado y las áreas de cultivo se fueron expandiendo (Alcántar, 1999).

Las primeras plantaciones de aguacate se establecieron principalmente en áreas de agricultura de temporal, sin embargo la expansión más reciente de la superficie cultivada ha sido a costa del uso del suelo de áreas forestales y de pastizal-matorral (Bravo-Espinosa *et al.* 2012; INIFAP, 2012; Morales-Manilla *et al.*, 2012). De acuerdo con el INIFAP (2009), entre 1976 y 2005 la superficie cultivada con este frutal se incrementó en un 94% y en la actualidad se estima que en Michoacán tiene un crecimiento anual del 4.5% (González-Gervasio, 2011). De esta manera el sistema aguacatero ejerce presión para el cambio de uso del suelo forestal hacia la producción de aguacate. Sin embargo, el bosque tiene un papel fundamental en el balance hídrico a nivel de cuenca, el suministro de agua para diversos usos a 50 municipios aledaños a la franja aguacatera de Michoacán, etc. (INIFAP, 2009).

Además de esto, las actividades que se llevan a cabo para la producción del aguacate están generando problemas ambientales entre los que se encuentran la degradación de los suelos, el uso ineficiente del agua y energía, la emisión de gases de efecto invernadero, la contaminación del suelo y del agua subterránea, así como una fuerte presión sobre las zonas de importancia forestal y su biodiversidad por el cambio de uso de suelo a sistemas de monocultivo (Bravo-Espinosa *et al.* 2012; Gavito *et al.*, 2012; Astier *et al.*, 2014).

El impacto que se puede generar por el cultivo de aguacate depende del tipo de labores culturales y manejo que se llevan a cabo dentro de las huertas, que van desde los más orgánicos hasta los más dependientes de agroquímicos sintéticos (convencionales) (Gavito *et al.*, 2010). Al expandirse los huertos de aguacate en los 60's, no existían normas ambientales que regularan el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola y que frenaran o controlaran la expansión hacia las zonas de importancia forestal (INIFAP, 2012). La expansión de los huertos de aguacate no contempló los requerimientos de las plantas, lo que provocó que muchos de estos huertos se situaran en sitios donde las condiciones climáticas-edáficas no son las adecuadas para satisfacer sus necesidades fisiológicas (Alcántar, 1999; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). Es importante mencionar que los suelos de la zona aguacatera en Michoacán son en general pobres en N, P y cationes, por lo que la adición de fertilizantes y estiércoles es una práctica muy común (Tapia *et al.*, 2011). De esta manera la

producción está muy relacionada con la nutrición y es por ello que el uso y las aplicaciones de químicos, abonos y compostas se hacen exageradamente (Molina, 2008).

Hay que reconocer algunos de los beneficios del cultivo de aguacate, como lo son el crecimiento económico y la generación de empleos en el estado michoacano, logrando altos niveles de competitividad en mercados internacionales y nuevas tecnologías para la transformación en productos de alto valor como el guacamole, congelados o el aceite para las industrias farmacéutica, cosmética y alimenticia (Coria, 2009). Algunos aspectos negativos del cultivo de aguacate son los conflictos agrarios y las comunidades locales arraigadas, ya que la intención de muchos productores es privatizar legalmente las tierras (INIFAP, 2009). El cultivo de aguacate ha afectado la cultura agrícola ya que ha ido sustituyendo el sistema agrícola de maíz, que se paga a un precio mucho más bajo y por ello se consume mayormente en las mismas comunidades que lo producen, mientras que una gran parte del aguacate producido es exportado o comercializado en otras regiones del país generando ingresos tanto en lugares lejanos como para los productores y las comunidades productoras (González-Esquivel et al., comunicación personal).

Debido a la importancia socioeconómica del sistema aguacatero y a la problemática ambiental que se genera por el uso excesivo de fertilizantes, es necesario establecer herramientas que permitan diagnosticar la eficiencia de la fertilización para la producción de este frutal. En países con buen apoyo institucional los productores utilizan las recomendaciones oficiales, los valores de referencia y los análisis químicos de los suelos y las hojas para calcular el nivel de fertilización requerido y verificar posteriormente en las hojas el resultado de la fertilización. Sin embargo, la mayoría de los productores de aguacate en Michoacán no cuenta con los conocimientos o con apoyo institucional de asesoría y es asesorado por personas que trabajan para las compañías de agroquímicos o que están asociados a ellas y que les sugieren comprar y aplicar cantidades excesivas de fertilizantes para “garantizar” la máxima producción. Aún con esta fuerte inversión, los productores raramente logran el rendimiento máximo y reconocen que hay otros factores que limitan la producción como la variabilidad climática y las plagas (González-Esquivel et al., comunicación personal). Los servicios de análisis químicos son muy caros y muchos

productores no tienen el conocimiento para interpretarlos y corregir las aplicaciones, por lo que casi no se usan.

Los agricultores han usado comúnmente el color de la hoja como un indicador visual y subjetivo, procurando mantener la intensidad del color verde de las hojas en sus cultivos (Singh *et al.*, 2011). Por su importancia, se han llevado a cabo muchas investigaciones con el propósito de estimar el contenido de nutrientes y bioquímicos en la vegetación (Demarez y Gastellu, 2000, Cui *et al.*, 2009; Rincon y Ligarreto, 2010) y de cuantificar el color de las hojas mediante la reflectancia espectral (Singh *et al.*, 2011). Se han desarrollado guías de color de las hojas para asistir a los productores haciendo una evaluación rápida y sin costo de los niveles nutricionales en las hojas, los cuales están fuertemente relacionados con la producción final, para cultivos tanto anuales como perennes (Ulrich y Fills 1969; Snowball y Robson 1991; Hozier y Bradley 1999; Futch y Tucker, 2000). Se han descrito diversos síntomas de deficiencia nutricional en el aguacate, entre ellos destacan la deficiencia de N, P y K, nutrientes de gran importancia que dan vigor y color verde a las hojas (Wesley y Wander, 1949). No obstante, no se ha desarrollado una guía de color para la variedad Hass, que se usa en casi toda la superficie cultivada.

Por ello el objetivo de este trabajo fue desarrollar las bases para crear un sistema que permita determinar visualmente la eficiencia de la fertilización mediante el color de las hojas y crear una guía colorimétrica para las hojas de aguacate que sirva de apoyo a los productores para verificar el resultado de sus métodos de fertilización. De esta manera se promoverá el ahorro de dinero en la compra de fertilizantes para aplicar solo lo necesario y el uso racional de ellos reduciendo la lixiviación y la contaminación de los cuerpos de agua. Esto se llevo a cabo relacionando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el color de las hojas y los contenidos totales de nitrógeno y fósforo, para establecer una escala de color que permitió diagnosticar las deficiencias y el exceso de estos elementos. De esta manera se promoverá el ahorro y la disminución en el uso excesivo de fertilizantes y por ende la contaminación ambiental generada.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Suelo y factores ambientales en el cultivo de aguacate

Los suelos en la franja aguacatera son de origen volcánico, dominando los Andosoles en la mayor parte de la superficie cultivada (89.8%), que son considerados como el suelo apto por su baja compactación, estructura granular, alta retención de humedad, abundante porosidad, alta aireación y temperatura muy estable. El resto corresponde a Luvisol (3.5%), Acrisol (3.2%), Phaeozem(1.4%), Leptosol(1.3%), Cambisol (0.7%) y Vertisol (0.1%). El pH óptimo es de 5 a 7. Dentro de estos tipos, los suelos no aptos para el cultivo son los Luvisoles, ya que su drenaje es deficiente y favorece la presencia de enfermedades (Gutiérrez-Contreras *et al.* 2010).

Medina (2007), menciona que de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, la franja aguacatera está influenciada por 14 subtipos de climas donde predominan los semicálidos (46.16%) y los templados (22.29%). En pequeñas áreas se cultiva en climas semifríos (8.79%) y cálidos (22.75%) lo cuales no son adecuados para el cultivo de aguacate por ser climas extremos y presentar riesgo de heladas en los semifríos y decrecimiento de la fruta o crecimiento vegetativo en los cálidos (Medina, 2007; Gutiérrez-Contreras *et al.* 2010).

La mayor superficie plantada tiene precipitaciones de 1000 a 1500 mm anuales (Medina, 2007; Gutiérrez-Contreras *et al.* 2010). La superficie donde se encuentra establecido el cultivo (87.1%) presenta temperaturas promedio anuales de 18-20°C, considerados como las óptimas para este frutal (Gutiérrez-Contreras *et al.* 2010).

La franja aguacatera se localiza en altitudes de 1200 a 2350 msnm con una pendiente que varía de 5 hasta un 50%, lo cual aunado al tipo de suelo puede favorecer la erosión. Las condiciones óptimas para un cultivo de aguacate son climas semicálidos-templados con altitudes de 1500 a 2200 msnm, suelos tipo Andosoles con pendientes menores de 12% hacia cualquier orientación menos al norte (Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). La variedad Hass requiere temperaturas en un rango mínimo de entre 12-17 °C y un máximo de 28-33 °C, pero el mayor amarre de fruto ocurre con temperaturas de 20 y 25 °C. En referencia a la

humedad óptima que requiere el árbol debe ser una humedad ambiental que no supere el 60% (Coria, 2009), es decir, la humedad relativa debe ser alta y con alta insolación (APROAM, 2005).

Medina (2007), señala que el cultivo puede producir altos y medios rendimientos entre 4 y 6 ton/ha, prácticamente sin riego y sin fertilización, siempre y cuando las condiciones agroclimáticas donde el cultivo este establecido sean las ideales.

Es muy común encontrar en los suelos de la franja aguacatera de Michoacán cantidades inadecuadas o formas no asimilables de uno o más elementos nutritivos necesarios para el desarrollo de la planta (Medina, 2007).

## **2.2 Requerimientos nutricionales, disponibilidad de nutrientes y fertilidad**

A pesar del bajo potencial agrícola que presenta el Eje Neovolcánico de Michoacán; el origen volcánico de los suelos, la tasa de infiltración y la ausencia de salinidad los hacen perfectos para la producción frutícola (Tapia *et al.* 2012).

La calidad de los suelos está definida por sus propiedades químicas, físicas y biológicas, la materia orgánica es un buen indicador para determinar su calidad agrícola, ya que permite mantener y recuperar su fertilidad de diferentes maneras: proporcionando nutrientes a la plantas, modificando las condiciones físicas del suelo, aumentando la actividad microbiana para el aporte de energía y protegiendo el cultivo del exceso de sales minerales o sustancias tóxicas (APROAM, 2005).

De esta manera el nitrógeno es considerado el principal elemento mineral usado en la fertilización agrícola y un factor importante ligado al rendimiento, y por lo tanto al incremento de la producción en los últimos años y al uso excesivo de fertilizantes. Sin la aplicación de estos el rendimiento de las variedades o cultivos mejorados sería inferior al de las criollas. Sin embargo, su aplicación genera riesgos de contaminación ambiental, por la lixiviación de nutrientes no aprovechados hacia las aguas subterráneas, así como la degradación del suelo por salinidad y un incremento en los costos de producción (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Es así como los sistemas de producción agrícola dependen en gran medida del suministro externo en forma de sales, fertilizantes minerales y productos orgánicos. En el caso de los árboles de aguacate, Bisoño-Pérez (2008) indica que los requerimientos nutricionales pueden variar durante su desarrollo, por influencia de la edad, fenología y la variedad del árbol, sin embargo se dice que es un árbol de baja demanda de nutrientes. Por ello es necesario dar a conocer las funciones del N en las plantas y su disponibilidad de manera natural, la problemática que lleva al uso de fertilizantes y los estudios para el diagnóstico de los niveles de nutrientes para determinar los aportes necesarios para el desarrollo óptimo de los cultivos (Cárdenas-Navarro *et al.*, 2004).

Bárcenas *et al.* (2003), afirman que las flores tienen altos requerimientos de N y concluyen que durante la floración y el desarrollo vegetativo el cultivo requiere de cantidades altas de este macronutriente, aunque la concentración puede variar entre las hojas y los frutos, ya que la hoja es un órgano muy dinámico, en el que la concentración de nutrientes está cambiando constantemente por diversos factores. Los suelos agrícolas son menos fértiles a medida que disminuye su nivel de materia orgánica y hay altas tasas de extracción de nutrientes por parte del cultivo y lavado de nutrientes por las precipitaciones. La pérdida de fertilidad del suelo puede ser restituida adicionando materia orgánica derivada de plantas o animales (APROAM, 2005).

Bárcenas *et al.* (2003), también señalan que la fertilización en el cultivo de aguacate es determinante para obtener buenos rendimientos y que para elaborar los programas de nutrición estos se deben basar en análisis de suelo y foliares que permitan determinar la cantidad y el tipo de fertilizante que requieren las plantas. Así mismo es importante conocer el momento en que la planta demande más de cada uno de los elementos nutritivos.

### **2.3 Fertilizantes aplicados en el cultivo de aguacate**

De acuerdo con Salazar-García (2002) y Tapia (2009a; 2009b), en las huertas de aguacate se suministran los nutrimentos en forma de fertilizantes sintéticos (Tabla 1) o como abonos orgánicos y su aplicación puede estar determinada por la disponibilidad, el precio y la facilidad de transporte, así como por su forma de aplicación. Entre los fertilizantes orgánicos más usados está la aplicación de estiércol de ave (gallinaza), bovino, porcino o

caprino, residuos de la cosechas, rastrojos, caña de maíz, ceniza de caña, harina de roca, fermento de frutas, cal y compostas mezcladas con guano, harina de pescado, tripas de pollo, harina de alfalfa, materia orgánica enriquecida con humus de lombriz, etc. (Quintero-Sánchez, 2002).

Tabla 1 Fertilizantes químicos usados en las huertas de aguacate Hass (Fuente: Salazar-García, 2002 y Tapia 2009)

<b>Elemento</b>	<b>Principales formulaciones de nutrientes minerales que se aplican al cultivo de aguacate</b>
<b>Magnesio</b>	Sulfato de magnesio (Kieserita), sulfato de magnesio heptahidratado (Sales Epson), carbonato de magnesio, óxido de magnesio (Magnesita calcinada), cal dolomita y sulfato de potasio y manganeso (SulPoMag).
<b>Potasio</b>	Cloruro de potasio, sulfato de potasio, nitrato de potasio, nitrato de potasio y sodio y sulfato de potasio y magnesio (SulPoMag).
<b>Fósforo</b>	Ácido fosfórico, super fosfato de calcio simple (SSP), super fosfato de calcio triple (TSP), fosfato mono amónico (MAP), fosfato diamónico (DAP), roca fosfórica (fluor-apatita), fosfato monopotásico y fosfato dipotásico.
<b>Nitrógeno</b>	Amoníaco anhidrido, aquaamonia, urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, nitrato de amonio con carbonato de calcio o magnesio y solución de urea y nitrato de amonio.
<b>Calcio</b>	Nitrato de calcio, carbonato de calcio, cal hidratada (Hidróxido de calcio), sulfato de calcio y cal dolomita
<b>Azufre</b>	Azufre elemental, bentonita azufrada, tiosulfato de amonio (ATS), polisulfato de amonio, urea-ácido sulfúrico, sulfato de amonio, sulfato doble de potasio y magnesio, sulfato de potasio, tiosulfato de potasio (KTS), polisulfuros de potasio y yeso agrícola.
<b>Hierro</b>	Sulfato de hierro (II y III), oxisulfato de hierro y quelatos de hierro.
<b>Cobre</b>	Sulfato de cobre (II), oxiclorigenato de cobre y quelatos de cobre.
<b>Manganeso</b>	Sulfato de manganeso, oxisulfato de manganeso y quelatos de manganeso.
<b>Zinc</b>	Sulfato de zinc, oxisulfato de zinc, quelatos de zinc y fosfato de zinc.
<b>Boro</b>	Solubor, tetraborato de sodio decahidratado (bórax), ácido bórico y colemita.

## 2.4 Exceso de fertilizantes

Los agricultores aplican intensivamente, y con frecuencia en cantidades excesivas, fertilizantes con nitrógeno y fósforo, puesto que son los principales nutrientes para el crecimiento de las plantas. Cuando la aplicación de estos fertilizantes excede la demanda de las plantas y la capacidad de nitrificación del suelo, los nitratos y los fosfatos no aprovechados por el cultivo pueden contribuir potencialmente a la contaminación del suelo y de las aguas superficiales mediante la lixiviación y elevando las concentraciones en las aguas subterráneas por encima del nivel permitido de  $50 \text{ mg L}^{-1}$  (Sturm *et al.*, 2010; Rong y Xuefeng, 2011). De esta manera la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  a la atmósfera ha aumentado una tasa de  $0.073 \pm 0.03 \text{ ppb}$  durante las últimas tres décadas, donde la agricultura aporta de 1.7 a  $4.8 \text{ TgN (N}_2\text{O) yr}^{-1}$  debido a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Ciais *et al.*, 2013).

Las prácticas de manejo son muy variadas entre las huertas y la fertilización inadecuada (en cantidad o tipo de fertilizante) es una de las fuentes principales de contaminación (Gavito *et al.*, 2011). Lovatt (1999) y Sturm *et al.*, (2010) proponen que una manera de reducir el uso de fertilizantes es mediante el control de las aplicaciones, ya que se ha afirmado que la producción no está tan relacionada con las cantidades de fertilizantes aplicadas sino con el tiempo correcto de aplicación.

## 2.5 Importancia y características de las deficiencias de N y P

Gasga (2011), menciona que el nitrógeno es constituyente de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos, encontrándose en coenzimas, nucleótidos, amidas, ureidos y en la molécula de clorofila y participa en todas las reacciones enzimáticas y en todo el metabolismo de las plantas.

El N es un elemento necesario para la síntesis de clorofila y la carencia de éste limita que la planta utilice la luz solar como fuente de energía en el proceso de la fotosíntesis y la planta reduce la habilidad de ejecutar funciones esenciales como la absorción de nutrimentos. El fósforo es vital para el desarrollo inicial y el nitrógeno influye en la absorción de este elemento, de esta manera se encuentra más disponible cuando se aplica con nitrógeno (Gasga, 2011).

Se han descrito diversos síntomas de deficiencia nutricional en el aguacate, entre ellos destacan la deficiencia de N, P y K, nutrientes de gran importancia que dan vigor y color verde a las hojas (Wesley y Wander, 1949). Hass (1939), realizó un estudio bajo condiciones de invernadero con diversos factores nutricionales con el fin de caracterizar los problemas que presenta el cultivo de aguacate y que pueda servir como apoyo para un diagnóstico nutricional.

Algunas de las principales deficiencias de N y P en plantas de aguacate han sido descritas por Lahav y Kadman (1980) y Lovatt (1999):

**Deficiencia de Nitrógeno:** La falta de nitrógeno en las hojas se expresa como crecimiento restringido, hojas pálidas, desarrollo limitado y desprendimiento temprano de la hoja. En casos graves las venas se vuelven amarillas.

**Deficiencia de Fósforo:** las hojas se caracterizan por presentar marcas o cicatrices semejantes a las quemaduras en grandes porciones de la hoja, tornándose entre un color marrón-verde, las hojas más viejas son las primeras en ser afectadas y las hojas nuevas tienen un desarrollo lento donde las hojas son pequeñas y redondas e inclusive puede haber muerte de ramas.

De acuerdo con Gasga (2011), la deficiencia limita la división y expansión celular, y el desarrollo de los cloroplastos, por lo que se producen plantas débiles y enanas, con crecimiento lento que maduran precozmente, con rendimiento y calidad significativamente bajos. Los síntomas iniciales y más severos se ven en las hojas más antiguas, donde las proteínas se hidrolizan y el N es translocado como aminoácido de los tejidos viejos a las partes en crecimiento activo de la planta.

## **2.6 Reflectancia y contenido de nutrientes (N y P) en las plantas**

La luz emitida por el sol ilumina la superficie terrestre y esta la refleja en función de la cubierta que exista, ese reflejo es captado por un sensor que mide y lo digitaliza y posteriormente transmite a las estaciones receptoras. Entre el sensor y la cubierta terrestre se encuentra la atmosfera, que dispersa y absorbe la señal original, donde la respuesta espectral puede ser diferente. Es así como la reflectividad espectral no es más que la

composición espectral del flujo radiante que transmite la superficie terrestre y que proporciona información sobre características biológicas, químicas y físicas del suelo y también de la vegetación (Davenport *et al.*, 2005; Pérez, 2010).

La medición de la reflectancia en las plantas por medio de teledetección se ha usado para cuantificar el vigor del dosel, así como el nivel de nutrientes (Davenport *et al.* 2005). La reflectividad de la vegetación depende mucho de las propiedades de las hojas, puesto que estas están compuestas por estructuras complejas con tejidos internos y morfología externa, lo cual varía de acuerdo a la especie así como por las condiciones ambientales en las que se encuentre y la orientación de las hojas.

Peñuelas y Filella (1998), Pérez (2010) y Gasga (2011), refieren que la proporción de la radiación que es reflejada en diferentes partes del espectro depende de la pigmentación y composición de la hoja. La luz solar pasa a través de la hoja mediante la capa de células de la cutícula y la epidermis, dicha luz es absorbida por los cloroplastos en la banda azul y en la banda roja, siendo la fuente de energía para la fotosíntesis; a ello se debe que la vegetación refleje más la porción verde, color que podemos percibir y usar para determinar el estado fisiológico de una planta. La reflectancia de la hoja puede ser medida con espectroradiómetros de banda estrecha que miden la parte visible y del infrarrojo cercano del espectro (Peñuelas y Filella, 1998).

Actualmente se han generado nuevas alternativas para la estimación de los pigmentos en las hojas, con métodos no destructivos y sobre todo que pueden llevarse a cabo en campo (Gitelson y Merzlyak, 1998). Es así que para ofrecer mayor exactitud en el diagnóstico nutricional mediante el color de la hoja de la planta, la reflectancia resulta ser el mejor indicador de N y por ende de P (Wesley y Wander, 1949; Curran *et al.*, 1991; Adams *et al.*, 1999; Gitelson y Merlyak, 1998; Ayala y Beyl, 2005; Cui *et al.*, 2009).

El color es la calidad de un objeto con respecto a la luz que refleja el mismo, el cual habitualmente se determina visualmente por el tono, la saturación y el brillo de la luz reflejada (Decoteau *et al.*, 1996). Por ello no es común que en campo se pueda realizar un diagnóstico sin contar con información adecuada que permita identificar y relacionar los síntomas causados por las deficiencias de elementos nutricionales (Decoteau *et al.*, 1996).

Sin embargo, se han usado distintos sensores remotos para estimar las distintas variables de dosel relacionadas con las características biofísicas, fisiológicas y bioquímicas principalmente en cultivos de trigo y cebada (Hansen y Schjoerring, 2003). Rouse *et al.* (1974), propusieron usar un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) el cual se calcula de la siguiente manera:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ . Donde el NIR y RED representan reflectancias de superficie media sobre los rangos de longitudes de onda en el espectro visible ( $\lambda \sim 0.6 \mu m$ , "RED") y el infrarrojo cercano ( $\lambda \sim 0.8 \mu m$ , "NIR"). Con este índice se logró reducir al mínimo el factor de error humano que está presente cuando se determinan los colores visualmente (Wesley y Wander, 1949). De acuerdo con Dillen *et al.* (2012), el contenido exacto de los pigmentos se adquiere de las regiones visibles e infrarrojo cercano del espectro de reflectancia de la hoja a longitudes de onda de 400-700 nm.

Varios investigadores han usado los índices con base en la luz, ya que muestran una mejor correlación con el área foliar y menor sensibilidad a los cambios del brillo del suelo, que es lo que crea el NDVI (Carlson y Ripley, 1997). De esta manera el NDVI permite saber que cuando la vegetación se encuentra estresada nutricionalmente la absorción de clorofila disminuye y por lo tanto el NIR también disminuye y en él la banda visible aumenta debido a los cambios en la estructura de la planta, que pueden ser causados por carencia o excesos de nutrientes en el suelo (Aoki *et al.*, 1986; Ayala y Beyl, 2005; Lamolda, 2008; Cui *et al.*, 2009). Son varios los estudios que han logrado demostrar los efectos por deficiencias de nutrientes mediante la reflectancia espectral, como por ejemplo el estatus de N en pimiento dulce, maíz, cebada y pinos, correlacionándola con el contenido de nutrientes y la concentración de clorofila (Peñuelas *et al.*, 1994; Rincón y Ligarreto, 2010).

Aoki *et al.*, (1986) y Yoder y Daley (1989), implementaron el uso de la reflectancia con *Cinamomun camphora*, *Nerium indicum* y *Viburnum awabuki*, así también se mostraron resultados similares en arroz, el trigo, en la cebada y girasol y la concentración de nitrógeno en las hojas obteniendo una correlación entre ambas, ya que los pigmentos determinan la característica espectral entre los 400 y 700 nm.

## 2.7 Manejo de la fertilización (nutrición) en las huertas aguacateras

La fertilización del aguacate ha sido muy poco estudiada en el mundo, lo cual se limita a zonas como los Estados Unidos de América (California, Florida), México, Chile, e Israel (APROAM, 2000). Por otra parte, la región de estudio en este trabajo al no ser homogénea, involucra diferenciaciones en las prácticas agrícolas; ya que los productores no producen de un mismo modo, ni bajo las mismas condiciones económicas, ecológicas y sociales (Burgos *et al.*, 2011; Gavito *et al.* 2011). Y como consecuencia, en muchos de los casos, los nutrimentos aplicados no corresponden a las condiciones del clima, suelo y manejo a que están sujetos los huertos (APROAM, 2001).

En los huertos de la región michoacana se usan principalmente dos tipos de fertilizantes los sintéticos y los naturales, donde los fertilizantes inorgánicos son altamente solubles y de rápida liberación, en contraste con los naturales, que son de lenta liberación ya que requieren de la degradación microbiana para la liberación de nutrientes en forma disponible (Burgos *et al.* 2011). La fertilización se efectúa principalmente con el apoyo del diagnóstico foliar, así también son importantes los análisis de suelo y su correcta interpretación (APROAM, 2000).

La aplicación de fertilizantes puede realizarse por distintos métodos, los cuales difieren entre sí en su eficiencia de aplicación. Pero la aplicación por el sistema de riego es más eficiente que la aplicación por voleo (Burgos *et al.* 2011). Por otra parte, predominan suelos ácidos por lo que no es recomendable la utilización de fertilizantes de reacción ácida como el Sulfato de Amonio, la Urea y el Fosfato Mono y Diamónico. La fertilización del árbol va a depender de la edad de la huerta y de su producción así como del tipo de riego. También es importante que la solución nutritiva tenga un pH de 6.5 para que las plantas puedan tomar del suelo los nutrimentos que requieren para su desarrollo (Tapia *et al.*, 2005).

El aguacate es un árbol con bajo requerimiento de fósforo, sin embargo por las características químicas de los suelos es necesario aumentar la dosis, ya que existe una fijación de este elemento. Como fuente de N se sugiere usar Urea, para el fósforo se usa el Ácido Fosfórico o bien el Fosfato Monoamónico (MAP) soluble y como fuente de potasio se usa el Nitrito o el Sulfato de Potasio.

La mayor concentración de las raíces finas de la planta se encuentra generalmente entre la mitad del radio de la copa de la planta y la proyección externa de la misma (Ávilan, 1989). Chirinos (1999) menciona que la dosis de fertilización recomendada puede variar en rangos amplios y sugiere algunas dosis para un huerto donde el rendimiento de fruto promedio aceptable es de 250 a 350 kg por árbol (tabla 2). Coria (2009), también sugiere algunas cantidades de macro y micro nutrientes que se deben aplicar para un rendimiento de 10 ton/ha y más de 25 % de fruta superior a 200 g (tabla 3).

Tabla 2. Nutrimientos y dosis recomendadas para un rendimiento de 250 a 350 Kg/árbol.

Nutrimento	Dosis (Kg/árbol)	Micronutriente	Dosis (gramos/árbol)
Nitrógeno (N)	0.80 a 2.60	Fierro (Fe)	10 a 50
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.20 a 1.20	Manganeso (Mn)	20 a 200
Potasio (K <sub>2</sub> O)	0.30 a 1.50	Cobre (Cu)	10 a 50
Magnesio (Mg)	0.10 a 0.30	Zinc (Zn)	20 a 80
Calcio (Ca)	0.10 a 0.25	Boro (B)	10 a 50
Azufre (S)	0.20 a 0.60	Molibdeno (Mb)	0.5 a 2.5

Fuente: Chirinos (1999).

Tabla 3. Fertilización de aguacate sugerida anualmente para una producción de 10 ton/ha.

N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
200	200	300	25	5	1.0	-	1.5
kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha		kg/ha

Fuente: Coria (2009).

## 2.8 Fertilización del suelo y niveles nutricionales en las hojas

Esta etapa consiste en la aplicación de nutrientes al suelo y al follaje para su crecimiento, mantenimiento y producción de frutos, cuidando de no alterar el suelo y/o generar problemas de contaminación fuera del huerto por la exportación de nutrientes. Para este proceso se requiere de conocimientos agronómicos y un diagnóstico del contenido

nutricional de suelo y foliar, con los cuales se establece un programa de fertilización adecuado, el cual no se lleva a cabo por falta de medios o desconocimiento de los productores. Comúnmente se complementan los fertilizantes químicos con nutrientes de origen orgánico. Entre los productores michoacanos se utilizan abonos derivados de estiércol de res, de chivo, o guano de murciélago, este último aplicado en la fertilización foliar. Así también, se distribuyen alrededor de los cajetes, minerales naturales como la roca fosfórica, dolomita y magnesio o compuestos minerales elaborados a base de curtidos orgánicos sintetizados.

Estos niveles fueron corregidos por los mismos autores en un trabajo posterior (APROAM, 2009), complementando con los niveles medidos en árboles de alto rendimiento en Michoacán, que situaron las concentraciones óptimas del nitrógeno en 1.85% y del fósforo en 0.11%. Es decir, sugirieron que los mayores rendimientos se alcanzaron con concentraciones de N y P que previamente se habían considerado bajas.

El diagnóstico nutrimental se basa en métodos para la identificación de deficiencias, toxicidades o desbalances nutrimentales, el cual puede ocurrir cuando un elemento nutrimental es insuficiente o no puede ser asimilado por la planta, así mismo una toxicidad ocurre cuando hay un exceso o desbalance o condiciones ambientales que no son favorables para la planta. Los síntomas visibles de la deficiencia de un nutrimento son más específicos que los de su toxicidad. La estimación de las cantidades de nutrientes se usa para medir los contenidos totales al momento de su colecta (Gasga, 2011).

## **2.9 Sistemas de cultivo orgánico y convencional**

Martínez *et al.* (1992), define como agricultura convencional al conjunto de técnicas y nuevas tecnologías que conllevan a la dependencia de insumos sintéticos que utilizan energías fósiles. Este modelo de agricultura basa los incrementos de producción en un alto uso de agroquímicos, buscando siempre un alto rendimiento económico (Arango, 1992).

La agricultura orgánica es caracterizada por no usar fertilizantes y pesticidas de origen sintético y desarrollar un sistema de insumos naturales y la implementación de buenas prácticas agrícolas, como la rotación de cultivos para fortalecer el suelo. Sin embargo,

algunos productos nocivos para la salud humana y el ambiente, están permitidos y considerados necesarios y compatibles con la agricultura orgánica (FAO, 1999), como el uso de fungicidas a base de cobre en el caso del cultivo de aguacate.

En los últimos años se ha registrado un comportamiento muy dinámico en la demanda y el consumo de productos orgánicos, sobre todo en los países desarrollados. La explicación reside en la preocupación creciente de la población en relación a la ingesta de productos alimenticios inocuos, sanos, de los cuales se conozca su origen y trayectoria real, así como por una mayor conciencia de la conservación del ambiente.

Basándose en las altas correlaciones entre el contenido nutricional y el color de las hojas, se han desarrollado guías para la detección de deficiencias y toxicidades con gran nivel de detalle para cultivos anuales de distribución mundial como el trigo (Snowball y Robson, 1991) y árboles perennes como el manzano (Comptom *et al.*, 1946), y el naranjo (Futch y Tucker, 2000). Con sus resultados se han desarrollado tablas de color que se pueden usar para asegurar el crecimiento y rendimiento de las plantas.

Las concentraciones de los nutrientes en las hojas sirven de referencia para ajustar los niveles de producción a través de los años y han sido la base para las guías de referencia que los centros de investigación han desarrollado para apoyar a los productores. Los valores de referencia de la concentración foliar óptima para obtener el máximo rendimiento de un cultivo se determinan mediante experimentos de fertilización. En la tabla 4 se presentan los intervalos generales de las concentraciones foliares de nutrientes relacionados con diferentes niveles de suficiencia nutricional propuestos por Maldonado *et al.* (2007) para el cultivo de aguacate en Michoacán.

Tabla 4. Rangos de concentración de N y P establecidos por Maldonado *et al.* (2007), para la franja aguacatera de Michoacán.

<b>Nutrimento</b>	<b>Deficiente</b>	<b>Bajo</b>	<b>óptimo</b>	<b>Alto</b>	<b>Excesivo</b>
<b>Nitrógeno (%)</b>	< 1.72	1.73-1.93	1.94-2.31	2.32-2.50	> 2.51
<b>Fósforo (%)</b>	<0.10	0.11-0.14	0.15-0.18	0.19-0.21	>0.22

### 3. PROBLEMÁTICA

El cultivo de aguacate en los últimos 50 años ha originado nuevas culturas agrícolas en Michoacán desplazando otros cultivos como el maíz y haciendo uso excesivo de agroquímicos que originan serios problemas ambientales, lo que hace que este sistema-producto influya negativamente en el ambiente (INIFAP, 2009). Estudios recientes reportan que, a causa del uso excesivo de fertilizantes, el suelo de las huertas de aguacate contiene niveles muy altos de nitratos y fosfatos. (Bravo-Espinosa et al. 2012; Gavito *et al.*, 2012).

Actualmente se tienen pocos conocimientos de los efectos causados por estos contaminantes, los cuales amenazan la calidad del agua potable, ya que el ambiente donde se desarrolla el cultivo favorece la infiltración del agua con velocidades de hasta 200 mm/h, sobrepasando la zona radical y rompiendo los esquemas básicos que marcan una infiltración de 50 a 90 mm/h. Esta agua de lixiviación arrastra consigo pesticidas y nutrientes no aprovechados empleados para la producción y el control de enfermedades o plagas (Tapia *et al.*, 2012).

De igual manera el impacto ecológico generado por las huertas se manifiesta en la erosión por el arrastre de la lluvia, la disminución de la calidad del suelo por la sobrefertilización y la pérdida de la biodiversidad (Gavito *et al.*, 2012). Es imposible la sobrevivencia del ser humano sin hacer uso de los recursos naturales, por lo que se hace muy necesario buscar una base racional para su aprovechamiento sin propiciar su deterioro y degradación (Tapia *et al.*, 2011).

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El estado de Michoacán se caracteriza por su riqueza cultural y social, así como por su gran variedad de recursos naturales, resultado de su orografía y situación geográfica, que se manifiesta en la diversidad biológica presente (INIFAP, 2012).

Actualmente los estudios realizados en la región aguacatera indican que existe un gran impacto debido a la sobrefertilización que lleva al aumento de nitratos y fosfatos en el suelo (Molina, 2008; Bravo-Espinosa et al. 2012; Gavito *et al.*, 2012), y a la infiltración del agua de riego o lluvia, que arrastra consigo los nutrientes y agroquímicos no aprovechados, aumentando la contaminación (Singh, 1998; Tapia, 2007).

Hasta la fecha no existen evidencias exactas del impacto de este cultivo en la hidrología, pero se sabe que esta degradación ambiental puede provocar un perjuicio social y amenaza el desarrollo económico local vulnerando la capacidad de producción, ya que el agua y el suelo son la base para el desarrollo y sustentabilidad agrícola (Tapia *et al.*, 2011).

De esta manera surge la necesidad de establecer una herramienta que ayude a mantener la producción del aguacate pero buscando reducir la contaminación y el equilibrio en el ambiente. Por ello en este trabajo se propuso investigar la relación entre la nutrición del aguacate, el color con un índice de reflectancia de las hojas para desarrollar los elementos que permitan crear una guía colorimétrica basada en la relación entre la nutrición, el color y el índice de reflectancia de las hojas. Con estos elementos se podrá reconocer visualmente el nivel nutricional de los árboles y eventualmente mapear áreas que tienen deficiencia o exceso nutrimental y de esta manera reducir el uso excesivo de fertilizantes aplicando solo los necesarios; así como también se podrá obtener información del estado fisiológico de la planta al asociarlo con la concentración de nitrógeno y fósforo.

## 5. OBJETIVOS

### General

- 1) Valorar la relación entre el color de las hojas, su contenido nutricional y el NDVI para diseñar una guía colorimétrica con las hojas de aguacate Hass que pueda hacer un diagnóstico visual del contenido de Nitrógeno y Fósforo de su plantación.

### Específicos

- Evaluar las concentraciones totales de N y P en las hojas de aguacate Hass para verificar los contenidos existentes en las hojas y relacionarlas con las cantidades aplicadas de fertilizantes para determinar la eficiencia de la fertilización.
- Relacionar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con el color y el contenido de N y P de las hojas de aguacate Hass.
- Elaborar categorías de color que corresponden a diferentes niveles de concentración de N y P y que, en base a valores de referencia, permitan diagnosticar una nutrición deficiente, adecuada y excesiva.

### Hipótesis

El contenido de nitrógeno y fósforo en las hojas de aguacate está relacionado con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y con el color de las hojas, por lo que el nivel nutricional de los árboles se podrá evaluar visualmente a partir del color de las hojas.

## **6. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1. Área de estudio**

El cultivo de aguacate en el estado de Michoacán se encuentra distribuido en 30 municipios, dentro del Sistema Volcánico Transversal, extendiéndose sobre la latitud 20° y atravesando el centro de México, desde el Pacífico hasta el Golfo de México (Ramírez-Ramírez, 2001). La zona ideal para este cultivo se ubica entre las coordenadas 18°45' y 20° 06' N y entre 101°47' y 103°13' O, abarca una superficie de más de 112, 000 hectáreas y reúne a más de 20, 000 productores (INIFAP, 2009; Gutiérrez-Contreras *et al.* 2010; Burgos *et al.*, 2012, Morales Manilla *et al.*, 2012).

### **6.2 Geología y litología**

El paisaje geomorfológico presente en el estado de Michoacán se debe a la actividad volcánica y tectónica de esta franja (Ramírez-Ramírez, 2001), a partir de la cual se han desarrollado las características de los suelos y de la vegetación. Así mismo en esta zona hay cuencas de gran importancia para la recarga de acuíferos, donde se presentan algunos afloramientos de roca basáltica en una formación típica de barranca, con fracturas bien definidas, lo cual permite el transporte y afloramiento de agua subterránea en forma de manantiales (CONANP, 2009).

El estado de Michoacán se caracteriza por un vulcanismo activo desde la época Terciaria, el cual ha transformado el relieve y el paisaje; la parte más baja se localiza cerca de la depresión del Río Balsas y la región más alta se ubica en el Cerro de Tancítaro (CONANP, 2009).

### **6.3 Edafología y geomorfología.**

Dentro de los 22 municipios sobresalientes en el cultivo de este frutal, se pueden encontrar ocho tipos de suelos, entre ellos los de mayor distribución son los Andosoles, los cuales pueden tener rendimientos bajos ya que retienen mucho fósforo de modo que no puede ser absorbido por la planta y los Acrisoles, seguidos de los suelos de tipo Litosol, Phaeozem,

Luvisol, Cambisol, Vertisol y Regosol (Guillén *et al.*, 2007; INIFAP, 2012). Entre las geoformas que podemos visualizar están las laderas, piedemonte, valles, superficies cumbresales y planicies (Velázquez y Fuentes, 2004; Ramírez-Sánchez, 2009), así también como cinerítico, domo volcánico, talud y lecho de corrientes, plano y baja pendiente y derrame basáltico (CONANP, 2009).

#### **6.4 Hidrología**

El estado de Michoacán, se encuentra en la región hidrológica de mayor relevancia nacional y estatal por su extensión e importancia socioeconómica y ambiental (Ramírez-Sánchez, 2009) el Río Balsas, la cuenca hidrológica Tepalcatepec-Infiernillo y la sub-cuenca hidrológica Cupatitzio, por lo cual la zona serrana de los alrededores tiene gran influencia por la aportación de grandes cantidades de agua y la presencia de grandes manantiales (CONANP, 2009; Ramírez-Sánchez, 2009). La humedad captada por la masa forestal se condensa y, en forma de precipitación, se infiltra hasta los mantos acuíferos y surge en los manantiales del Área del Río, dando origen al río Cupatitzio. Después del nacimiento de este río se le integran una serie de manantiales como El Gólgota, La Higuera, El Pescadito, La Hierbabuena y otros sin nombre; sin embargo se ha observado que existe una disminución en los caudales derivado de manera directa de las actividades humanas a causa de la deforestación y el cambio de uso de suelo entre las cuales se encuentra el cultivo de aguacate (CONANP, 2009). A pesar de que el estado cuenta con recursos hídricos suficientes para satisfacer las exigencias del cultivo, así como de la industria y para el uso doméstico, este vital líquido se distribuye de manera desigual en todo el estado (APROAM, 2009).

#### **6.5 Altura, Clima y temperatura**

La distribución de la franja del cultivo y la mayor superficie se localiza a una altura entre 1100 y 2100 msnm. De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García (1981), en Michoacán existen 14 tipos de climas los cuales de acuerdo con Ramírez-Sánchez (2009), siguen un patrón altitudinal, influidos por la humedad y la Depresión del Balsas hacia las laderas Este, Oeste y Sur del Tancítaro y por el fenómeno de

continentalidad en la ladera Norte. Esta diferencia de alturas genera cambios en las etapas fenológicas del árbol de aguacate en tiempo y espacio, lo que permite contar con diferentes fechas de cosecha (APROAM, 2002).

Aunque el cultivo de aguacate se encuentra establecido en 10 de los 14 climas: los predominantes son (A)C(m)(w), semicálido húmedo (25.21%) con abundantes lluvias en verano; Aw□ (w), cálido subhúmedo (20%) con lluvias en verano, intermedio en cuanto a la humedad y el (A)C(w<sub>2</sub>)(w), semicálido subhúmedo (18.84%), con lluvias en verano, todos con lluvia invernal menor al 5%. El clima C(E)(m)(w), semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano y lluvia invernal menor de 5%, representa la menor superficie cultivada (Guillén *et al.*, 2007).

La franja aguacatera, que presenta temperaturas medias anuales que oscilan desde los 16°C hasta los 24°C, abarca la mayor área establecida para el cultivo (Guillen *et al.*, 2007). Gutiérrez-Contreras *et al.* (2010), mencionan que las temperaturas promedio anuales de 17.9 a 19.7°C con condiciones templadas son las mejores para la producción del aguacate y que las temperaturas de 19.5 a 21°C son los límites para un desempeño razonable, los cuales corresponden a climas subtropicales, cálidos y húmedos.

## **6.6 Precipitación y humedad relativa**

La precipitación que requiere este cultivo va desde los 1200 hasta los 1600 mm distribuidos durante todo el año, ya que la precipitación es de gran importancia para el desarrollo del árbol de aguacate (Gutiérrez- Contreras, 2010), y se recomienda el uso de riego en las etapas de secas.

## **6.7 Heladas y granizadas**

Este frutal es sensible a los cambios edáficos y climáticos, y se ve perturbado por varias heladas al año (diez en promedio), que afectan una superficie de 42538 ha; sin embargo otros pocos sitios son afectados con hasta 20 heladas anuales. Por otra parte también se ve afectado por las granizadas, que dañan de manera importante ya que los golpes del granizo

causan heridas que demeritan la calidad del fruto y pueden facilitar el ataque de fitopatógenos (Guillén *et al.*, 2007, Gutiérrez-Contreras, 2010).

## **6.8 Contexto ecológico**

Aunque el área de estudio no abarca toda la franja aguacatera, podemos decir que la zona estudiada comparte similitudes ecológicas como el gradiente topográfico y climático. Desde el punto de vista biológico, incluye especies endémicas tales como *Zygoeomys strichopustrichopus*, una tuza muy poco conocida, venado cola blanca, armadillo, cacomixtle, zorra gris, aves canoras y de presa y diversos réptiles. En las partes altas podemos encontrar bosques de oyamel (*Abies religiosa*), encinos, pinos de diversas especies (*Pinus hartwegii*, *P. teocote*, *P. leiophylla* y *P. montezumae*, entre otras), pastizales, y agricultura de temporal en las zonas bajas. La vegetación natural en general está compuesta por bosques de clima templado, principalmente mixtos de pino-encino, así como bosques de oyamel, de encino y mesófilo de montaña (INIFAP, 2012).

Michoacán cuenta con una gran diversidad de especies, en fauna se han registrado 547 especies de aves, 160 de mamíferos, 42 de anfibios, 138 de reptiles, 241 de arácnidos y 1,153 de insectos; en flora se han descrito 30 especies de encino, 16 de pináceas, 208 de helechos, 5,000 de otras plantas vasculares y 652 de hongos (INIFAP, 2012).

## **6.9 Contexto socioeconómico**

La producción mundial de aguacate se estima en 3 362,124 toneladas en una superficie de 407,135 ha, de la cual el 90% se origina en América y 32% en México (Coria, 2009). Esto deriva grandes beneficios para los participantes en la cadena de producción, como son los productores, comercializadores, industrializadores y consumidores, trabajadores permanentes y eventuales para las labores del cultivo y el manejo de post-cosecha (INIFAP, 2009; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). Con ello se puede decir que es de gran importancia socioeconómica tanto para el mercado internacional como el nacional, que ha dejado de ser un fruto exótico para incorporarse a la dieta de muchos países; a nivel internacional la explotación comercial de este frutal ha ido incrementando en las últimas décadas.

## 7. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este estudio se decidió trabajar en algunas de las huertas donde ya se tenían las facilidades y disposiciones que se dieron en el proyecto “Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción”, llevado a cabo por la UNAM para la Fundación Produce y COFUPRO. Estos se ubican en los municipios de Ario de Rosales, Taretan, Ziracuaretiro y Uruapan.

## 8. DISEÑO DEL MUESTREO

### 8.1 Selección de huertas y arboles

Se trabajó con ocho huertas de las cuales 3 son con manejo orgánico, 3 son convencionales y 2 se incluyeron como testigos, las cuales habían estado completamente abandonadas entre 5 y 8 años aproximadamente.

Tabla 5. Ubicación de las huertas muestreadas dentro de la franja aguacatera de Michoacán.

Huerta	Georeferencia	Altitud (msnm)
I	19°18'07.31" N / 101°39'07.37" O	2385
II	19°29'33.79" N 101°53'24.83" O	2026
III	19°29'19.48" N / 101°55'59.79" O	1983
IV	19°25'25.94" N / 101°53'01.30" O	1513
V	19°28'37.24" N / 101°52'35.85" O	1882
VI	19°23'53.95" N / 101°51'33.47" O	1542
VII	19°16'59.28" N / 101°38'35.15" O	2342
VIII	19°17'01.36" N / 101°38'20.59" O	2303

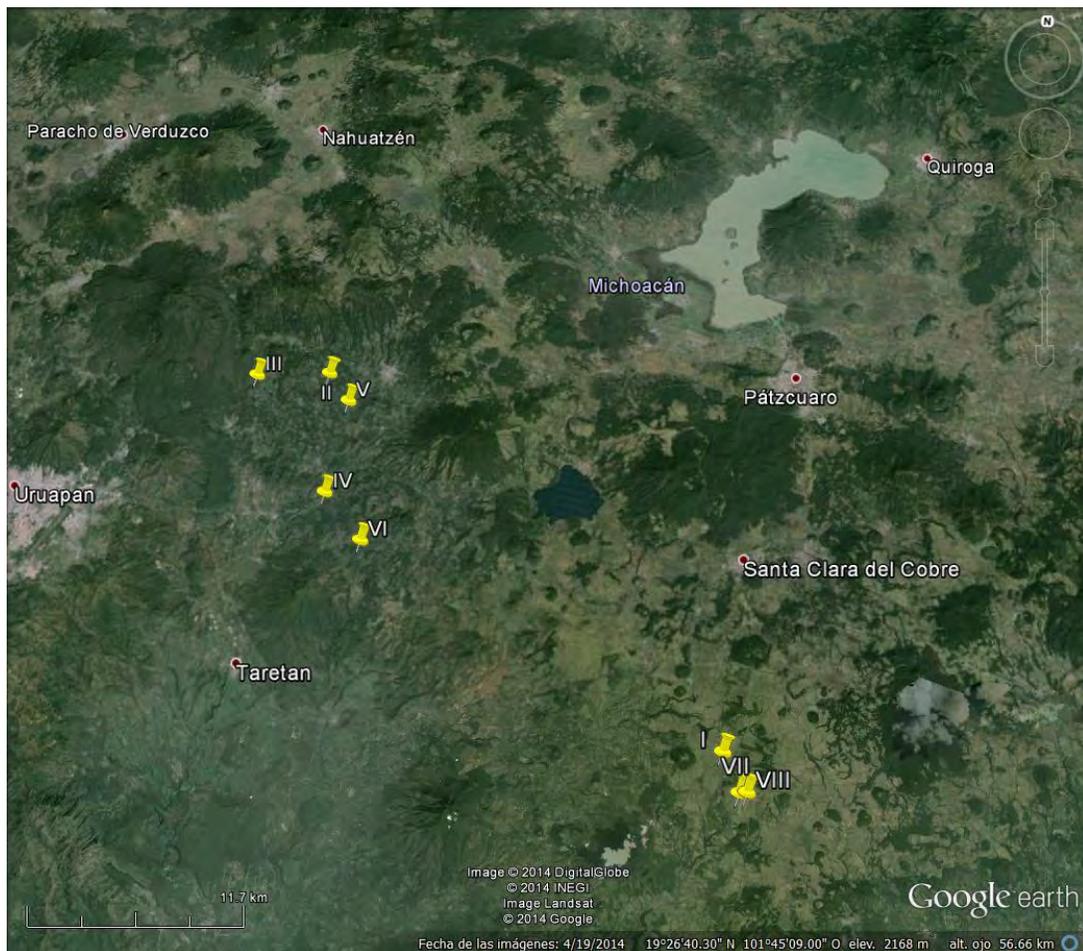


Figura 1. Mapa en la que se aprecian los puntos de muestreo georeferenciados y marcados con banderas azules se encuentran entre Uruapan, Taretan, Ario de Rosales y Tingambato. Tomado de Google earth, escala de 11.7 km.

De cada huerta se eligieron 6 árboles de 6 años en adelante (considerados adultos en plena producción). Los árboles muestreados se situaban dentro de un cuadrante, localizándose en el centro de cada huerta como se puede ver en la figura 2. Se tomó en cuenta que debían estar distribuidos uniformemente y se descartó todo aquel que presentara anomalías en sus hojas.

El manejo que se lleva a cabo en las huertas estudiadas en este trabajo se puede apreciar en la tabla 6.

Tabla 6. Características de edad máxima de la plantación, tipo de manejo y la fertilización en las huertas de estudio.

Sitio	Edad	Manejo	Producto	kg o L /ha/año	Tiempo y Frecuencia de aplicación
I	13	Convencional	Estiércol de res	8800	9 Eventos de fertilización foliar (enero, febrero, marzo, abril, mayo junio, julio, septiembre y noviembre)
			18-46-0	141,84	
			Nitrato de potasio	167	
			Superfosfato	70,92	
			Sulfacid	1	3 Eventos de fertilización del suelo ( julio, agosto y septiembre)
			Maxigrow excel	1,5	
			Foltron	0,2	
			Tropicel	2	
II	12	Orgánica	Supermagro	220	8 Eventos de fertilización foliar durante el año (enero, marzo, abril, mayo, junio, agosto, octubre y noviembre)
			Composta	7500	3 Eventos de fertilización del suelo (abril, julio y agosto)
III	11	Orgánica	Biol	583	
			Composta	8958	
IV	12	Convencional	Fosfonitrato	117	4 Eventos de fertilización foliar durante el año (febrero, mayo, agosto y noviembre)
			Fosfato diamónico	343	
			Sulfato de hierro	5	
			Sulfato de manganeso	5,5	
			Sulfato de zinc	5	2 Eventos de fertilización del suelo (julio y agosto)
			Boronat	8	
			Cal	42,85	
			Sulfato de magnesio	67	

V	25	Orgánica	Composta	28000	5 Eventos de fertilización foliar durante el año (enero, marzo, mayo, junio y octubre),
			Lombricomposta	3200	
			Biofertilizante	400	
			Cal	50	4 Evento de fertilización del suelo durante el año (enero, abril, julio y agosto)
			Harina de roca	666,7	
VI	25	Convencional	16-16-16	232	2 Eventos de fertilización foliar durante el año (agosto y octubre)
			K-mag	116	
			Ganubor (borax 15%)	30	
			Sulfato de fierro	30	
			Humiplex	20	
			Nutriphite	10	
			Ferragro	4,44	4 Eventos de fertilización del suelo (febrero, mayo, julio y noviembre)
			18-46-00	181,33	
			Fosfonitrato	72,22	
			Sulfato de fierro	11,33	
			Sulfato de manganeso	11,33	
			Sulfato de zinc	10	
VII	10	Testigo		0	
VIII	10	Testigo		0	

## 8.2 Selección de hojas

Se tomaron las hojas más jóvenes pero completamente desarrolladas en ramas sin fruto (4ª y 5ª hoja a partir del ápice de la rama, Figura 3), ya que éstas están menos influenciadas por la formación del fruto y reflejan mejor la nutrición más reciente del árbol que las hojas más viejas (Legaz *et al.*, 1995).

## 8.3 Época de muestreo

Se ha mencionado en distintos trabajos que el periodo óptimo para el muestreo foliar comprende entre septiembre y noviembre, que es cuando los brotes de las hojas en primavera han alcanzado una edad de 5 a 7 meses (Salazar, 2002; Aguilar, 2009) y mantienen estable la concentración de elementos minerales. El muestreo en este trabajo se realizó en los primeros días de octubre, esta fecha se eligió, dado que se dispone de imágenes satelitales que fueron tomadas en noviembre del 2011 y se pretende asociar (posterior a la realización de este trabajo) los niveles nutricionales foliares, los valores de color y reflectancia medidos en las huertas con las bandas espectrales de dichas imágenes.

## 8.4 Localización de las hojas

Las hojas elegidas estaban expuestas al sol en la parte exterior del árbol (Figura 3), a una altura entre 1 y 2 metros del suelo y orientadas en dirección a los cuatro puntos cardinales; de cada punto se tomaron dos hojas ubicadas entre la cuarta y quinta posición comenzando del ápice hacia la base (Aguilar, 2009).



Figura 2. Diseño del muestreo

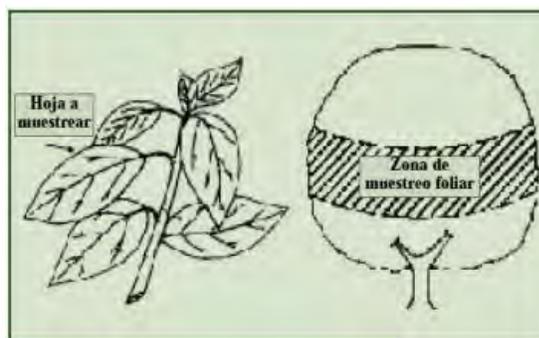


Figura 3. Situación de la hoja

### **8.5 Medición del índice de verdor (NDVI) y escaneo de las hojas.**

Para medir el índice de verdor de las hojas se tomaron dos lecturas en los cuatro puntos cardinales a muestrear con el medidor Fieldscout CM 1000. Este equipo usa un método de lectura no destructivo (Perry y Davenport, 2007), mediante el disparo de un láser que cuantifica y promedia el NDVI (las hojas tienen que estar expuestas al sol). Concluida la lectura del NDVI de las hojas, se cortaron y escanearon inmediatamente en el lugar para preservar el color asociado a la medida de reflectancia previa. Posteriormente las imágenes escaneadas se analizaron con el programa IMAGE COLOR SUMMARIZER, el cual se encuentra disponible en línea ([http://mkweb.bcgsc.ca/color\\_summarizer/?analyze](http://mkweb.bcgsc.ca/color_summarizer/?analyze)), para establecer una clave para cada hoja, los componentes del color (R=rojo, G=verde y B=azul) y el color promedio que representa el color total de cada hoja.

### **8.6 Transporte, descontaminación y molienda de las muestras**

Las muestras se transportaron lo más rápido posible al laboratorio, en bolsas de papel con libre acceso de aire y sin que estuvieran expuestas al sol. Las muestras frescas se lavaron con agua potable, se desinfectaron con solución de detergente y se enjuagaron con agua desionizada. Posteriormente las muestras se secaron en un horno a 70°C por 12 a 24 horas para estabilizar el tejido y detener las reacciones enzimáticas. Ya secas las muestras se molieron y se pasaron por un tamiz de 1.0 mm para obtener una mezcla homogénea lista para los análisis de determinación de nitrógeno y fósforo.

### **8.7 Determinación de N y P en material vegetal**

Con el método de microKjeldahl se digieren las proteínas y otros componentes orgánicos de las hojas secas y molidas, los cuales fueron filtrados a través de un papel Whatman No. 1. Una fracción (alícuota) del filtrado fue digerida en un medio ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (Jackson, 1982). La determinación de nitrógeno total se obtuvo por colorimetría con el método fenol-hipoclorito (Robertson *et al.* 1999) y el fósforo total con el método colorimétrico de Molibdato después de la reducción del ácido ascórbico (Murphy and Riley, 1962). Ambas

muestras fueron leídas en un auto-analizador Bran+Luebbe (Technicon Industrial System, 1997).

### **8.8 Análisis estadístico**

Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de regresión lineal, para identificar y definir la relación que existe entre las variables como el contenido de nutrientes (N y P) y el NDVI, así como el color de la hoja con las concentraciones determinadas en las hojas. De la misma manera se evaluó la relación de las concentraciones obtenidas en laboratorio con los nutrientes totales aplicados en la huerta (kg/ha/año). Las concentraciones de N y P foliar de las huertas convencionales y orgánicas se compararon mediante un análisis de varianza de una vía para evaluar el efecto del tipo de manejo.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 Categorización de concentraciones de N y P medidos en hojas en base a los rangos establecidos y re-categorización de los rangos propuestos.

De acuerdo a los niveles establecidos por Maldonado *et al.*, (2007) para la franja aguacatera de Michoacán, el 48.4 % de las hojas tienen deficiencia de nitrógeno, el 10.4% se encuentra bajo, el 21.4% es óptimo, el 7.3% alto y el 12.5% presenta exceso de nitrógeno (figura 4a).

Analizando los valores del fósforo en las hojas se obtuvo que el 4.2% esta deficiente, el 2.6% bajo, el 0.5% es óptimo y el 96.6% se encuentra en exceso (figura 4b).

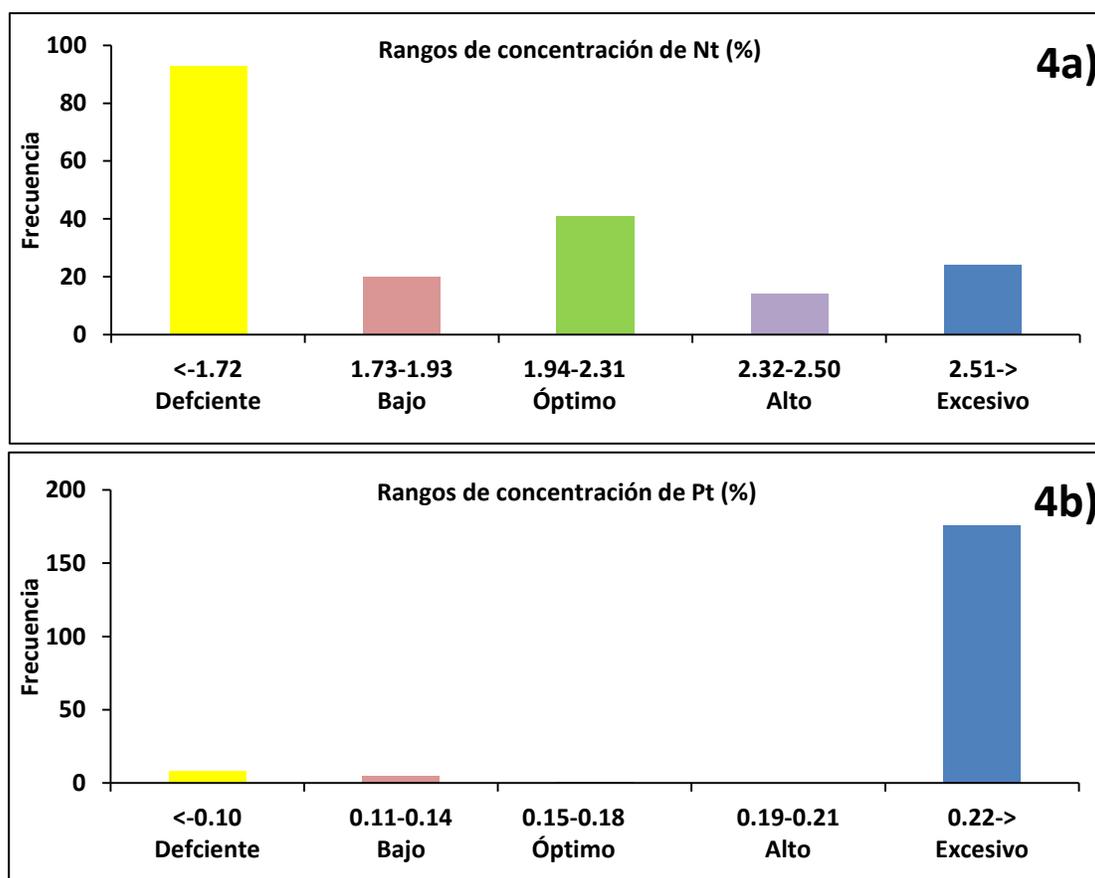


Figura 4. Distribución de la muestra de hojas de acuerdo a los niveles de concentración de N (a) y P (b) establecidos por Maldonado *et al.* (2007) para la zona de Michoacán.

Sin embargo, con base a las concentraciones propuestas posteriormente por el mismo grupo de trabajo (APROAM, 2009), con niveles óptimos de 1.8-1.9 para el N y 0.10-0.12 para el P, el porcentaje de hojas con niveles óptimos y superiores al óptimo de N aumentó. Este no fue el caso para las concentraciones de P, las cuales se mantuvieron en niveles excesivos según los valores propuestos en ambos trabajos.

Para reflejar mejor la distribución de las muestras obtenidas de las huertas y adecuar las categorías en función de los niveles corregidos y más recientes, en este trabajo se establecieron nuevas categorías de niveles de N que incluyeran desde los valores más bajos hasta los más altos (Tabla 7). No se intentó hacer lo mismo con los niveles de P ya que prácticamente todas las muestras obtenidas se ubicaron en niveles muy superiores al óptimo.

Con la re-categorización de los niveles ya establecidos el 6.25% es deficiente, el 29.16% bajo, 13.02% regular, 10.41% adecuado-óptimo, 21.35% óptimo-alto, 7.29% alto y el 12.5% excesivo en nitrógeno (figura 5). De esta manera, las nuevas categorías contienen un mínimo de 10 muestras para obtener los promedios de color y NDVI y también más de 30 muestras por debajo y por encima del óptimo para ubicar con solidez los promedios de color y reflectancia que están abajo y arriba del óptimo. Además, incluyen la corrección del óptimo a niveles un poco más bajos (APROAM, 2009), lo cual es deseable tanto desde el punto de vista económico para que el productor no gaste de más como desde el punto de vista ambiental para reducir el fertilizante lixiviado y por ende la contaminación de los mantos acuíferos.

Tabla 7. Re-categorización de rangos e intervalos de niveles de N (a) y rangos e intervalos de P (b) en las hojas.

(a) Rango	Intervalo	(b) Rango	Intervalo
Deficiente	0-0.99	Deficiente	<-0.10
Bajo	1.01-1.49	Bajo	0.11-0.14
Regular	1.5-1.72	Optimo	0.15-0.18
Adecuado- Óptimo	1.73-1.93	Alto	0.19-0.21
Óptimo-Alto	1.94-2.31	Excesivo	0.22->
Alto	2.32-2.50		
Excesivo	2.51>		

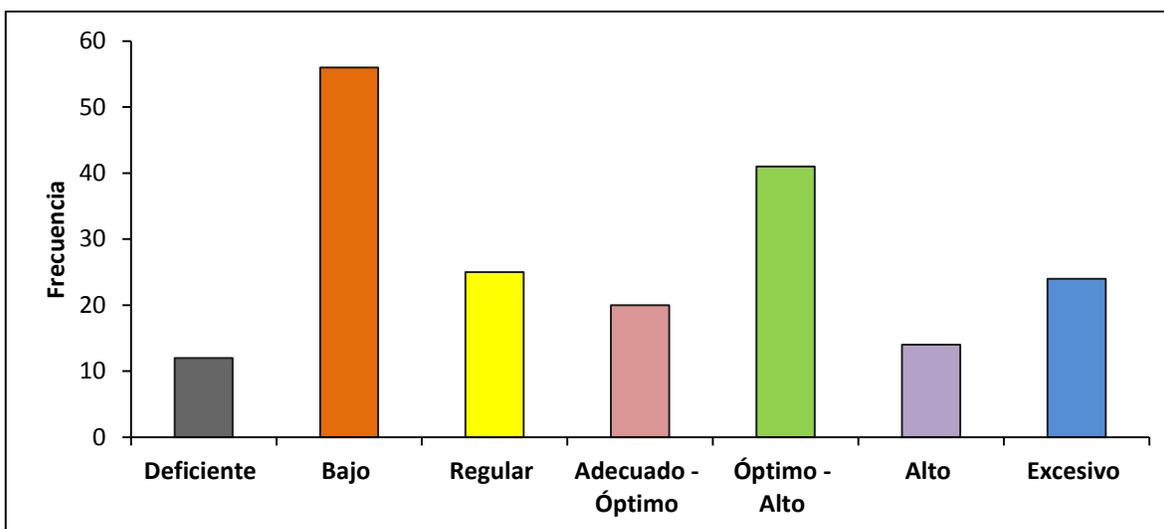


Figura 5. Distribución de la muestra de hojas en base a las nuevas categorías de niveles de concentración de N propuestas.

Los valores de nitrógeno total medido, con base a los niveles propuestos en este trabajo, de las hojas de las huertas sin fertilización reciente (testigos) presentaron niveles claramente por debajo del óptimo, con 25% en un nivel deficiente y un 75% en el bajo (Figura 6a). Para las huertas convencionales el 13.9% mostro un rango bajo, el 15.3% regular, el 15.3% adecuado-óptimo, 25%, óptimo-alto, 4.2% alto y 26.4% excesivo. En el caso de las huertas

orgánicas el 13.9% estaba en el nivel bajo, 19.4% en regular, 12.5% en adecuado-óptimo, 31.9% en óptimo-alto, 15.3% en alto y 6.9% en excesivo. Estas distribuciones evidencian que las muestras de las huertas orgánicas no difieren de las huertas convencionales y que únicamente se encuentran valores claramente bajos y deficientes en las huertas testigo.

En contraste con los niveles de N, más del 90% de las hojas se ubicaron en los niveles excesivos de P independientemente del tipo de manejo, incluyendo a las muestras de las huertas testigo (Figura 6b).

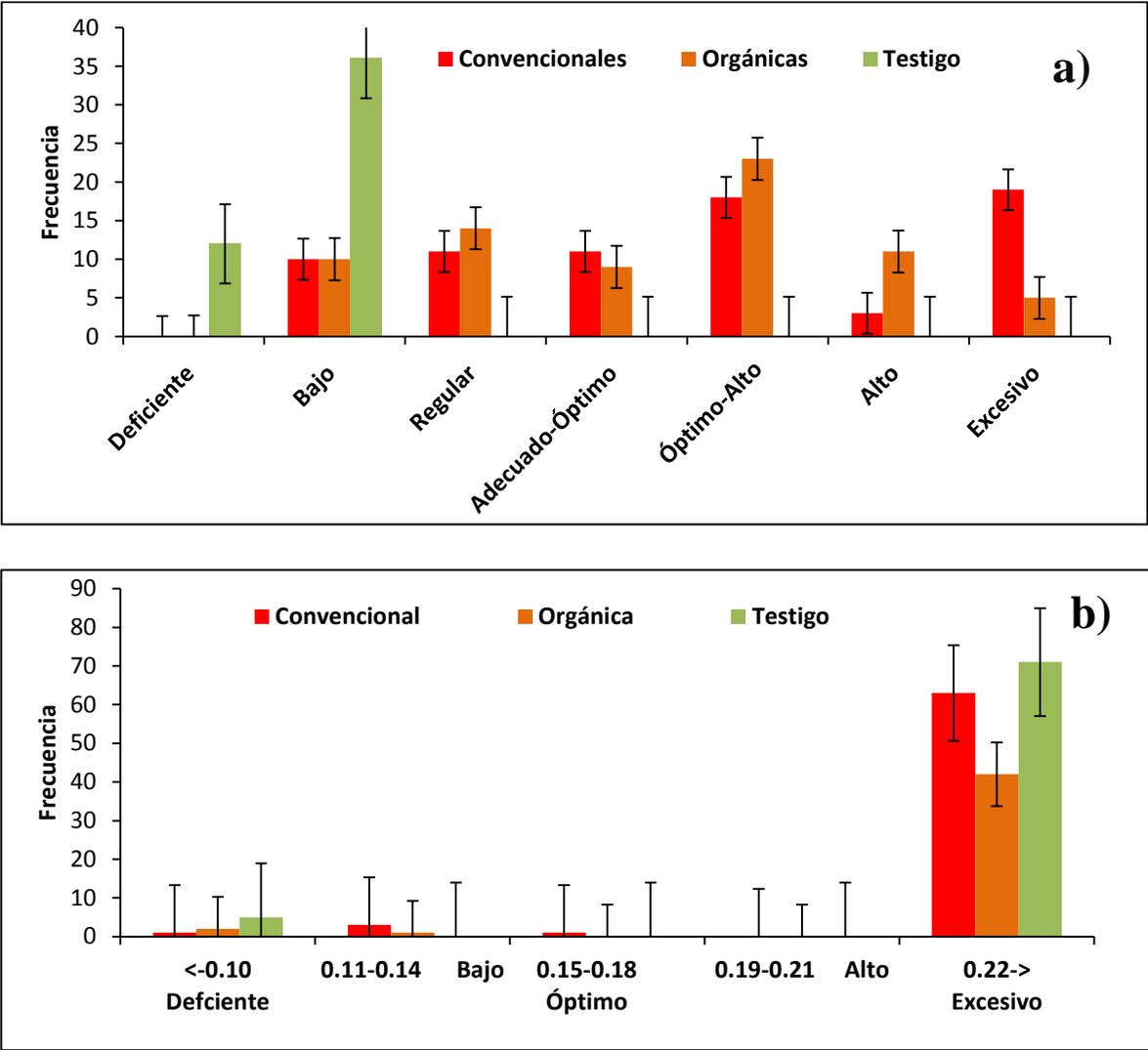


Figura 6. Distribución de la muestra de hojas agrupadas por tipo de manejo en base a las categorías propuestas de N (a) y P (b).

## 9.2 Relación entre los niveles medidos de Nitrógeno y Fósforo y las cantidades de fertilizantes aplicadas.

La relación entre el N medido (%) y el N aplicado ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), muestra una relación lineal positiva hasta los  $400 \text{ kg N ha}^{-1}$ , que después descende en las huertas con aplicaciones de  $600 \text{ kg N ha}^{-1}$  (figura 7a). Sin embargo, se puede apreciar que el nivel óptimo en las hojas se alcanzó con aplicaciones de solo  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ , lo cual demuestra que se aplica mucho más fertilizante del que es necesario para llegar a la concentración óptima. En cuanto al P medido y el P aplicado no existe relación, dado que incluso en las huertas sin ninguna aplicación de fertilizante por varios años se encuentran niveles excesivos de P (figura 7b).

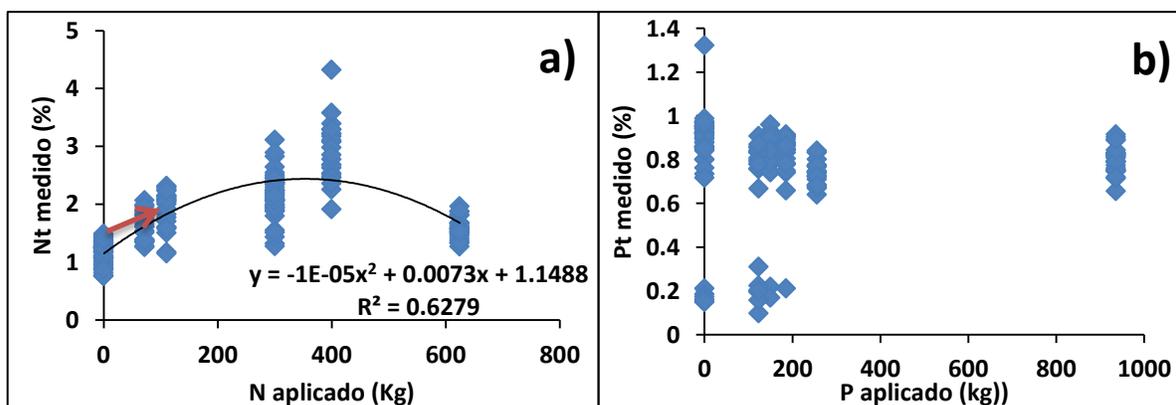


Figura 7. Relaciones entre el N medido en hojas y el N aplicado como fertilizante (a) y el P medido en hojas y el P aplicado como fertilizante (b) en las hojas muestreadas.

### 9.3 Relaciones del NDVI con el N y P total medido y aplicado en las hojas de aguacate

No se encontró relación alguna entre el NDVI y el N total o el P total medidos en hojas (figura 8).

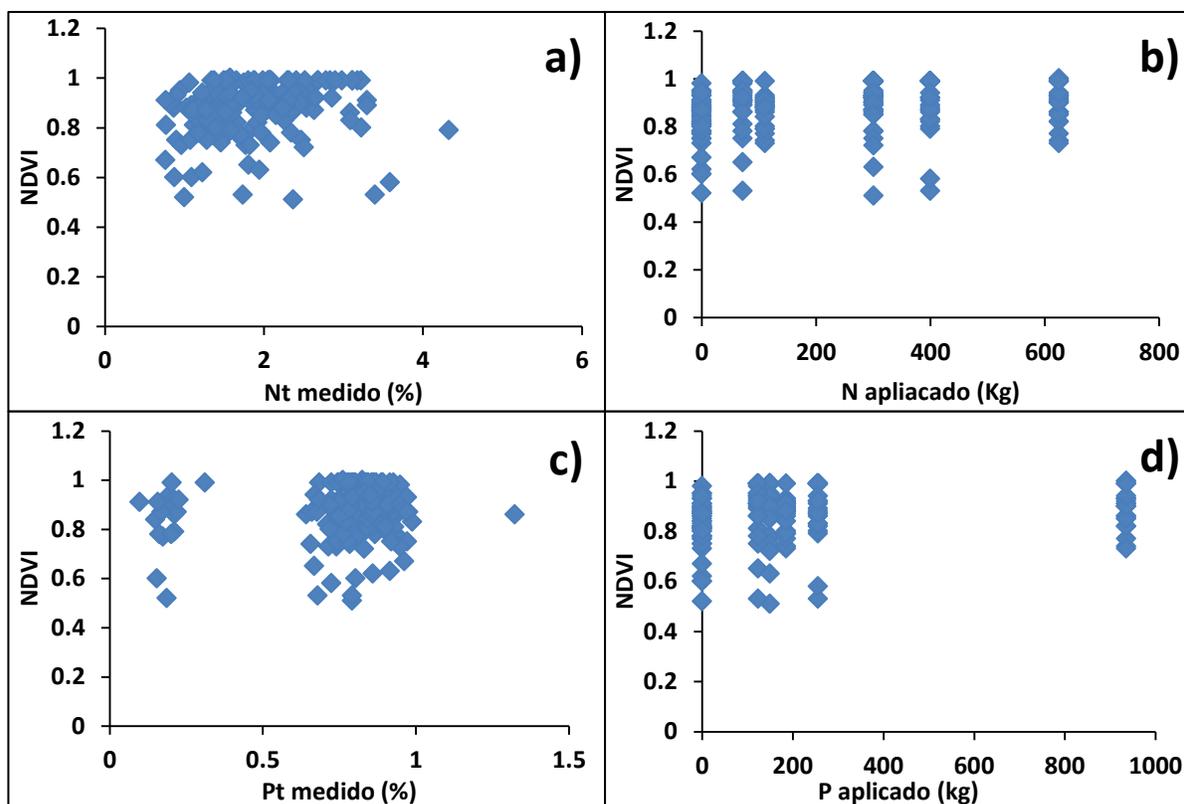


Figura 8. Relaciones de NDVI entre Nt medido (a), N aplicado (b) y NDVI entre Pt medido (c), P aplicado (d).

#### **9.4 Relaciones de las bandas de color con el N y P total medidos en las hojas de aguacate.**

Los valores de los componentes rojo (R) y verde (G) medidos en las imágenes escaneadas de las hojas mostraron una relación exponencial negativa con las concentraciones de N medidas en las hojas (figuras 9a y 9b). Los valores de azul (B) no presentaron ninguna relación con las concentraciones de N medidas en las hojas (figura 9c).

Ninguna de las bandas de color mostró relación con los niveles de P medidos en las hojas (figuras 9d, 9e y 9f). Esto puede deberse a que la mayoría de las hojas se agruparon en dos niveles con valores similares de P, a diferencia de los valores de N que se distribuyeron de manera más homogénea en un intervalo amplio de niveles.

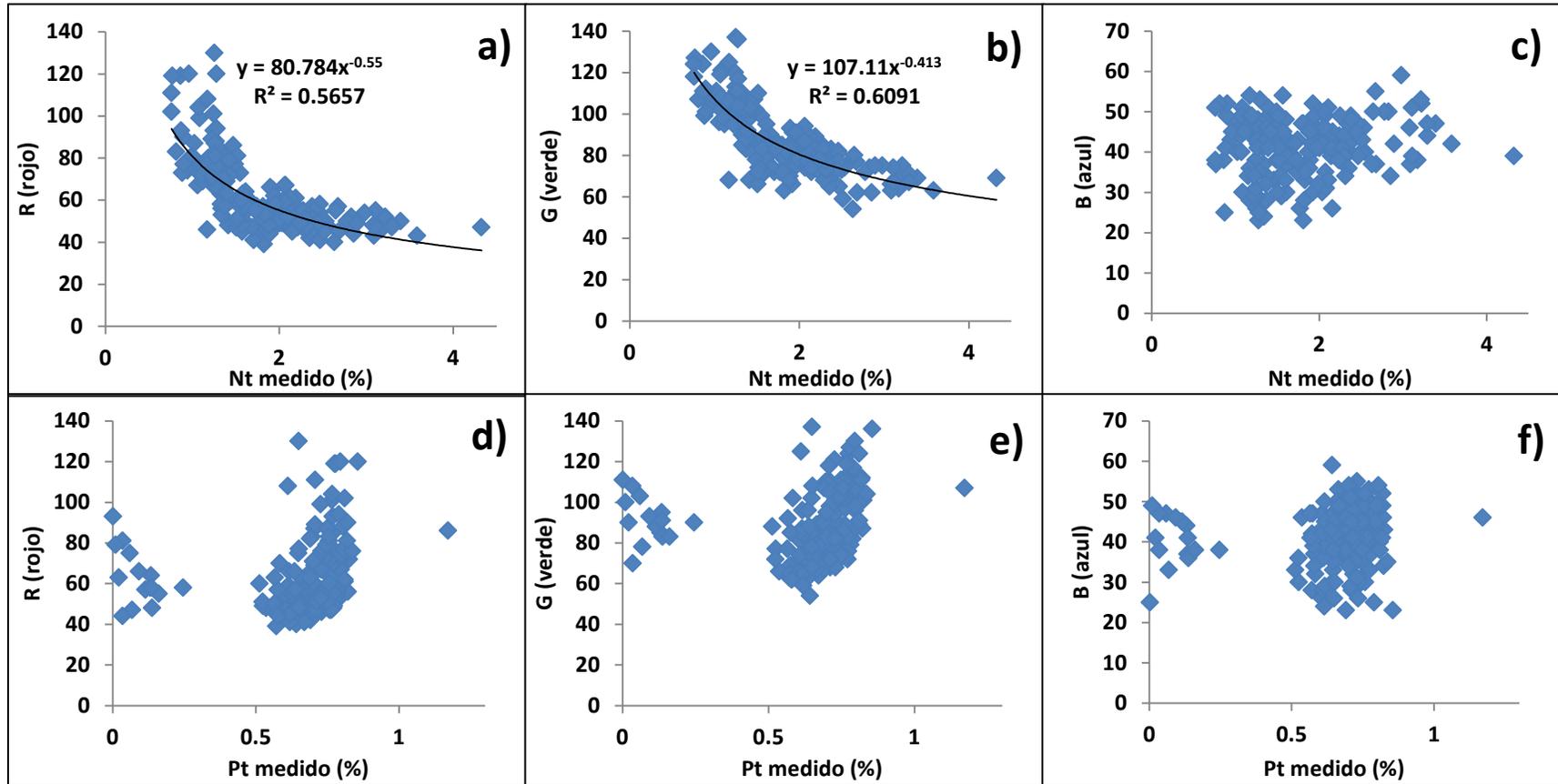


Figura 9. Relaciones entre las bandas de color R, G y B y el Nt medido (figuras a, b y c) y el Pt medido (figuras d, e y f) en las hojas.

## 9.5 Estructuración de la guía de color para verificar visualmente el nivel de N en las hojas de aguacate.

Con base en la categorización propuesta en este trabajo se promediaron los valores de cada banda de color y del nitrógeno total medidos en las hojas de aguacate para cada categoría (figura 6a y 6b). La agrupación de los niveles medidos de P en valores muy altos y la consecuente falta de relación entre el P medido y las bandas de color no permitieron estructurar una guía de color para el fósforo.

Los valores promedio de cada banda de color y del nivel de N foliar para cada categoría se pueden apreciar en la tabla 8. Los valores promedio por separado de RGB se convirtieron a CMYK (para mantener el color real en la impresión) para identificar el color promedio que corresponde a cada categoría.

A partir de esta relación se construyó una paleta de colores que representa el promedio de color para cada uno de los niveles de concentración de N propuestos. Con estos elementos se elaboró la guía de color cuya versión final se distribuirá entre los productores de aguacate para que ellos puedan monitorear visualmente el nivel nutricional de las hojas en su huerta (Anexo 1).

Tabla 8. Promedios de componentes de color RGB, porcentaje de nitrógeno foliar y componentes de color CMYK.

Rangos	R	G	B	% Nt	C	M	Y	K
Deficiente (0-0.99)	92	112	43	0.87	17	0	61	56
Muy bajo (1.01-1.49)	75	101	40	1.27	25	0	60	60
Bajo (1.5-1.72)	56	82	40	1.61	31	0	51	67
Regular (1.73-1.93)	52	79	39	1.85	34	0	50	69
Óptimo (1.94-2.31)	53	81	42	2.12	34	0	48	68
Alto (2.32-2.50)	51	75	44	2.41	32	0	41	70
Excesivo (>2.51)	49	69	45	3.02	29	0	34	72

## 10. DISCUSIÓN

Los resultados de las concentraciones de nitrógeno y fósforo en las hojas de aguacate obtenidos en este trabajo, indicaron que los valores de ambos nutrientes se encontraban en los extremos, deficiente de nitrógeno y excesivo de fósforo, según los valores reportados por Maldonado *et al.* (2007) para Michoacán. Sin embargo, con la rectificación de APROAM (2009), donde el nivel estándar para el nitrógeno es de 1.85%, aproximadamente la mitad de los valores de N medidos se ubicó por debajo y la otra mitad por encima del óptimo. El adoptar los valores propuestos posteriormente por los mismos autores permitió hacer una mejor categorización ya que se pudieron acomodar un mínimo de 10 hojas en cada categoría. No obstante, en el caso del P, prácticamente todas las muestras tuvieron valores excesivos y esto no permitió observar ninguna relación con el color ni establecer categorías, por lo que la guía de color propuesta no incluye los niveles de P. Probablemente sea necesario extender de manera considerable el muestreo a otras zonas de Michoacán para obtener una muestra con concentraciones más variadas que permitan hacer una categorización como la que se hizo para el nitrógeno.

Es importante señalar que existen diferencias en cuanto a los valores de concentración de nitrógeno y fósforo entre las regiones productoras de aguacate en el mundo y a nivel local dado que se utilizan diferentes variedades del cultivo. Méndez *et al.* (2008) encontraron que las concentraciones medidas en las huertas fueron bajas tanto para el nitrógeno (<1.63 %) como para el fósforo (<0.10 %) en un estudio realizado en el Estado de México, aunque no se especifica si las mediciones corresponden a la variedad Hass. En California se recomienda que las concentraciones de N deben ser de 2.0-2.3% y para el P de 0.08-0.17% (Lahav y Whiley, 2002).

Así mismo, Hernández-Valdez *et al.*, (2012), mencionan en su estudio realizado en el municipio de San Juan Parangaricutiro, Michoacán, que las hojas de aguacate Hass, presentaron concentraciones de N y P inferiores a aquellas con apariencia saludable.

Las altas concentraciones de N y P que se presentaron en este estudio se deben a las altas aplicaciones de fertilizantes que se realizan. Esto se debe en ocasiones al desconocimiento de los productores que no saben cuánto poner y por seguridad aplican todo lo que pueden y

en otras ocasiones a la recomendación de vendedores de agroquímicos o de técnicos asociados a estos vendedores que les sugieren aplicar más de lo necesario para derivar un beneficio económico de la compra de los fertilizantes. La falta de acompañamiento y asesoría profesional institucional a los productores, aunada a los escasos estudios publicados sobre la fertilidad de los suelos y del estado nutricional de los árboles, originan este problema de fertilización excesiva que perjudica tanto a los productores como al ambiente. Los productores no cuentan con servicios accesibles de laboratorio, ya que los análisis foliares suelen ser muy caros, al igual que no se han desarrollado programas de apoyo por parte de instituciones civiles y gubernamentales.

Los resultados de este trabajo mostraron que los niveles óptimos de N foliar se alcanzaron con aplicaciones de aproximadamente  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ , pero dentro las huertas estudiadas habían aplicaciones hasta por  $600 \text{ kg N ha}^{-1}$ . En el caso del P fue incluso peor que para el N, ya que incluso en las hojas de las huertas abandonadas que no han recibido fertilización por años, los niveles medidos fueron excesivos. Esto sugiere que hay grandes cantidades de fertilizante que no llegan a ser aprovechados por el cultivo y que seguramente son lixiviados hacia los cuerpos de agua. Ávilan (1989) y Tapia et al (2005), mencionan que la dosis a aplicar debe ser 65-165-90 de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O en las proporciones (%), 12.5-50-25 en prefloración normal (noviembre a diciembre) y 75-25-50 en cuajado y crecimiento de fruto (enero a junio), dependiendo siempre del análisis previo de suelo. Sin embargo, incluso dentro de la pequeña muestra de huertas de este trabajo, hubo aplicaciones de hasta 600 kg de N por hectárea. Para un cultivo de tal extensión e importancia socioeconómica en Michoacán y en todo el país, resulta imperativa la realización de más estudios relacionados con su fertilización y nutrición y de programas, materiales de asesoría y campañas para promover la optimización en la aplicación de fertilizantes.

Un resultado importante del trabajo fue que los niveles excesivos de N y P fueron registrados tanto en las huertas convencionales como en las orgánicas, lo cual confirma que las aplicaciones excesivas son generalizadas. Dado que tanto los productos sintéticos como los orgánicos tienen potencial contaminante. Resulta importante promover la optimización de cualquier tipo de fertilización y así mantener los árboles en un rango adecuado-óptimo; que desde el punto de vista agronómico sigue permitiendo alcanzar una mejor y alta

producción. Por otra parte, desde el punto de vista ambiental se reducirían los excesos de fertilización, lo cual al ocurrir, los nutrientes no pueden ser asimilados por los árboles y por ende los lixiviados terminan contaminando el suelo y el agua subterránea.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es usado para identificar la clorosis en algunos cultivos (Takebe y Yoneyama, 1989; Gitelson y Merlyak, 1998; Hansen y Schjoerring, 2003; de la Cruz *et al.*, 2011) seguido de la percepción visual por el color de las hojas. Sin embargo, en este trabajo no se encontró relación alguna del NDVI con el N y P total medidos en las hojas. La muy baja variación de los valores de reflectancia puede deberse a factores ambientales tales como el espesor de la hoja y la variación en el contenido de agua de la hoja, así como del viento y la humedad e incluso la variación de otras fuentes como el sol, el ángulo geométrico y la posición de los árboles asociados con las hojas. En este estudio se trató de controlar el ángulo y la posición de las hojas, pero los otros factores mencionados relacionados con el clima quedan fuera del control posible.

Se menciona que otro factor importante que puede afectar los valores de la reflectancia es la fecha o tiempo en que se realiza el muestreo de la reflectancia (Takebe y Yoneyama, 1989; Peñuelas *et al.*, 1994; Dillen *et al.*, 2012). APROAM (2009), menciona que el periodo ideal para el muestreo para el análisis foliar se debe realizar entre mediados de mayo y finales de agosto fechas en la que se aplica la fertilización el cual permite encontrar mayor variabilidad de concentraciones en las hojas, pero puede hacerse hasta noviembre. El nuestro se realizó en octubre del 2012, buscando que las fechas coincidieran con las mismas en las que fueron tomadas imágenes de satélite World View 2 de la franja aguacatera de Michoacán, cuyas bandas espectrales permitirían hacer posteriormente una asociación entre el NDVI y las concentraciones de N y P medidas en las huertas y un mapeo en regiones más grandes.

La falta de relación entre los valores obtenidos de NDVI y las concentraciones foliares de N y P impidieron realizar avances en este aspecto. Esto resulta sorprendente por las claras variaciones por lo menos en las categorías de concentración de N foliar y en los datos de color. Una explicación probable para la escasa variación en las mediciones de NDVI es el nivel de resolución del aparato utilizado para medir el NDVI. El medidor FieldScout CM 1000 es un medidor económico que ha sido usado exitosamente para medir el NDVI en

manzanos (Perry y Devenport, 2007); sin embargo, la mayoría de los trabajos publicados han usado medidores más costosos de mejor resolución (Takebe y Yoneyama, 1989; Monje y Bugbee, 1992; Singh *et al*, 2011, Yuzhu *et al*, 2011). Sería recomendable examinar la relación entre nutrición foliar y NDVI con otro aparato para determinar si es un problema de resolución o es un problema de baja variación intrínseca a las hojas de aguacate.

Las relaciones negativas encontradas en esta investigación entre los componentes del color R y G y los contenidos de N total en las hojas, coinciden con las que observaron Vibhute y Bodhe (2013) en viñedos, pero a diferencia del presente estudio que no encontró relación con la banda B, ellos obtuvieron que la banda B sí mostró una relación significativamente positiva. No es de sorprender que no existiera relación de ninguna banda de color con la concentración de P, ya que casi todas las muestras de hojas contenían niveles excesivos de P.

Al separar las relaciones entre nivel de N y color de las hojas por la posición del punto muestreado en el árbol, se pudo observar que la menor relación fue de 0.3076 para el lado Este, y aumentó a 0.3935 para el lado Oeste, a 0.4509 para el lado Norte, y a 0.6596 para el lado Sur. Por lo tanto, la mejor posición para examinar el nivel nutricional de las hojas de aguacate en Michoacán fue la orientación Sur. Este resultado se asemeja a los encontrados por Yuzhu *et al*. (2011), en el caso del nitrógeno donde se encontraron relaciones completamente negativas entre el coeficiente de correlación y la concentración de nitrógeno en las hojas de chile pimiento (*Capsicum frutescens*). Takebe y Yoneyama (1989), en contraste, encontraron estrecha correlación entre la escala de color y el contenido de nitrógeno en las láminas de las hojas enteras en cultivos de arroz en donde las líneas de regresión mostraron mayor diferencia en las etapas de crecimiento. Así mismo Singh (2011), menciona que en cultivos de maíz encontró variaciones en la etapa de crecimiento. En este estudio se buscó trabajar con árboles adultos de aguacate para evitar la variación asociada a las etapas de crecimiento, por lo que se asume que este no fue un factor de interferencia en las relaciones estudiadas.

## 11. CONCLUSIÓN

Son muchos los factores que pueden afectar el rendimiento y calidad de los cultivos y la nutrición es una de los más importantes. Se han desarrollado tablas/guías de color para una gran cantidad de cultivos, sobretodo anuales, mediante estudios como el del presente trabajo, los cuales han sido utilizados para la determinación de deficiencia y excesos de nitrógeno, y como indicadores de la cantidad de fertilizante que se debe aplicar (Ulrich y Fills 1969; Snowball y Robson 1991; Hozier y Bradley 1999; Futch y Tucker, 2000). La guía de color desarrollada con los resultados del presente trabajo es el primer paso en la estructuración de un material de apoyo a los productores que debería ser ampliada y mejorada para evaluar integralmente el N, el P, e idealmente también el K. Sin embargo, dicho desarrollo está más allá del tiempo y los recursos asignados para el proyecto que financió este trabajo y debería ser continuado posteriormente.

### **El presente estudio mostró que:**

- El análisis de las concentraciones foliares indicaron que del total de las hojas estudiadas el 48.4% presentaron deficiencias de nitrógeno y el 96.6% un exceso de fósforo.
- Las concentraciones nutricionales de N propuesto permitieron una mejor distribución de los valores determinados en laboratorio para elaborar la guía de colores hecha en este trabajo, donde se puede observar una variedad que va del verde-amarillo hasta el verde oscuro e intenso de la hoja.
- La relación entre el N total medido y el N aplicado indicó que el nivel foliar óptimo de N se alcanzó con aplicaciones de hasta 100 kg de N por año por hectárea. Para el P, los resultados sugieren que en estas zonas se requiere en cantidades muy bajas que no fue posible definir porque toda la muestra, incluso las hojas de las huertas abandonadas tenían niveles excesivos. Los datos mostraron que el N y el P se aplican en exceso, que no es aprovechado por el árbol y por ende terminará en la contaminación de los mantos acuíferos.

- El NDVI mostró una variación mínima dentro de la muestra de hojas y por lo tanto no hubo relación entre el NDVI y el N y P total medido.
- Las bandas de color roja (R) y verde (G) de la hoja mostraron relación negativa con el N total medido en las hojas, en contraste con la azul (B) que no mostró relación. Tampoco hubo relación del color con los niveles de P, por la baja variación de los niveles de P dentro de las muestras.
- Los resultados sugieren que la fertilización es excesiva tanto en huertas convencionales como en huertas orgánicas y por lo tanto el potencial de contaminación de las huertas es alto, por lo que resulta importante promover la optimización de cualquier tipo de fertilización.
- Los resultados y la guía de color elaborada a partir de este trabajo aportarán información a los productores para reducir el gasto en fertilizantes y la contaminación originada por la lixiviación de nutrientes del suelo de sus huertas.

## 12. REFERENCIAS

- Aguilar, S. 2009. Estudio comparativo del estado nutrimental de hojas de aguacate cv. Hass con síndrome del moteado en huertos de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán. 10-13.
- Alcántar, J. J.; Anguiano, J.; Coria, V.M.; Hernández, G.; Ruiz; J.A. 1999. Áreas potenciales para el cultivo del aguacate (*Persea americana* cv Hass) en el Estado de Michoacán, México. Revista Chapingo Serie Horticultura. 5:151-154.
- Aoki, M.; Yabuki, K.; Totsuka, T.; Nishida, M. 1986. Remote Sensing of Chlorophyll Content of Leaf (I) Effective Spectral Reflection Characteristic of Leaf for the Evaluation of Chlorophyll Content in Leaves of Dicotyledons. Environ. Control in Bio. 24 (1), 21-26.
- APROAM. 2000. Consideraciones generales en la fertilización del aguacate. Boletín el aguacatero. Junta Local de Sanidad Vegetal. En: <http://www.aproam.com/boletines/aguacatero.html>
- APROAM. 2001. Contenido e índice de balance nutrimental en plantaciones comerciales de aguacate cv Hass en Michoacán. Boletín el aguacatero. Junta Local de Sanidad Vegetal. En: <http://www.aproam.com/boletines/aguacatero.html>
- APROAM. 2002. El agua como recurso natural renovable y la cubierta vegetal en la zona aguacatera de Michoacán. Boletín el aguacatero No. 58.
- APROAM. 2005. La materia orgánica en la nutrición mineral de los cultivos. Boletín el aguacatero. Junta Local de Sanidad Vegetal. En: <http://www.aproam.com/boletines/a43.html>.
- APROAM. 2005. La materia orgánica en la nutrición mineral de los cultivos. Boletín el aguacatero. Junta Local de Sanidad Vegetal. En: <http://www.aproam.com/boletines/a43.html>.
- APROAM. 2006. La agricultura orgánica en el mundo. Boletín el aguacatero. Junta Local de Sanidad Vegetal. En: <http://www.aproam.com/boletines/aguacatero.html>

APROAM. 2009. Boletín el aguacatero No.57 disponible en: <http://www.aproam.com/boletines/a57.html>

APROAM. 2009. Fenología del aguacate (*Persea americana* Mill) CV Hass en cuatro diferentes altitudes del Municipio de Uruapan, Michoacán. Boletín el aguacatero No. 24. En: <http://www.aproam.com/boletines/aguacatero.html>

Arango, J. 1992. Experiencias sobre la agricultura natural en México. Agricultura sostenible: un enfoque ecológico, socioeconómico y de desarrollo tecnológico. Memorias II simposio y I reunión nacional. Pp. 21-22.

Astier, M.; Merlin-Uribe, Y.; Villamil-Echeverri, L.; Garciarreal, A.; Gavito, M. and Masera, O. 2014. Energy balance and greenhouse gas emissions in organic and conventional avocado orchards in Mexico. *Ecological Indicators* (43) 281-287.

Ávilan, R. 1989. La fertilización del aguacatero. Instituto de investigaciones agronómicas. FONAIAP DIVULGA no.31.

Bárceñas O.A.E, Molina E.J., Huanosto M.F y Aguirre P.S. 2003. Contenido de Macro y Microelementos en hojas, flor y fruto de aguacate “Hass” en la región de Uruapan, Michoacán. *Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate)*. Pp 363-371.

Bisono- Perez, S. y Hernandez, J. R. 2008. Guía tecnológica sobre el cultivo de aguacate. Santo domingo, D. N. 50 pág.

Bravo-Espinosa, M; Mendoza, M. E.; Carlon A. T; Medina, L., Sánchez J.T. y Paéz R.. 2012. Effects of converting forest to avocado orchard on top-soil properties in the trans-Mexica volcanic system, Mexico. *Land Degradation and Development* DOI: 10.1002/ldr.2163.

Burgos, A.; Anaya, C.; Solorio, I. 2011. Impacto ecológico del Cultivo de Aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Definición de una Tipología de Productores. Informe final a la Fundación Produce Michoacán (FPM) y la AALPAUM.

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA/UNAM Campus Morelia). Morelia, Michoacán, 90 pp.

Cárdenas-Navarro, R.; Sánchez, J. M.; Farías, R.; Peña, J. J. 2004. Los aportes de Nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 10 (29): 173-178.

Carlson, T. N. and Ripley, D. A. 1997. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sens. Environ.* 62: 241-252

Chirinos, H. 1999. Fertilización del aguacate. *Informaciones Agronómicas. INPOFOS.* 16 pág.

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Compton, O. C.; Granville, W. C.; Boyton, D., and Phillips, E. S. 1946. Color standards for McIntosh Apple leaves. New York (Cornell) *Agric. Exp. Sta. Bull.* 824.

Coria, A. V. M. 2009. Tecnología para la producción de aguacate en México. Libro Técnico Núm. 8. SAGARPA-INIFAP 2ª Edición y 1ª Reimpresión. Uruapan, Michoacán, México.

CONANP. 2009. Programa de conservación y manejo: Parque Nacional Barranca del Cupatitzio. 174 pág.

Cui, D; Li, M and Zhang, Q. 2009. Development of an optical sensor for crop leaf chlorophyll content detection. *Computers and Electronics in Agriculture* 60: 171-176.

Curran, P.J.; Dungan, J.L.; Macler B.A. and Plummer, S.E. 1991. The effect of a red leaf pigment on there lationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sens. Environ* 35: 69-76.

Decoteau, D.R.; Wilson, S.B.; Ray, C.L. and Hatt G. 1996. A plant physiologist's view of the perception of light and color by plants. Proc. Amer. Soc. for Plasticulture 26:158-163.

Demarez, V. and Gastellu, J.P. 2000. A modeling approach for studying forest Chlorophyll content. Remotesens. Environ. 71:226-238.

Dillen, S. Y.; Op de Beeck, M.; Hufkens, K.; Buonanduci, M. and Phillips, N. G. 2012. Seasonal patterns of foliar reflectance in relation to photosynthetic capacity and color index in two co-occurring tree species, *Quercus rubra* and *Betul apapyrifera*. Agricultural and Forest Meteorology 160: 60-68.

De la Cruz- Duran, J. 2008. Reflectancia e índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental de nitrógeno. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 79 pág.

De la Cruz- Duran, J; Sánchez, P.; Galvis, A. y Carrillo, J. A. 2011. Índices espectrales en pimiento para el diagnóstico nutrimental del nitrógeno. Erra Latinoamericana, vol. 29, núm. 3, julio-septiembre, pp. 259-265.

FAO. 1999. La agricultura orgánica. Comité de Agricultura. En: <http://www.fao.org/docrep/meeting/X0075s.htm>

Futch SH, Tucker DPH. 2000. A guide to Citrus nutritional deficiency and toxicity identification. Publication HS-797. Horticultural Science Department, University of Florida. IFAS Extension. 5 pp.

Gasga, P.R. 2011. Reflectancia en hojas de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.) para estimar contenido de nitrógeno. Tesis de doctorado. Colegio de postgraduados. , M Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 32 pág.

Gavito, M. E.; Astier, M.; Barajas, R.; García, E.; Cruz, J. y Ramírez, E. 2011. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción. 85 pág.

Gavito, E.; Astier, M.; Barajas, R.; García, E. y Cruz, J. 2012. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción. 92 pág.

Google earth-mapas. <http://earth.google.com> consulta realizada en 24/01/2013

González-Gervasio, C. 2011. Fertilización foliar con boro en aguacatero (*Persea americana* Mill). Tesis de Maestría. Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Colegio de postgraduados. 72 pág.

Gitelson, A.A. and Merzyak, M. N. 1998. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Adv. Space Res.* Vol. 22 No.5. 689-692.

Guillén-Andrade, H.; Lara-Chávez, B. N.; Gutiérrez-Contreras, M.; Ortiz-Cantón, M. y Ángel-Palomares, E. 2007. Cartografía Agroecológica del Cultivo del Aguacate en Michoacán. Morevallado Editores Morelia, Michoacán, México. 141 pág.

Gutiérrez-Contreras, M.; Lara-Chávez, M. B.; Guillén- Andrade, H. y Chávez-Bárceñas, A. 2010 Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *INTERCIENCIA*, vol. 35 N°9. 647-653 Pp. 647-653.

Hansen, P.M. and Schjoerring, J.K. 2003. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment* 86: 542-553

Hass, A.R. 1939. Avocado leaf symptoms characteristic of Potassium, Phosphate, Manganese, and Boron deficiencies in solution cultures. *California Avocado Association Yearbook* 24:103-109.

Hernández-Valdés, E. F.; Aguilar, S.; Aguiar, V. y Pérez, R. E. 2012. Concentración nutrimental en hojas de aguacate 'Has' con síntoma de moteado. *Revista mexicana de ciencia agrícola*. Vol. 3. 621-627.

Hozier S, Bradley C. 1999. Guide to symptoms of plant nutrient deficiencies. Publication AZ1106. The University of Arizona Cooperative Extension. 3 pp.

INIFAP. 2005. Consideraciones prácticas para el manejo del nutririago del aguacate en Michoacán.

En:

[http://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo\\_sectorial/Michoacan/6michoacan.pdf](http://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo_sectorial/Michoacan/6michoacan.pdf)

INIFAP. 2009. Impactos ambientales y socioe-conómicos del cambio de uso de suelo forestal. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro Campo Experimental Uruapan. Publicación Especial Núm. 2,80 pág.

INIFAP. 2012. Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertas de aguacate. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro Campo Experimental Uruapan. Libro técnico núm. 13. 110 pág.

Jackson, M. 1982. Análisis químico de suelos. Omega. 4 ed. Barcelona, España.66 pp.

Knight, R.J. Jr. 2002. History, distribution and uses. En The avocado: botany, production and uses. Eds A. W. Whiley, B. Schaffer and B.N. Wolstenholme. 416 pag.

Lahav, E. and A. Kadman. 1999. Avocado fertilization. International Potash Institute. Worblaufen-Bern/Switzerland. 22 pág.

Lamolda, H. 2008. Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes LANDSAT ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.

Legaz et al. 1995. Análisis de hojas, suelos y aguas para el diagnóstico nutricional de plantaciones de cítricos. Procedimientos de muestras. Generalitat Valencia Conselleriad'Agricultura , Pesca i Alimentació.

Lovatt, C.J. 1999. Manegement of foliar fertilization. Terra Latinoamerica. Universidad Autónoma de Chapingo. Pp. 257-264.

Maldonado-Torres, R.; Álvarez-Sánchez, M. E.; Almaguer-Vargas, G.; Barrientos- Priego, A. F.; García-Mateos, R. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero 'hass'. Revista Chapingo. Serie horticultura. Vol. 1, Núm. 1, enero-junio. Pp. 103-108.

Martínez, T. y Bejarano, F. 1992. La crisis de la agricultura industrial y la búsqueda de alternativas sustentables. Agricultura sostenible: un enfoque ecológico, socioeconómico y de desarrollo tecnológico. Memorias II simposio y I reunión nacional. Pp 15-20.

Medina, M. C. 2007. Efecto de la nutrición en árboles de aguacate (*Persia americana mil*) de un año con la aplicación de basacote 6M plus y la fertilización regional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de agrobiología.

Mendez-García, T.; Palacios-Mayorga, S.; Rodríguez-Dominguez, L. 2008. Análisis de suelo, foliar y de calidad del agua para el cultivo del aguacatero. Terra Latinoamericana, Vol. 26, Núm. 1, enero-marzo. Pp.75-84.

Molina, J. A., 2008. Contenidos de macro y micronutrientes en hojas y fruto de aguacate cv. Hass. Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de agrobiología "Presidente Juárez". Pág. 47.

Morales-Manilla, L.; Reyes-González, A.; Cuevas-García, G.; Onchi-Ramuco, M. 2012. Inventario 2012 del cultivo del aguacate y evaluación del impacto ambiental forestal en el estado de Michoacán. Morelia.

Murphy J. and Riley H. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chim. Acta 27: 31-36.

Monje, O. A. and Bugbee B.. 1992. Inherent Limitations of Nondestructive Chlorophyll Meters: A Comparison of Two Types of Meters. Hort Science 27(1): 69-71.

Peñuelas, J.; Gamon, J. A.; Fredeen, A. L.; Merino, J. and Field, C. B. 1994. Reflectance Indices Associated with Physiological Changes in Nitrogen- and Water- Limited Sunflower Leaves. Remote Sens. Environ. 48: 135-146.

Pérez, A. 2010. Zonificación ambiental y plan de manejo para la conservación del Rancho San Bernardino, Agua Prieta, Sonora. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. 169 pág.

Perry, E. and Davenport, J. 2007. Spectral and spatial differences in responses of vegetation indices to nitrogen treatments on Apple. *Computers and Electronics in Agriculture*. 59: 56-65

Quintero- Sánchez, Ruben. 2002. El cultivo del aguacate orgánico en México. Investigadores de la UMSNH. En: [http://cesavesin.gob.mx/memoria/organicos/AGUACATE\\_ORGANICO\\_EN\\_MEXICO.pdf](http://cesavesin.gob.mx/memoria/organicos/AGUACATE_ORGANICO_EN_MEXICO.pdf)

Ramírez-Ramírez, M.I. 2001. Los espacios forestales de la sierra de Aganguero (Estados de Michoacán y México), México: una revisión geográfica. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Madrid, España. 330 pág.

Ramírez-Sánchez, L.G. 2009. Evaluación de tierras para el cultivo de aguacate de acuerdo con el conocimiento local del paisaje en la región del pico de Tancítaro, Michoacán. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Rincón, A. y G. A. Ligarreto. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Pie de monte Llanero colombiano. *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11(2): 122-128.

Robertson P.G., D.C. Coleman, C.S. Bledsoe, P. Sollins. 1999. Standard soil methods for long-term ecological research (LTER). Oxford University Press. pp 457.

Rong, Y. and Xuefeng, W. 2011. Effects of nitrogen fertiliser and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in northwest China. *Procedia Environmental Sciences*.11: 726-732.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., and Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (Type III Final Report), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

Salazar-García, S. 2002. Nutrición del aguacate, principios y aplicaciones. INPOFOS, INIFAP. Querétaro, México. 53 pág.

Sánchez, Colín. S., P. M. Oviedo, L. L. López, A. B. Priego. 2002. Historia del Aguacate en México.171-187

Secretaría de Economía. 2012. Monografía del sector aguacate en México: situación actual y oportunidades de Mercado. Dirección general de industrias básicas.

Singh, Varinderpal; Yadvinder- Singh; Bijay-Singh; H.S. Thind, AjayKumar and MonikaVashistha. 2011. Calibrating the leaf color chart for need based fertilizer nitrogen management in different maize (*Zea mays* L.) genotypes. Field Crops Research 120:276-282.

Smith, C. E. Jr. 1996. Archeological evidence for selection in avocado. Economic Botany. 20:169-175

Snowball K, and Robson AD. 1991. Nutrient deficiencies and toxicities in wheat: A guide for field identification. CIMMYT, Mexico, DF. 76 pp.

Stevens G, Motavalli P, Scharf P, Nathan M, Dunn D. 2002. Integrated Pest Management. Crop nutrient deficiencies and toxicities. University of Missouri Extension. IPM 1016. 18 pp.

Sturm, M.; Kacjan, N.; Zupanc, V.; Bracic, B.; Lujen, S. and Pintar, M. 2010. Effect of different fertilisation and irrigation practices on yield, nitrogen uptake and fertiliser use efficiency of White cabbage (*Brassicaoleraceavar. Capitata* L.). Scientia Horticulturae. 125: 103-109.

Takebe, M. and Yoneyama, Y. 1989. Measurement of Leaf Color Scores and Its Implication to Nitrogen Nutrition of Rice Plants. Tsukuba, Ibaraki, Japan. JARQ Vol. 23 No. 2. Pp86-93.

Tapia V., L. M.; Rico, H. R.; Vidales, I.; Toledo, R. y Larios, A. 2005. Consideraciones prácticas para el manejo de nutrientes del aguacate en Michoacán. INIFAP. Centro de investigación regional del pacífico centro campo experimental Uruapan. Pág. 42

Tapia V., L. M.; Larios, A.; Tapia, L.; Anguiano, J. y Vidales, I. 2007. Lixiviación de nitratos en dos sistemas de manejo nutricional y de agua en aguacate de Michoacán. In: Proceedings VI world Avocado congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate). Viña del Mar, Chile. 12-16.

Tapia, V. L. M.; Vidales, F. I.; Larios, G. A. y Coria, A. V. M. 2009. Consideraciones prácticas para el manejo del nutririogo en aguacate. Folleto técnico núm. 5. SAGARPA-INIFAP. 1ª Edición. Uruapan, Michoacán, México.

Tapia V., L. M.; A. Larios; I. Vidales; M. Bravo; A. Hernández; L. Tapia. 2011. Caracterización hidrológica del aguacate en Michoacán. Calms, Australia. Actas VII Congreso del Aguacate.

Tapia V., L. M.; Guzmán, A.; Contreras, A.; Fernández, V. y Barradas, L. 2012. Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (*Persea americana* MILL.). Rev. Int. Contam. Ambie. 28(3): 251-258.

Technicon. 1997. Technicon Industrial System. Method No. 329-74W/B determinations of nitrogen and/or phosphorus in BD acid digest. Technicon Industrial Sys. New York.

Thomas, J. R., and Gausman, H.W. 1976. Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentrations for Eight Crops. Agron. J. 69:799-802.

Velázquez M., J. A. y Fuentes J., J. 2004. Biodiversidad, hábitat y manejo en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R092. México, D. F. 65 pp.

Velázquez Montes, J. A. y J. Fuentes Junco. 2004. Biodiversidad, hábitat y manejo en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R092. México D. F.

Vibhute A. and Bodhe S. K. 2013. Color image processing approach for nitrogen estimation of vine yard. International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR). Vol.3, Issue 3, 189-196.

Yoder, B. J. and Daley, L.S. 1989. Development of a visible spectroscopic method for determining Chlorophyll a and b in vivo in leaf samples, spectroscopy. 5(8):44-50.

Yuzhu, H.; Xiaomei, W. and Shuyao, S. 2011. Nitrogen determination in pepper (*Capsicum frutescens L.*) plants by color image analysis (RGB). African Journal of Biotechnology Vol. 10 (77). Pp17737-17741.

## 13. ANEXO

Guía de colores para la identificación de deficiencias de N en huertos de aguacate.



Esta guía de colores se diseñó para ayudar a los productores de aguacate a ahorrar dinero en la aplicación de fertilizante ya sea químico u orgánico y a monitorear el nivel nutricional de las hojas de sus árboles sin tener que pagar por análisis químicos de laboratorio. Los valores y colores reportados en esta guía provienen de un estudio que se realizó en 10 huertas aguacateras de Michoacán para determinar el color que tienen las hojas con contenidos deficientes, adecuados y excesivos de nitrógeno. Los valores de nitrógeno y los colores se obtuvieron del análisis de 240 muestras de hojas.

Para el monitoreo, deben tomarse hojas de las puntas de las ramas completamente expuestas al sol (hojas del exterior de la copa del árbol que reciben sol directo) que sean de las más jóvenes pero ya estén completamente desarrolladas. Los mejores momentos para verificar el nitrógeno en las hojas van de julio a noviembre. Se recomienda contar cinco hojas hacia el interior de la copa, comenzando de la punta de la rama, como se muestra en la figura inferior y comparar el color del lado más verde de las hojas con los cuadros de color de la página opuesta. La coincidencia de estos colores permitirán estimar el estado del nitrógeno en el follaje. Se recomienda tomar las muestras de hojas de por lo menos 10 árboles de la huerta, seleccionados al azar.

