



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**LA PLAGA DE LA MOSCA EN EL CULTIVO DE LA GUAYABA, UNA
APLICACIÓN DE LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LA PROSPECCIÓN AGRÍCOLA**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A

EDUARDO VÁZQUEZ ANDRADE

ASESOR DE TESIS

DR. ROMÁN ÁLVAREZ BÉJAR



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico el presente trabajo:

A mi esposa Rosa María y a mis hijos Luis Eduardo y Erik
Ustedes son y serán siempre mi motivación para superarme en la vida...

A André Aleksey, el bebé más esperado en la familia
Hijo de mi hijo... sangre de mi sangre... Que este documento sea fuente de
inspiración para una vida de estudio y de interés en la ciencia cuando crezcas...

A mi madre Isabel Andrade y a mi padre Porfirio Vázquez
Por su confianza y por todo el apoyo que me han dado siempre...

A mis hermanos Marco Antonio y David
Por su apoyo incondicional siempre que lo he necesitado...

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, Dr. Román Álvarez Béjar por su valiosa dirección y apoyo constante para el logro del presente trabajo. Recuerdo con gratitud la sesión de campo en Calvillo, pues no habría sido posible realizarla sin su apoyo para contar con el espectroradiómetro de campo.

Al comité tutorial integrado por la Dra. Guadalupe Rebeca Granados Ramírez, la M en C. Gabriela Gómez Rodríguez, la M en U. Olivia Salmerón García y el Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera, por todos sus comentarios y sugerencias que permitieron mejorar la presentación de la tesis.

A mis profesores de la Maestría, Dra. Rosa María Prol Ledesma, Dr. Marco Antonio Torres Vera, Dr. Jorge Lira Chávez, Dr. Martín Díaz Viera, Dr. Ricardo Casar González, Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera, Dr. Román Álvarez Béjar, por compartir sin reserva sus conocimientos para la formación de futuros investigadores.

Al Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera, por su confianza y constante apoyo al grupo del INEGI durante su gestión como coordinador de la maestría. Su confianza nos llevó hasta el final del camino.

Al Dr. Raúl Aguirre Gómez por su valioso apoyo durante su gestión como coordinador de la maestría.

Al M.T. Juan Pablo Delgado de la Comisión Estatal de Sanidad Vegetal de Aguascalientes (CESVA), por su apoyo para tener acceso a la información del programa de control de la mosca de la fruta en Calvillo; así como a los Ingenieros Teodoro Armando Núñez y Francisco Javier Olmos Ruiz y a los Técnicos especializados José Concepción Moreno Vázquez y Rubén Esparza Camino del CESVA delegación Calvillo, por el apoyo recibido en los diferentes recorridos de campo que se realizaron durante el desarrollo de la investigación.

Al Ing. José Ángel González Ulloa de la Comisión para el Desarrollo Agropecuario del Estado de Aguascalientes (CODAGEA), al Ing. Samuel Chávez López del Distrito de Desarrollo Rural No. 01 de la Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y al M en C. Víctor Manuel Rodríguez Moreno del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), quienes amablemente me apoyaron con información del cultivo de la guayaba y de plagas para el desarrollo del presente trabajo.

A las autoridades del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), por buscar constantemente opciones para preparar mejor al personal que labora en el Instituto.

A mis compañeros de clase del INEGI, por el apoyo mutuo que fue esencial para lograr este objetivo.

A mi hermano Marco Antonio Vázquez Andrade, por el tiempo que destinó para ayudarme a repasar y fortalecer las bases necesarias para ingresar a la maestría.

Finalmente quiero agradecer especialmente a mi esposa Rosa María y mis hijos Luis Eduardo y Erik, por su comprensión y paciencia por el tiempo que dejamos de compartir en estos tres años que duró la maestría y la elaboración de la tesis. El sacrificio ha dado su fruto.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICAS	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos particulares.....	5
INTRODUCCIÓN	6
ANTECEDENTES	11
Cultivo de la guayaba y la mosca de la fruta en Calvillo	11
Fenología del árbol de la guayaba	13
Los huertos de guayaba.....	14
Manejo anual del cultivo de guayaba.....	17
Mosca de la fruta: <i>Especies Anastrepha</i>	19
Detección de la Mosca de la fruta	22
Control de la mosca de la fruta	26
La percepción remota y su aplicación para identificar características de vegetación.....	27
Principios básicos de la percepción remota	27
Características de las imágenes de satélite	34
Identificación de características de la vegetación mediante percepción remota.....	36
Clasificación de una imagen.....	38
Índices de vegetación.....	39
Transformaciones.....	41
Percepción remota aplicada a estudios de guayaba.....	42
AREA DE ESTUDIO	44

MATERIAL Y METODOLOGÍA	52
Trabajo de Campo	52
Toma de las lecturas de respuesta espectral en campo	53
Análisis de la información de campo.....	57
Integración de la información en un SIG	62
Procesamiento de la imagen de satélite.....	64
Procesamiento para la obtención de cobertura de guayaba	64
Procesamiento para validar las lecturas radiométricas de campo	78
RESULTADOS OBTENIDOS	83
Resultados de la clasificación supervisada.....	83
Resultados del cociente de bandas infrarrojo medio/rojo (IRM/R)	85
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
Páginas web consultadas y relacionadas con el tema	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diferentes tipos de guayabas.....	12
Figura 2	Patrón de cultivo de marco real.....	15
Figura 3	Mosca <i>Anastrepha Striata</i>	20
Figura 4	Larva de <i>Anastrepha Striata</i>	20
Figura 5	Mosca <i>Anastrepha Ludens</i>	22
Figura 6	Trampas McPhail y Multilure.....	23
Figura 7	Diversos aspectos de la revisión de las trampas.....	24
Figura 8	Diversos aspectos del Control químico.....	26
Figura 9	Elementos básicos de la percepción remota.....	28
Figura 10	Proceso de percepción remota.....	29
Figura 11	Espectro electromagnético.....	30
Figura 12	Interacción de la energía incidente.....	31
Figura 13	Reflectancia de la vegetación y del agua.....	31
Figura 14	Ejemplo de Firmas espectrales de la vegetación y el agua.....	32
Figura 15	Esquema de generación de una imagen de satélite multiespectral.....	33
Figura 16	Orbita de un satélite de percepción remota (polar).....	34
Figura 17	Representación de una imagen de satélite.....	35
Figura 18	Representación de una imagen de satélite multiespectral.....	35
Figura 19	Firma espectral de vegetación sana.....	37
Figura 20	Ubicación de Aguascalientes.....	46
Figura 21	Estado de Aguascalientes con su división municipal.....	47
Figura 22	Localización del Municipio de Calvillo.....	48
Figura 23	Coordenadas extremas del municipio de Calvillo.....	49
Figura 24	Detalle de la zona de acción del CESVA en el Municipio de Calvillo... ..	50
Figura 25	Zonas del CESVA en 2007.....	51
Figura 26	Configuración de parámetros de observación en el espectroradiómetro.....	54
Figura 27	Calibración del espectroradiómetro.....	55
Figura 28	Toma de lecturas de repuesta espectral de hojas y árbol sin presencia de mosca de la fruta.....	55
Figura 29	Lectura de la respuesta espectral de la guayaba en calmeo.....	56
Figura 30	Toma de lecturas de respuesta espectral en hojas del árbol de guayaba en Malpaso.....	57
Figura 31	LOLA y LOLA2, Espectros de hojas y de árbol de guayaba sin presencia de mosca de la fruta.....	58
Figura 32	LOLA6 y LOLA7, Espectros de hojas y de árbol de guayaba en etapa de calmeo y sin presencia de mosca de la fruta.....	59
Figura 33	LATER1 y LATER2, Espectros de hojas de árbol de guayaba con presencia de mosca de la fruta.....	59
Figura 34	LATER3a y LATER3b, Espectros de hojas y árbol de guayaba (segundo árbol muestreado) con presencia de mosca de la fruta.....	60
Figura 35	MAL1 y MAL2, Espectros de hojas y de árbol de guayaba con presencia de mosca de la fruta hace 10 semanas.....	61
Figura 36	Gráfica resumen de respuesta espectral.....	61

Figura 37 Ubicación de los sitios donde se tomaron lecturas de respuesta espectral.....	63
Figura 38 Composición en falso color Infrarrojo 321	66
Figura 39 Composición en falso color Infrarrojo 412	67
Figura 40 Firmas espectrales de algunas clases definidas en los polígonos de entrenamiento	70
Figura 41 Dispersograma de las firmas espectrales obtenidas bandas 4 y 2	70
Figura 42 Clasificación supervisada obtenida de las 4 bandas de la imagen de satélite	72
Figura 43 Comparación de coberturas de guayaba	76
Figura 44 Comparación de coberturas de guayaba 2007 vs 2000 y trampas con mosca.....	77
Figura 45 Extracto de Imagen resultado del aplicar el cociente de bandas infrarrojo medio/rojo (IRM/R)	79
Figura 46 Radio de análisis de valores del índice infrarrojo medio/rojo (IRM/R) ..	81
Figura 47 Trampa 091 con captura de mosca en la semana 8	86
Figura 48 Trampa 062 con captura de mosca en la semana 9	89
Figura 49 Trampa 050 con captura de mosca en la semana 10	90
Figura 50 Trampa 192 con captura de mosca en la semana 11	91
Figura 51 Trampa 032 con captura de mosca en la semana 12 y valores semejantes a las semanas 9 a 11	92
Figura 52 Trampa 094 con mosca en la semana 12.	93
Figura 53 Trampa 030 sin presencia de mosca	94
Figura 54 Histograma de datos agrupados con mosca	99
Figura 55 Histograma de datos agrupados sin mosca	99
Figura 56 Histograma de datos agrupados sin mosca	100
Figura 57 Analisis de normalidad de datos con mosca	101
Figura 58 Analisis de normalidad de datos sin mosca	101
Figura 59 Analisis de normalidad de datos con mosca en la semana 8.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Satélites SPOT Bandas espectrales y resoluciones.....	36
Tabla 2 Extracto de Parámetros de la Escena	64
Tabla 3 Matriz de error de la clasificación supervisada vs firmas definidas	74
Tabla 4 Evaluación de la clasificación supervisada.....	75
Tabla 5 Comparación del Índice de Kappa de Correspondencia (KIA) de las clases en las diferentes clasificaciones generadas	84
Tabla 6 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en trampas con presencia de mosca en las semanas 8 a 12 del 2007	87
Tabla 7 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en trampas sin presencia de mosca semana 11 del 2007	95
Tabla 8 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en cultivos con máximos valores. 96	
Tabla 9 Estadística básica por variable, datos de trampas con mosca por semana y sin mosca	97
Tabla 10 Estadística básica por variable, datos de trampas con mosca agrupados, excepto semana 8.....	98

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Cociente máximo y mínimo.....	104
Gráfica 2 Cociente promedio.....	104

ÍNDICE DE ECUACIONES

Índice MTD, Ecuación (1)	24
Cociente de bandas Infrarrojo cercano/rojo, Ecuación (2)	40
Índice NDVI, Ecuación (3)	40
Cociente simple de bandas rojo/infrarrojo cercano, Ecuación (4)	40
Índice SAVI, Ecuación (5).....	41
Vector Xc, Ecuación (6).....	69
Divergencia, Ecuación (7)	71
Divergencia transformada, Ecuación (8)	71
Índice de Kappa, Ecuación (9)	72
Cociente de bandas infrarrojo medio/rojo, Ecuación (10).....	78

RESUMEN

El Valle de Calvillo se caracteriza por ser la zona de mayor producción de guayaba en el país. Desde hace algunos años, la comercialización de este producto hacia el extranjero, particularmente a los Estados Unidos, se ha visto restringida por las normas sanitarias impuestas respecto a la presencia de plagas, específicamente la de la mosca de la fruta. Esto ha obligado a las autoridades y productores a establecer mecanismos de control de esta plaga, los cuales incluyen la ubicación de trampas, el monitoreo semanal de éstas así como la aplicación de actividades de control en lugares donde se ha detectado la plaga. Con la finalidad de evaluar la factibilidad de identificar mediante percepción remota los efectos de la presencia de la mosca de la fruta en huertos de guayaba, así como de determinar la cobertura de este cultivo y la superficie que ocupa en el municipio, se aplicaron técnicas de percepción remota apoyadas con la recolección de información en campo y con información de registros de captura de mosca de la fruta levantados por el Comité Estatal de Sanidad Vegetal del estado de Aguascalientes (CESVA) en el municipio de Calvillo. Mediante trabajo de campo se tomaron lecturas de respuesta espectral de árboles de guayaba con diferentes condiciones de presencia de esta plaga; así mismo se identificaron las principales zonas con cultivo de guayaba en diferentes estados del ciclo productivo. El análisis de percepción remota se realizó empleando una imagen de satélite multiespectral SPOT5 correspondiente al mes de marzo de 2007. Se aplicó la técnica de clasificación supervisada, se identificaron 16 clases de información presente en la imagen; entre ellas, tres correspondientes a diferentes estados del ciclo productivo de la guayaba. La separación de las firmas se evaluó mediante la divergencia transformada, obteniendo valores de 1950 a 2000 utilizando las cuatro bandas de la imagen para la definición de las firmas espectrales; esto significó la obtención de firmas con mínima sobreposición para la mejor definición de los elementos en la imagen. Se evaluó la exactitud de la clasificación mediante la matriz de error, la cual arrojó una exactitud global del 98.37%. Una vez identificada la cobertura de guayaba, se analizó la imagen en relación a la presencia de esta plaga. Las

lecturas de respuesta espectral tomadas en campo en árboles con y sin presencia de mosca de la fruta evidenciaron una diferencia significativa en la banda del infrarrojo cercano, entre los 1000 y los 1100 nanómetros (nm), por lo que se intentó identificar este efecto en la imagen de satélite mediante la obtención del índice del cociente de bandas infrarrojo cercano/rojo; sin embargo, el satélite SPOT5 no dispone de una banda en este rango del espectro electromagnético, por lo que no se pudo replicar el efecto sobre la imagen. No obstante este inconveniente, se utilizó el resultado del cociente de bandas infrarrojo medio/rojo directamente con la ubicación física de las trampas que reportaron captura de mosca de la fruta en la fecha de la toma de la imagen, así como con trampas libres de mosca; se encontró que en el grupo de trampas con reporte de mosca, el valor promedio del índice fue de 1.38, a diferencia del valor promedio del índice del grupo de trampas sin captura de mosca, que fue de 1.15. Así mismo se pudo identificar que el grupo de las trampas que reportaron mosca tres semanas antes de la toma de la imagen tienen un valor promedio del índice de 1.22, el cual es muy cercano al valor promedio de los sitios en donde no hay presencia de mosca. Esta diferencia detectada en el cociente de bandas infrarrojo medio/rojo podría asociarse con la presencia de la mosca de la fruta pues en lugares libres de ésta y en aquellos que ya han aplicado medidas de control, el índice es sensiblemente menor. Se sugiere incorporar más elementos de análisis que permitan validar la relación existente, preferentemente analizar imágenes con información en el ancho de banda de los 1000 a los 1100 nm, segmento del espectro electromagnético en el que el espectroradiómetro de campo detectó las diferencias. Así mismo, replicar este efecto con imágenes y datos de diferentes épocas.

ABSTRACT

Calvillo Valley was characterized as the greatest production area of guava in the country. In recent years, the marketing of this product to overseas, particularly to the United States, has been restricted by health regulations imposed with respect to the presence of pests, specifically the fruit fly. This has forced the authorities and producers to establish mechanisms for controlling this pest, which include placing traps, monitor them weekly as well as the implementation of control activities in areas where the pest has been detected. In order to evaluate the feasibility of using remote sensing to identify the effects of the presence of fruit fly in guava orchards and to determine the coverage of this crop and its surface area in the municipality, remote sensing techniques were applied supported with field data collection and record information of capture fruit flies raised by the State Committee for Plant Health of the State of Aguascalientes (CESVA) in the municipality of Calvillo. Through fieldwork took readings spectral response of guava trees under different conditions of presence of this pest, and it identified the main areas of cultivation of guava at different stages of the production cycle. The remote sensing analysis was performed using a multispectral SPOT 5 satellite image for the month of March 2007. Supervised classification technique was applied to identify 16 kinds of information in the image, among them three different states for the production cycle of the guava. The separation of the signatures were evaluated using transformed divergence, obtaining values from 1950 to 2000 using the four-band image to define the spectral signatures, this meant obtaining signatures with minimal overlap for better definition of the elements image. We evaluated the accuracy of classification by using the error matrix, which yielded an overall accuracy of 98.37%. Once identified the coverage of guava, the image was analyzed in relation to the presence of this pest. Spectral response readings taken in the field in trees with and without the presence of fruit flies showed a significant difference in the near infrared band, between 1000 and 1100 nanometers (nm), so it sought to identify this effect in satellite image by obtaining the index ratio near infrared / red bands, but the SPOT 5 satellite do not have a band in this range of

the electromagnetic spectrum, so it could not replicate the effect on the image. Despite this drawback, we used the result of the ratio of middle infrared / red bands directly with the physical location of the traps that reported capture fruit fly at the time of image making, as well as free of fly traps and was found that in the group traps with reports of fly, the average value of the index was 1.38, unlike the average value of the index of the group traps without capture of fly, which was 1.15. It also could identify that the group of fly traps reported three weeks before making the image have a mean index of 1.22, which is very close to the average value of the sites where no presence of fly. This difference found in the ratio of middle infrared / red bands may be associated with the presence of fruit fly, because free places for this and those that have already implemented control measures, the index is significantly less. It is suggested to incorporate further analysis to validate the relationship, preferably analyze images with information on the bandwidth of 1000 to 1100 nm, a segment of the electromagnetic spectrum in which the field radiometer detected differences. Also, replicate this effect with images and data from different periods.

OBJETIVOS

Objetivo general

Valorar la factibilidad de identificar diferencias entre árboles o zonas con árboles de guayaba afectados por la mosca de la fruta de aquellos que no tienen presencia o no están afectados por ésta; a partir de su respuesta espectral en imágenes de satélite multiespectrales y de la aplicación de técnicas de tratamiento digital de imágenes.

Objetivos particulares

- 1.- Identificar la cobertura de las plantaciones de guayaba a partir de técnicas de clasificación de imágenes empleadas en la percepción remota, las cuales permitan la segmentación de este cultivo del resto de tipos de vegetación en el municipio de Calvillo.
- 2.- Estimar la superficie cubierta por las áreas identificadas en las clasificaciones como parte de plantaciones de guayaba e identificar su tendencia positiva o negativa respecto a años anteriores.

INTRODUCCIÓN

La fruticultura es una de las principales actividades agrícolas en México y representa un medio para acceder a mejores niveles económicos en el sector rural nacional, debido al incremento en la producción y el consumo internacional de bebidas, jugos, pulpa, jaleas, ates, así como al reconocimiento de los beneficios nutricionales y vitamínicos que los frutales poseen (InfoASERCA 1 1996).

Por su situación geográfica México tiene la posibilidad de producir frutas tropicales, subtropicales, así como de climas templados y fríos. No obstante esta característica, son pocos los productos que se explotan comercialmente y mucho menos los que se exportan; los principales frutales de exportación en 1993 fueron: la naranja con 2 852 000 toneladas, el plátano con 1 950 000 toneladas, el mango con 1 151 000 toneladas, el limón con 847 000, toneladas, el aguacate con 680 000 toneladas, la manzana con 500 989 toneladas, la piña con 264 000 toneladas, la guayaba con 190 000 toneladas y la nuez con 47 000 toneladas (InfoASERCA 2 1996).

Recientemente se valora a la fruticultura como una actividad rentable cuando ésta se enfoca a la exportación. Para ello es necesario incorporar al proceso productivo el apoyo de numerosos estudios (del suelo, agua y clima entre otros) y la aplicación de paquetes tecnológicos para así pasar de los modelos extensivos de monocultivo que actualmente se tiene, a los modelos intensivos y con biodiversidad de cultivos.

Comparativamente con los granos y las oleaginosas que ocupan el 72% de la superficie agrícola, la fruticultura ocupa solo el 7% del total de la superficie agrícola; sin embargo, el valor de la producción de los frutales junto con las flores y las hortalizas es del 35%, muy cercano al 42% de los granos y las oleaginosas

(InfoASERCA 2 1996), lo que deja de manifiesto el potencial de desarrollo de la actividad frutícola así como su rentabilidad.

Particularmente para el caso de la guayaba, de acuerdo con el estudio mundial de este frutal, para 1997 la región de Aguascalientes y Zacatecas fue la de mayor superficie cosechada de guayaba, el 85%, del cual el 59% le corresponde a Aguascalientes (InfoASERCA 1998). Todavía en la actualidad se reconoce como la región más importante en la producción de guayaba, debido principalmente a su situación geográfica y a sus condiciones naturales, productivas y de mercado.

El estado de Aguascalientes se ha caracterizado por su constante cambio y adaptación en el desarrollo de cultivos agrícolas; así, en su momento fue un centro muy importante de producción de vid, lo que impulsó la industria vitivinícola y de jugos en el Estado; en otro momento han tomado importancia los cultivos de legumbres, dando impulso a la industria de verduras congeladas; recientemente se ha dado la conversión a huertos de hidroponía para la producción de jitomate de calidad de exportación; en otro momento se le ha dado impulso a cultivos como son el durazno y la cebolla entre otros.

No obstante esta capacidad de adaptación, en el Municipio de Calvillo que se ubica en el extremo suroeste del estado, las condiciones geográficas han sido propicias para que por muchos años se haya mantenido el cultivo de Guayaba, el cual representa la principal actividad económica en el municipio de Calvillo, que así como los ejemplos anteriores, ha dado lugar al establecimiento y crecimiento de una pequeña agroindustria relacionada a este frutal.

El cultivo de la guayaba en Calvillo constituye junto con la región del cañón de Juchipila, Zacatecas, la región con los mayores volúmenes de producción de este frutal a nivel nacional; para 1997, Aguascalientes reportó un promedio de 13.5 toneladas por hectárea y Zacatecas un promedio de 6.7 en comparación con el estado de Michoacán que tiene una producción promedio de 8 toneladas por

hectárea. La producción de guayaba en Aguascalientes representa el 35.9% de la producción agrícola utilizando 4.77% de la superficie total sembrada y 7.4% de la cosechada (ASERCA-ASPRA 1996). La población económicamente activa dedicada a la producción de este frutal fue del 3.9% del total dedicada a la agricultura en el estado (ASERCA-ASPRA 1996), lo que resalta su importancia económica. Desafortunadamente, a pesar de lo importante que es este cultivo en la región, a la fecha son pocos los apoyos tecnológicos que se implementan durante la producción para su desarrollo, control y monitoreo.

La utilización de la percepción remota en el monitoreo de cultivos constituye una de las principales aplicaciones de esta ciencia, que ha ido evolucionando constantemente; en sus inicios se utilizó para la prospección de los recursos naturales (Lira 1987). Actualmente los países desarrollados la emplean con la finalidad de monitorear las etapas productivas de cultivos o plantaciones importantes, inclusive para la elaboración de pronósticos de volúmenes de producción agrícola, los cuales repercuten económicamente en las zonas de producción (Research Information Centre 2009 y National Agricultural Statistics Service 2009).

En México se han realizado algunos esfuerzos por implementar el uso de la percepción remota en distintos ámbitos de la vida; el INIFAP y El Colegio de Posgraduados de Chapingo son dos instituciones que la utilizan en estudios enfocados a la agricultura (INIFAP 2003). Por otro lado, la percepción remota ha sido utilizada ampliamente en la academia en diversas universidades del país, con investigaciones de carácter científico, este es el caso de los institutos de Geofísica y de Geografía de la UNAM. Esta situación presenta un panorama en el que el productor agrícola ve distante la relación existente entre la investigación científica y la aplicación de ésta en las actividades que el desarrolla.

En el año 2003 tuvo lugar el Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura México-EUA, en el cual se presentaron investigaciones

agrícolas basadas en percepción remota y el uso de Sistemas de Información Geográfica. Este representó una oportunidad de tener un panorama real de la aplicación de la percepción remota en la investigación que se desarrolla en México y su aplicación en la agricultura.

La importancia económica y estratégica que tiene la guayaba como producto agrícola en el estado de Aguascalientes, particularmente en el municipio de Calvillo, aunado a los problemas que representa para este frutal la presencia de plagas como la mosca de la fruta, las cuales limitan su comercialización al exterior, son las circunstancias que sustentan la necesidad de presentar en forma clara y gráfica los beneficios que puede tener la aplicación de la percepción remota para la identificación y monitoreo de este cultivo o plantación.

El presente documento integra los trabajos realizados tanto de campo como de gabinete con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la investigación. Está organizado en seis capítulos identificados como: Antecedentes, Área de estudio, Materiales y metodología, Resultados obtenidos, Discusión de resultados y Conclusiones y recomendaciones.

En los antecedentes se hace una descripción de las características del árbol del fruto y de los huertos de guayabo, así como de la fenología del árbol. También se describe el manejo anual de este cultivo perenne. Se mencionan las plagas que afectan al cultivo específicamente la plaga de la mosca de la fruta, objeto de este estudio, detallando su desarrollo en las diferentes etapas del cultivo y los procedimientos para su control. Así mismo, se presenta en forma general el concepto de percepción remota, sus principios, las características de las imágenes de satélite y los procedimientos para la identificación de vegetación mediante percepción remota, basados en las firmas espectrales, en procesos de clasificación de imágenes y en la generación de índices y de transformaciones y se hace referencia a los estudios existentes de percepción remota aplicados al cultivo de la guayaba.

En el capítulo de área de estudio, se muestra la ubicación del estado de Aguascalientes y del municipio de Calvillo, lugar en el que se realizó la investigación. Al interior del municipio, se identifica en mapas la zona de estudio, la cobertura que tenía el cultivo de guayaba en el año 2000 y su relación con la zonificación que tiene la dependencia que controla la plaga.

En el capítulo de material y metodología presentan los trabajos de campo y gabinete realizados con la finalidad de sustentar la hipótesis de la investigación. Se muestra detalladamente la identificación de zonas de cultivo y la toma de lecturas de respuesta espectral, así como los espectros obtenidos. Se describe el procesamiento digital de la imagen de satélite utilizada, para la obtención de la cobertura del cultivo de guayaba, y de índices de vegetación que validen las diferencias encontradas en campo entre vegetación sana y afectada por la plaga.

El apartado de resultados resume el proceso de clasificación que permitió identificar el cultivo de la guayaba, la exactitud obtenida y la comparación con la cobertura del año 2000. Así mismo, presenta los resultados de los cocientes de bandas aplicados, principalmente del cociente simple de bandas y su relación con las zonas que presentaron presencia de mosca de la fruta.

En la discusión de resultados se hace referencia al comportamiento que tiene el índice del cociente de bandas, y su relación con la hipótesis inicialmente planteada; se presentan también resultados adicionales obtenidos con el procesamiento de la información.

Finalmente en las conclusiones y recomendaciones se presenta la validación de los objetivos alcanzados con esta investigación y se puntualizan las limitaciones de los resultados obtenidos. Se presentan además las sugerencias a considerar para la continuación o la realización de estudios de este tipo.

ANTECEDENTES

Cultivo de la guayaba y la mosca de la fruta en Calvillo

El árbol de la guayaba (guayabo), cuyo nombre científico es *Psidium guajava* L está considerado como un arbusto arborescente que se puede encontrar como árbol o arbusto perennifolio o caducifolio (Vázquez-Yanes et al 1999). Puede alcanzar una altura que va del los 3 hasta 10 metros. El tronco es generalmente torcido con muchas ramas poca altura del suelo y tienden a crecer simétricamente, adquiriendo forma de domo, presentando un sistema de raíces superficiales (Características observadas durante los primeros recorridos de campo en marzo de 2008).

Las hojas del guayabo presentan una coloración que puede ir del verde brillante al verde parduzco, tienen forma ovalada alargada y miden entre 5 y 18 cm de largo y de 3 a 6.5 de ancho (Perales et al 2005).

El fruto es una baya globosa casi ovoide y en algunos casos periformes con cáscara lisa y de color amarillo. Su tamaño puede variar según la variedad y el lugar donde se cultive, aunque puede medir hasta 8 cm de diámetro. Los huertos de Calvillo producen tres variedades diferentes de guayabas que son: Media China, China y Criolla (Figura 1), las cuales son consideradas por los productores de otras regiones como las más aromáticas y de mejor sabor, realizando injertos de estas variedades para mejorar sus productos (ASERCA-ASPRA Consultores, 1996).



Figura 1 Diferentes tipos de guayabas: Sel. 10 y 20 corresponden a Media China y Sel. 126 y 106 a China; Fuente: Manual para la producción Integral de la guayaba, Perales et al, 2005.

En forma silvestre se le encuentra principalmente en las zonas costeras por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm). El cultivo con fines comerciales se localiza en zonas subtropicales que van de los 30° latitud sur a los 25° latitud norte. En esta franja se localizan los principales lugares donde se produce este frutal (Perales et al, op. cit). Esta distribución está directamente relacionada con las condiciones climáticas que favorecen al cultivo de este frutal, donde la temperatura varía entre los 18 y los 30°C.

Aunque el cultivo tiene mejores condiciones de temperatura a altitudes menores a los 1000 msnm; en México, las zonas de cultivo comercial se localizan generalmente por arriba de los 1200 msnm y en el caso particular de Calvillo en Aguascalientes, la zona de cultivo se ubica a una altitud promedio de 1700 msnm (Información GPS obtenida durante los recorridos de campo de marzo del 2008).

Para su óptimo desarrollo, el cultivo de la guayaba requiere de una precipitación pluvial promedio anual de entre 650 y 2000 milímetros (mm) (Perales et al, op cit), aunque Benachio 1982 (en Ruiz 1999) dice que el requerimiento es de hasta 1000 mm.

Las características climáticas del municipio de Calvillo, con clima semiseco y una precipitación pluvial promedio anual entre 550 y 600 mm, la cual está muy por debajo de la demanda natural del cultivo, obliga a compensar esta falta de agua mediante el riego sistemático de las huertas (Perales et al, op cit) .

El cultivo de la guayaba puede desarrollarse en diferentes condiciones de suelos tanto arcillosos como arenosos, preferentemente con buena capacidad de drenaje y con un PH entre 4.5 y 7.5 En Calvillo predominan los suelos de tipo regosol, feozem, luvisol, litosol y planosol. Que en términos generales mantienen las características que favorecen el desarrollo del cultivo.

Si bien las condiciones del municipio de Calvillo no son las mejores por la falta de agua, se ha observado que la guayaba es un árbol que se adapta con facilidad a las condiciones climáticas adversas, al grado de que Calvillo y la región de los cañones de Zacatecas ha sido por mucho tiempo la principal zona productora de guayaba en México.

Fenología del árbol de la guayaba

Como se mencionó el árbol puede ser perennifolio/caducifolio, condición aparentemente contradictoria que se da por las prácticas de producción de la guayaba, en las que se induce al árbol a períodos de descanso en los que pierde todas sus hojas, para luego reactivar su metabolismo considerando el tiempo en que se desea cosechar frutos.

En condiciones normales, su período de floración abarca los meses de marzo a septiembre. La maduración del fruto se da de los 90 a los 150 días después de la floración. La polinización de las flores se apoya en la acción de los insectos, principalmente en las abejas.

El guayabo es un árbol de rápido crecimiento y llega a vivir hasta 40 años, aunque su ciclo productivo es de los 4 a los 15 años. Las practicas de forzar períodos de descanso, agotan más rápidamente al árbol ya que destruye gran parte de las raicillas que están en la parte más superficial del suelo, ocasionando un mayor gasto de energía del árbol para reponerlas (Perales et al, op cit).

Los huertos de guayaba

Los huertos de guayaba se localizan dispersos en la mayor parte del municipio de Calvillo; debido a que el cultivo para su desarrollo puede darse en suelos de características muy diferentes como son los suelos arenosos con buen drenaje, en suelos arcillosos o en suelos calcáreos.

La topografía de Calvillo y la presencia de heladas durante el invierno, hacen que se prefieran las zonas medias y altas para el establecimiento de huertos, ya que las zonas bajas que son las más susceptibles a las heladas (Información proporcionada por el técnico José Concepción Moreno Vázquez del CESVA durante los recorridos de campo en Marzo de 2008).

Los huertos establecidos siguen alguno de los sistemas de plantación definidos que son: El cuadrado o marco real, rectangular y hexagonal o tresbolillo (Perales et al 2005). El sistema de plantación se selecciona tomando en consideración algunos factores importantes, entre ellos, la pendiente del terreno, la accesibilidad al huerto, la facilidad que tengan los trabajadores para el desarrollo de sus actividades y el máximo aprovechamiento del huerto (Perales et al, op cit), situación que se identifica mediante los índices de producción por hectárea del

huerto, ya que una mayor densidad de árboles por hectárea según el arreglo de plantación del huerto, representa una mayor producción.

El sistema de marco real (Figura 2) es el más comúnmente utilizado (tradicional), consiste en plantar a distancias iguales entre árboles y entre líneas. La distancia a la que se plantan los árboles es de 7 metros (m) x 7 m; esto da una densidad promedio de 204 árboles por hectárea. Este patrón de sembrado es característico por qué forma cuadrados perfectos. (Esto se observó directamente durante los recorridos con personal del CESVA en marzo de 2008 y mediante el análisis de las ortofotografías de la zona).



Figura 2 Patrón de cultivo de marco real, Fuente: INEGI ortofotografía 2000.

El Sistema de rectángulo está siendo utilizado recientemente para incrementar la densidad de plantación, ubicando los árboles a distancias entre plantas e hileras de 3 m x 5 m, 3 m x 6 m o 4 m x 5 m y 4 m 6 m lo que evidentemente da una

configuración de rectángulo y una densidad 415 árboles para cuando se utiliza el patrón de 4 m x 6 m (Perales et al 2005).

En el caso de los huertos establecidos en Calvillo, predomina el arreglo de marco real con espaciamientos de 7 m x 7 m y de 6 m x 6 m, aunque las últimas huertas establecidas optan por el de 3 x 6 m. La disposición del número de árboles implica un manejo adecuado de las diferentes actividades, ya que las zonas saturadas de árboles pueden favorecer la competencia entre árboles así como favorecer a la presencia de plagas (CODAGEA-INIFAP sin año).

La superficie de los huertos en Calvillo es variable, según el plan rector del sistema-producto de la guayaba de la SAGARPA en Aguascalientes, el 76.4% de los productores poseen hasta 3 hectáreas; el 19.1% tiene huertos de entre 3 y 8 hectáreas y el 4.5% de los productores tienen huertos de entre 8 y 40 hectáreas (SAGARPA 2006).

El plan rector del sistema-producto de la guayaba, reporta que son 6877 hectáreas las que se tienen de huertos de guayaba en Calvillo, de las cuales 5838 corresponden a terrenos de propiedad privada y sólo 1039 son ejidales, según información de la planeación estratégica 2003-2004 del consejo de la guayaba de Aguascalientes, A.C (SAGARPA 2006).

El manual para la producción integral del cultivo de guayaba del 2005 difiere de la información presentada por el plan rector del 2006; menciona que la superficie que ocupan en total los huertos de guayabo en Calvillo es de aproximadamente 7594 hectáreas (SAGAR-INIFAP 1998). La diferencia en superficie que disminuye en 2006 en un 9.5% respecto a la cifra del 2005, se debe a los cambios que ha experimentado este cultivo en los últimos años.

Manejo anual del cultivo de guayaba

El proceso de producción de la guayaba exige que los productores realicen diferentes actividades durante todo el año en los huertos hasta que llega el tiempo de la cosecha; dentro de estas actividades están:

El calmeo, las podas que se realizan con diferentes fines, la cava, la fertilización ya sea química u orgánica, los riegos, el control de la maleza y el control de plagas y enfermedades.

El calmeo se aplica inmediatamente después de la cosecha, en el se induce al árbol a un período de descanso forzado retirándole el riego por algunos meses, lo que hace que pierda sus hojas. Este periodo de descanso se interrumpe al suministrar nuevamente riego al árbol, lo que lo hace productivo nuevamente obteniendo frutos en siete u ocho meses (Perales et al 2005). El calmeo se realiza con la finalidad de evitar que el árbol sea afectado por las heladas y como una forma de inducir el periodo de cosecha de los nuevos frutos, el cual se puede programar cuando hay poca producción y por lo tanto el precio del producto es mucho mayor.

En el tiempo en que se desarrolla un huerto se le realizan diferentes podas, según lo requieran los árboles. La primera es la poda de formación la cual se lleva a cabo en los primeros años del árbol para dejar su estructura como se desea que crezca. La poda de fructificación se realiza para preparar el árbol en condiciones de dar los mejores frutos. La poda de rejuvenecimiento se realiza para eliminar las ramas gruesas e improductivas, favoreciendo nuevos brotes que darán frutos. Finalmente la poda sanitaria se realiza para eliminar ramas que ya no producen frutos (CODAGEA-INIFAP sin año).

En Calvillo los productores realizan podas frecuentes para evitar que el árbol crezca más de 3 metros, con ello favorecen las labores de la cosecha así como un

manejo más cuidadoso de los frutos, por un lado cosechan todos los frutos y lo hacen sin que se lastime el fruto al caer de alturas superiores (ASERCA-ASPRA Consultores 1996).

La cava que consiste en remover la tierra de la capa superficial del cajete del árbol después de un período de calmeo, permitiendo una mejor irrigación del árbol y favoreciendo la aireación del suelo (SAGAR-INIFAP 1998).

La fertilización química u orgánica se realiza con la finalidad de recuperar los niveles de nutrientes del suelo y mejorar sus características físicas, también se aplica para darle vigor al árbol y mejorar las características de los frutos producidos (SAGAR-INIFAP 1998).

La aplicación de riegos constituye la actividad más costosa en el manejo anual del cultivo, los métodos de aplicación del riego son por gravedad y por micro aspersión. Los riegos varían entre 9 y 12 dependiendo de la textura del suelo que se tenga; si es arcillosa bastarán con 9 o 10 riegos, pero si es un suelo más poroso, serán de 11 a 12 riegos. En Calvillo el agua de los riegos proviene de las principales presas así como de una red de pozos profundos que extraen agua de las corrientes subterráneas.

El control de la maleza se realiza manualmente, en forma mecanizada o químicamente y se realiza después de la temporada de lluvias, en la que se desarrolla la maleza, así como previo a la cosecha; con esto se elimina la competencia de nutrientes con el árbol y se facilita la cosecha.

El control de plagas es una actividad muy importante en el proceso de producción de la guayaba, ya que de no llevarse a cabo, tendría efectos negativos sobre la producción de frutos y la calidad de los mismos. El árbol del guayabo se ve afectado por diferentes plagas, las cuales pueden tener efectos directos en los árboles o en los frutos, aunque hay otras que afectan de manera indirecta. Las

principales plagas que afectan a la producción de guayaba específicamente en la región de Calvillo y los cañones de Zacatecas, son: el Picudo de la guayaba (*Conotrachelus spp*), el Tremolillo (*Cyclocephala lunulata*) y la Mosca de la fruta (*Especies Anastrepha*) (Perales et al 2005).

El presente proyecto se enfocó particularmente en la plaga de la mosca de la fruta, dejando para otros estudios las otras plagas.

Mosca de la fruta: *Especies Anastrepha*

La especie de mosca *Anastrepha* que afecta directamente al fruto del guayabo, es la *Anastrepha Striata*, sin embargo hay otras especies de *Anastrepha* que aún cuando no afectan directamente al fruto de la guayaba en México, si están clasificadas como plaga del guayabo en otras partes del mundo, este es el caso de la *Anastrepha Ludens*. Hay también otras especies que han sido capturadas en menor proporción y son: la *Anastrepha Fraterculus*, *A. Obliqua* y *A. Lathana*.

La mosca *Anastrepha Striata* tiene en el guayabo a su hospedero ideal, por lo que es la principal especie que se trata de controlar para evitar que afecte la producción de guayaba. Se identifica porque es una mosca de color café – amarillo que presenta en el tórax un patrón característico de color negro en forma de herradura; otro aspecto físico importante en su identificación son las bandas de color café amarillo que presentan sus alas, que forman una S o un V invertida (Información fue proporcionada por el Ing. Francisco Javier Olmos Ruiz del CESVA durante los primeros recorridos realizados en la zona de trabajo en marzo de 2008). Las moscas hembras se identifican por su ovipositor que se prolonga por la parte posterior y que los machos no tienen (Figura 3).



Figura 3 Mosca *Anastrepha Striata*; Fuente: Manual para la producción integral de la guayaba, Perales et al 2005.

Esta mosca afecta al guayabo atacando sus frutos cuando están en la fase de maduración que se conoce como sazón. Aprovecha el fruto para cumplir su ciclo biológico y reproducirse.

La mosca hembra fecundada deposita los huevecillos insertando su ovipositor en las guayabas que se encuentran en estado de sazón, donde después de un período que varía entre uno y siete días, se liberan las larvas de las moscas dentro de la fruta (Figura 4), de la cual se alimentan dejando zonas blandas o bofas en la fruta como evidencia de su presencia, además de los piquetes en la fruta por donde los huevecillos fueron insertados (SAGAR-INIFAP 1998).



Figura 4 Larva de *Anastrepha Striata*; Fuente: Manual para la producción Integral de la guayaba, Perales et al 2005.

La mosca continúa su ciclo biológico dentro de la guayaba afectada por un período de 15 a 60 días durante los cuales crecen hasta 2 cm (Perales et al 2005). Su presencia, acelera la maduración del fruto, lo que ocasiona que se desprenda del árbol y caiga al suelo.

Una vez en el suelo, la larva sale del fruto para enterrarse aproximadamente a 10 cm de profundidad en el suelo y continuar con su ciclo biológico, pasando de larva a pupa. La pupa es una cápsula protectora que cubre totalmente a la larva para permitirle pasar al estado adulto. Este proceso tarda aproximadamente 8 días cuando se tiene las condiciones ideales de temperatura y humedad en el suelo. La moscas emergen para secar sus alas y continuar su crecimiento y alcanzar su madurez sexual entre los 5 y los 20 días después de haber emergido de la pupa (Perales et al, 2005).

Una mosca adulta puede vivir hasta 45 días en climas cálidos y algunos meses en climas templados, lo que les permite tener varias generaciones antes de morir.

Además de la *Anastrepha Striata*, la *A. Ludens* (Figura 5) es una especie considerada como plaga para la guayaba. Esta especie afecta directamente a los cítricos (Naranja dulce o agria, Limón en sus diferentes variedades, Lima, Toronja, Mandarina etcétera), aunque en otras partes del mundo también afecta a la guayaba, por lo que la presencia de esta mosca en las zonas de cultivo de guayaba es considerada por la regulación de Estados Unidos como razón restrictiva para no aceptar este fruto cuando provenga de zonas con presencia de esta mosca.



Figura 5 Mosca *Anastrepha Ludens*; Fuente: Condiciones para el manejo y control de fruta hospedera de la mosca de la fruta, gobierno del estado de Campeche, sin año.

Detección de la Mosca de la fruta

La detección de esta plaga se realiza de dos formas, por medio del muestreo de frutos y por la aplicación de trampeo (Información proporcionada por el Ing. Teodoro Armando Núñez del CESVA durante las primeras visitas de campo realizadas en Marzo de 2008).

El muestreo de frutos consiste en la recolección de 5 a 10 frutos (el equivalente a 0.5 kg) de cada uno de los árboles en los 4 puntos cardinales alrededor de las trampas, incrementando el número de muestras por hectárea si hay presencia de moscas en las trampas (Perales et al 2005).

Dentro del muestreo se considera la fruta caída ya que hay más probabilidad de presencia de larvas en estos frutos, lo que da buenos indicadores sobre presencia de larvas.

Los frutos muestreados son revisados para identificar la presencia de larvas dentro, esto permite verificar el estado de infestación del huerto, así como confirmar los resultados del trampeo.

El muestreo se realiza tanto de guayaba como de cítricos, ya que se pretende identificar la presencia tanto de *Anastrepha Striata* como de *A. Ludens* (Información proporcionada por el Ing. Francisco Javier Olmos Ruiz del CESVA durante los recorridos de marzo y mayo de 2008).

El trapeo consiste en la captura de ejemplares de *A. Striata* o *A. Ludens* mediante la ubicación de trampas (Figura 6) tipo McPhail que son como botellas de cristal con un hueco por la parte inferior, a las que se les agrega un atrayente líquido a base de proteína hidrolizada, bórax y 235cc de agua o atrayente sólido a base de pastillas Torula disueltas en 250 cc de agua (Información proporcionada por el técnico José Concepción Moreno Vázquez del CESVA durante los recorridos de trapeo los meses de Marzo, Mayo y Agosto de 2008).

Esta mezcla atrae a las moscas al interior de la trampa y al intentar salir de esa, caen en el líquido muriendo ahogadas o por efectos del veneno de la mezcla. Actualmente se están utilizando trampas “Multilure” de plástico, que resultan más prácticas en el llenado del atrayente.



Figura 6 Trampas McPhail y Multilure; Fuente: Condiciones para el manejo y control de fruta hospedera de la mosca de la fruta, Gobierno del Estado de Campeche, Sin año.

Normalmente se instala una trampa por hectárea, ubicándola a $\frac{3}{4}$ partes de la altura del árbol (Perales et al, op cit) seleccionado.

Las trampas son revisadas una vez por semana (Figura 7). La junta de sanidad vegetal a cargo de la zona de Calvillo tiene 350 trampas distribuidas en el municipio y realiza su revisión los días lunes de cada semana, con lo que se tiene el número de moscas capturadas para un día fijo.



Figura 7 Diversos aspectos de la revisión de las trampas; Fuente: Imágenes tomadas por el autor.

Una vez identificadas las moscas de la fruta presentes en el trampeo, se determina el índice MTD (Moscas Trampa por Día) (Ecuación 1) que se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{MTD} = M / T \times D$$

Ecuación (1)

Donde M es la cantidad de moscas capturadas, T es el número de trampas instaladas y D es el número de días de exposición de la trampa.

Ejemplo para un grupo de trampas:

$$M = 10$$

$$T = 25$$

$$D = 7$$

$$MTD = 10 / 25 \times 7 = 0.06$$

Para una sola trampa:

$$M = 3$$

$$T = 1$$

$$D = 7$$

$$MTD = 3 / 7 = 0.42$$

El valor límite del índice MTD para aplicar medidas de control por presencia de mosca de la fruta es de un $MTD = 0.08$; esto para impedir que la plaga alcance niveles de daño superiores al 5%

De acuerdo a este índice se establece la categoría fitosanitaria del Huerto de la siguiente manera a partir de la prevalencia de la plaga a partir del MTD:

Prevalencia nula $MTD = 0.00$

Prevalencia baja $MTD < 0.01$

Prevalencia media $MTD > 0.01$ y < 0.048

Prevalencia Alta $MTD > 0.08$

Control de la mosca de la fruta

Como resultado del trapeo y el muestro que se realiza en las diferentes zonas, se toma la decisión de realizar acciones de control de la plaga, las cuales pueden ser: El Control químico, Control Mecánico y Control biológico.

El control químico se realiza mediante la aspersión de insecticida, fumigando la zona de la trampa donde se detectó presencia de mosca de la fruta, hasta un radio de 250 m de la trampa. Si la mosca encontrada fue *Anastrepha Ludens*, las aspersiones se realizan durante 8 semanas posteriores a la detección de la mosca; si por el contrario se encontró *A. Striata*, las aspersiones se realizan durante 12 semanas (Información proporcionada por el técnico del CESVA Rubén Esparza Camino durante los recorridos de control químico realizados en agosto de 2008) (Figura 8).



Figura 8 Diversos aspectos del Control químico; Fuente: Imágenes tomadas por el autor.

El control mecánico consiste en la eliminación total de los frutos de los arboles afectados con mosca de la fruta, retirándolos del árbol y quemándolos, evitando que maduren o se descompongan en el huerto (Perales et al 2005). Este control contempla también la destrucción de hospederos silvestres cercanos a las zonas donde se ha detectado la mosca.

El control biológico contempla la liberación de parasitoide *Diacbasmimorpha longicaudata* que afectan a la mosca de la fruta en alguna de sus etapas de vida. La liberación se lleva a cabo por parte de los comités estatales de sanidad vegetal. De 1994 a 1997 se liberaron 208 millones de parasitoides en Aguascalientes (Perales et al, 2005). Así mismo se libera mosca estéril de las especies *Anastrepha Ludens* y *A. Striata*. En Aguascalientes se liberaron de 1994 a 1997 423 millones de moscas estériles de la especie *A. Ludens* (Perales et al 2005), recientemente se ha realizado la liberación de *A. Striata*.

La percepción remota y su aplicación para identificar características de vegetación

Para comprender cómo es posible realizar la identificación de elementos presentes en la superficie de la tierra, como son ciertas características de la vegetación a partir de una imagen tomada por un satélite, es preciso referir algunos conceptos básicos de la percepción remota, las características de las imágenes multispectrales SPOT 5, así como los procesos realizados a las imágenes de satélite.

Principios básicos de la percepción remota

La percepción remota es la ciencia que se encarga de obtener información de un medio físico sin estar en contacto en él; es decir a distancia (Lira 1987),

detectando y registrando la energía reflejada o emitida y procesando, analizando y aplicando la información así obtenida (Fundamentals CCRS 2007).

Para poder hacer percepción remota, es necesaria la interacción de tres elementos: la fuente de iluminación, el paisaje o terreno y el sensor remoto (Lira 1987), (Figura 9). Si bien estos tres elementos son básicos, en el proceso de la percepción remota intervienen también la interacción de la radiación con la atmósfera, la interacción con los objetos en tierra (blancos), la transmisión recepción y procesamiento de la imagen, así como el análisis de esta y finalmente la aplicación del análisis realizado (Fundamentals CCRS 2007), (Figura 10).

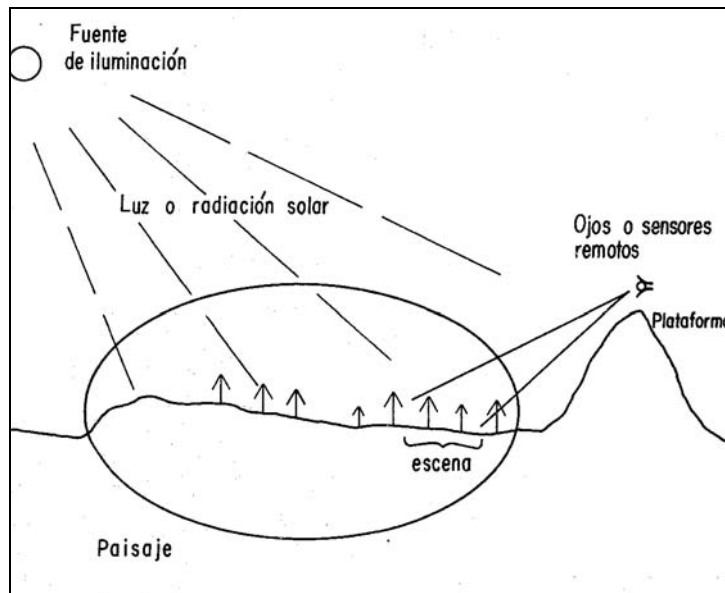


Figura 9 Elementos básicos de la percepción remota, Fuente: Lira 1987.

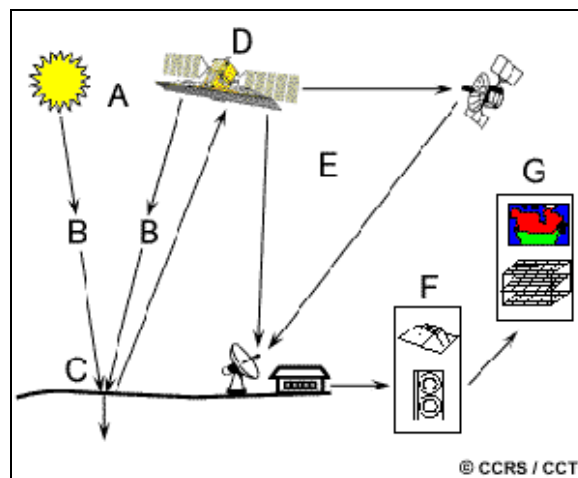


Figura 10 Proceso de percepción remota: A y D son las fuentes de iluminación, B es el recorrido de la energía electromagnética, C es la escena o paisaje, E corresponde la proceso de transferencia de la información recibida en el satélite a la estación receptora, F es el almacenamiento y procesamiento de imágenes y G es la generación de la imagen. Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

La fuente natural de iluminación para el hombre es el sol, el cual emite luz en forma de radiación electromagnética que incide sobre el paisaje, iluminándolo de tal forma que es posible observar los elementos presentes en él. Existen satélites que proporcionan su propia fuente de iluminación, a éstos se les denomina satélites activos, y a los que dependen de la iluminación del sol, satélites pasivos. La energía emitida por el sol abarca el espectro electromagnético completo (Lo 1986) (Figura 11), mientras que la fuente de iluminación de los satélites activos puede ser emitida en una región específica del espectro electromagnético (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etcétera).

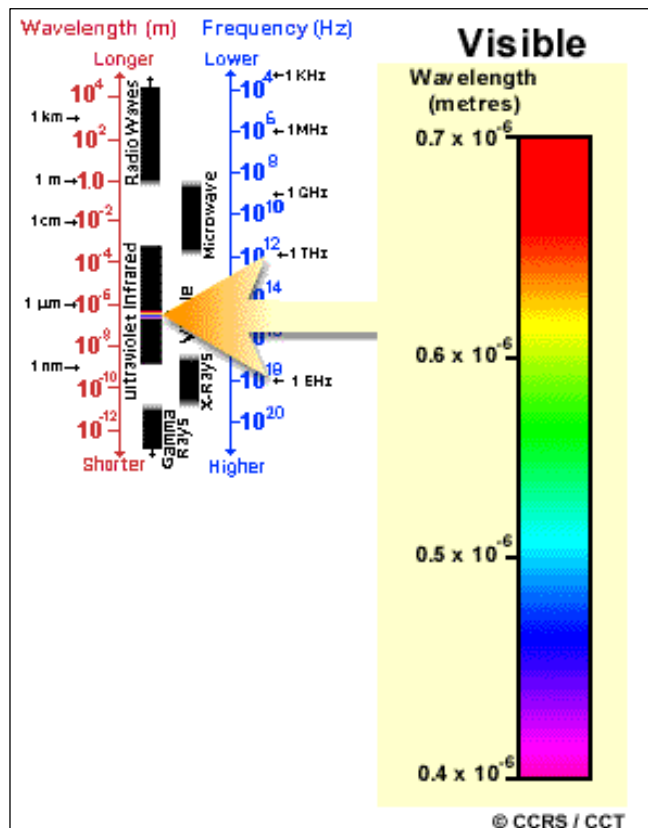


Figura 11 Espectro electromagnético, Longitud de onda (Wavelength) en metros y Frecuencias (Frequency) en Hertz. El espectro muestra las regiones según el tipo de onda: rayos gama (gamma rays), rayos X (X rays), ultravioleta (ultraviolet), visible, infrarrojo (infrared), microondas (microwave) y ondas de radio (radio waves). Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

El paisaje es el medio físico y está constituido por el terreno o superficie de la tierra y todos los elementos que se pueden identificar sobre él (ríos, ciudades, bosques, formaciones rocosas, etcétera). La característica tridimensional del paisaje es resaltada por la presencia o ausencia de los diferentes elementos que lo conforman, haciendo de este un elemento muy complejo que no es posible controlar (Lira 1987).

La radiación electromagnética emitida por la fuente de iluminación incide directamente sobre los elementos presentes en la escena. Debido a las características particulares de los elementos presentes, la energía incidente puede

ser absorbida, transmitida o reflejada (Lo 1986) (Figura 12). A la cantidad de radiación electromagnética reflejada por los elementos de la escena se le conoce como albedo o reflectancia.

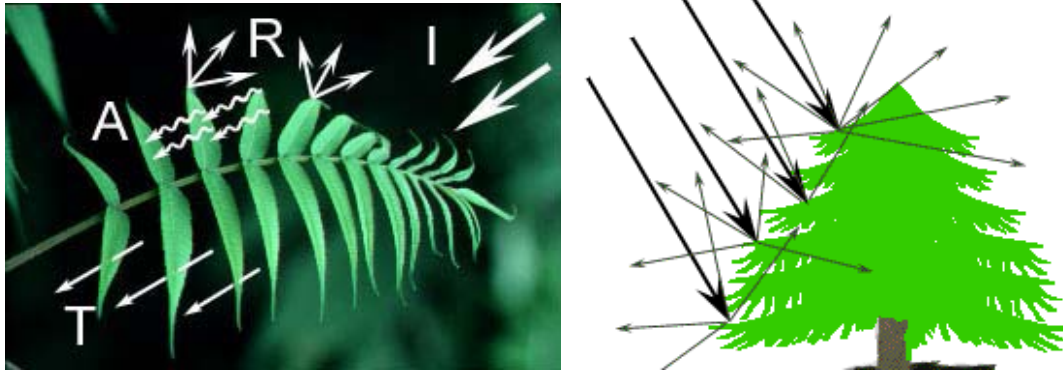


Figura 12 Interacción de la energía incidente (I) con los elementos del paisaje: La energía puede ser reflejada (R), absorbida (A) o transmitida (T). Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

El valor de la brillantez o reflectancia de los elementos presentes en la escena es variable según las características propias de cada elemento y de cómo son registradas por la frecuencia que le corresponde a la banda. Así, la vegetación tiene característicamente valores altos de reflectancia en el Infrarrojo cercano y medio, mientras que los cuerpos de agua tienen valores cercanos a cero en la misma frecuencia (Figura 13). A esta característica se le conoce como respuesta espectral y cada elemento tiene una diferente (Fundamentals CCRS 2007).

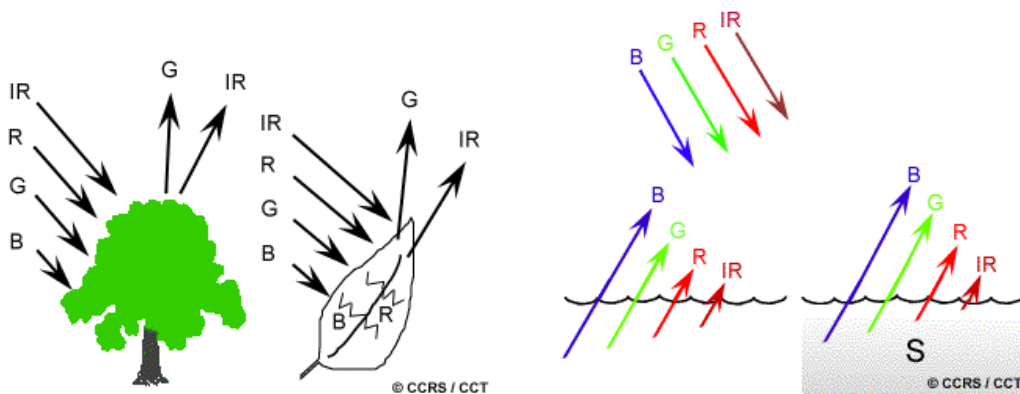


Figura 13 Reflectancia de la vegetación y del agua, las diferentes longitudes de onda interactúan de manera diferente en ambos medios: IR corresponde al infrarrojo, R al rojo, G al verde y B al azul. La letra S hace referencia al mar. Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

La definición detallada de la respuesta espectral de un elemento en diferentes longitudes de onda o frecuencias, nos permite generar su firma espectral, la cual define unívocamente a cada elemento, permitiendo diferenciarlo de entre un grupo de elementos parecidos (Figura 14).

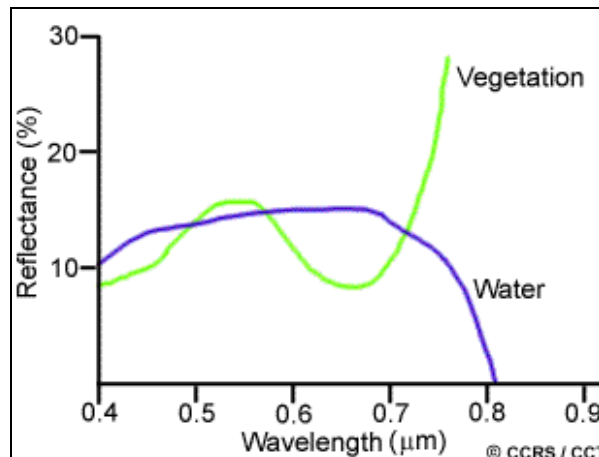


Figura 14 Ejemplo de Firmas espectrales de la vegetación (vegetation) y el agua (water) a partir del porcentaje de reflectancia (reflectance) en las diferentes longitudes de onda (wavelength). Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

El sensor remoto es el dispositivo que permite captar la cantidad de energía o radiación reflejada por los elementos presentes en la escena. El sensor del satélite detecta sólo una parte de la escena denominada campo instantáneo de vista (CIV o IFOV por sus siglas en inglés), el cual está determinado por la resolución espacial del sensor y por la altura a la que órbita el satélite (Lira 1987).

El sensor remoto está formado por un sistema óptico que recibe la radiación electromagnética reflejada, la cual es conducida a través de un medio conductor, a unos detectores diseñados y calibrados para longitudes de onda específicas de energía electromagnética (Sabins 1986); para ello, antes de los detectores se encuentran unos filtros que separan la energía dejando pasar únicamente la longitud de onda a la que está calibrado el detector.

Cada detector mide la cantidad de radiación por ángulo sólido por unidad de tiempo ($W/m_sterad/s$). El voltaje que sale del detector pasa por un convertidor análogo/digital, que lo registra en una escala de valores generalmente de 0 a 255 (8 bits) que representan el valor de brillantez que corresponde a cada CIV (Lira, 1987).

La información de salida de cada detector formará lo que es la imagen en una banda específica correspondiente al rango de calibración del detector; así, se tiene que dependiendo del número de detectores, será el número de bandas que se generarán de la imagen, las cuales pueden estar diferentes regiones del espectro electromagnético (Figura 15).

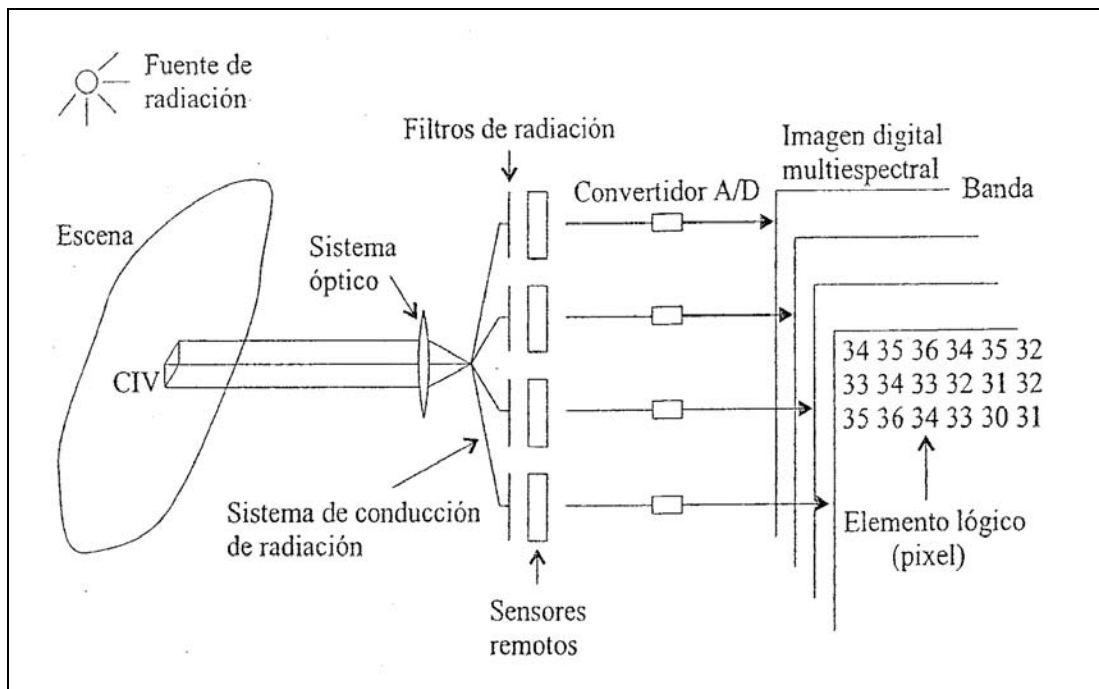


Figura 15 Esquema de generación de una imagen de satélite multispectral. Fuente: Lira 2002.

El sensor remoto se encuentra instalado en una plataforma que es la que se encarga de transportarlo sobre la zona en que se realiza la toma de imágenes. La plataforma puede ser desde un globo aerostático, un avión o un satélite. Para el

caso de que la plataforma sea un satélite, éste se encuentra orbitando la tierra en órbitas circumpolares o geoestacionarias a una altura determinada. La disposición de la órbita, en combinación con la rotación de la tierra permite que el satélite tenga cobertura total de la tierra (Sabins 1986). Durante su recorrido orbital, el satélite va barriando franjas de la superficie (Figura 16), obteniendo imágenes cada determinado tiempo, las cuales forman mosaicos completos de las franjas que recorre el satélite (Fundamentals CCRS 2007).

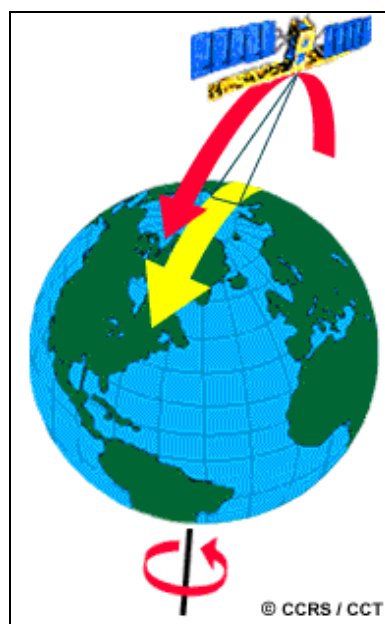


Figura 16 Órbita de un satélite de percepción remota (polar), Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

Características de las imágenes de satélite

Una imagen de satélite es un grupo de valores digitales asociados con la brillantez que tienen los elementos presentes en la parte de la escena que es registrada por el CIV del sensor remoto (Figura 17), y que en la imagen se denomina píxel (picture element en inglés).

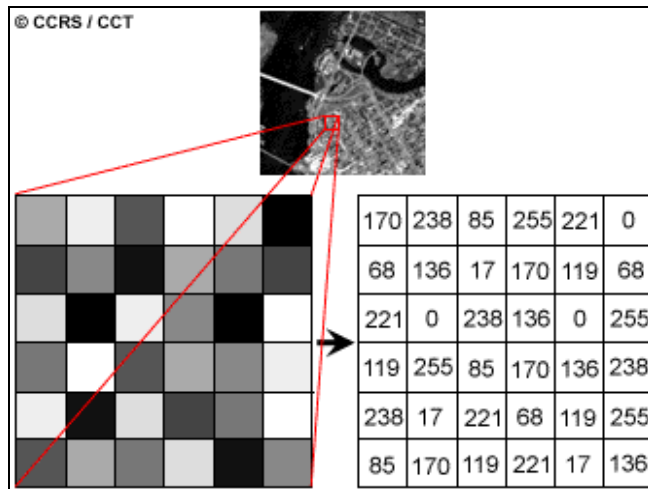


Figura 17 Representación de una imagen de satélite, Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRS 2007.

Los valores de los píxeles están dispuestos en arreglos matriciales de M columnas por N renglones de acuerdo a su posición dentro de la escena, conformando una matriz por cada banda que conforma la imagen (Sabins 1986), así una imagen pancromática estará constituida por una sola matriz y una imagen multiespectral por tantas matrices como bandas tenga (Jensen 1986) (Figura 18).

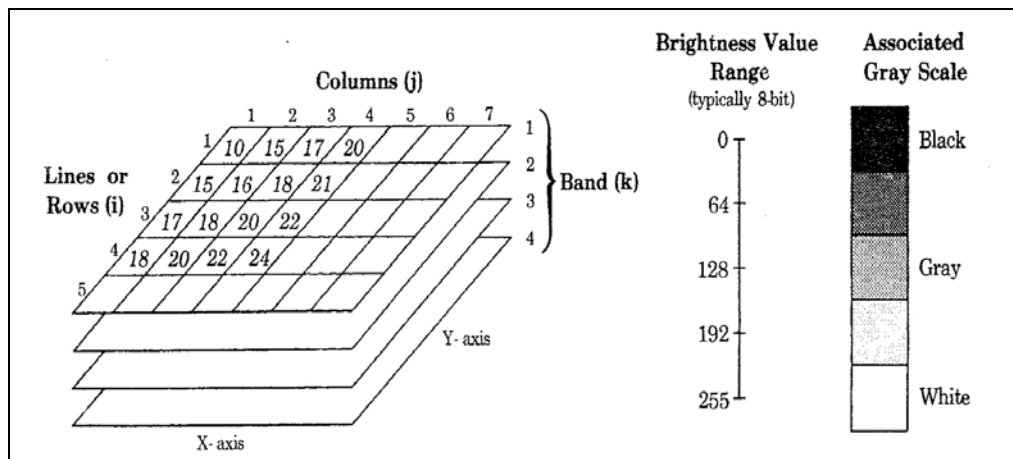


Figura 18 Representación de una imagen de satélite multiespectral: Las líneas o renglones (i), correspondientes al eje (axis) Y, las columnas (j) correspondientes al eje (axis) X, y las bandas (k), el rango de valores de brillantez (brightness value range) para 8 bits que va de 0 a 255 y su correspondencia con la escala de gris asociada (Associated grey scale) que va del negro al blanco. Fuente: Jensen 1986.

Para el caso particular de esta investigación, se empleó la imagen de satélite generada por el sistema SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) de origen francés, específicamente la imagen multispectral SPOT5, con resolución espacial de 10 m y resolución espectral de 0.5-0.59 micrómetros (μm) para la banda 1, de 0.61-0.68 μm para la Banda 2, de 0.78-0.89 μm para la banda 3 y de 1.58-1.75 μm para la banda 4 (SPOT IMAGE 2008) (Tabla 1).

Tabla 1 Satélites SPOT Bandas espectrales y resoluciones

sensor	espectro electromagnético	Tamaño del pixel	Bandas espectrales
SPOT 5	Pancromática	2.5 m o 5 m	0.48 - 0.71 μm
	B1 : verde	10 m	0.50 - 0.59 μm
	B2 : rojo	10 m	0.61 - 0.68 μm
	B3 : infrarrojo cercano	10 m	0.78 - 0.89 μm
	B4 : infrarrojo medio (IRM)	20 m	1.58 - 1.75 μm
SPOT 4	Monoespectral	10 m	0.61 - 0.68 μm
	B1 : verde	20 m	0.50 - 0.59 μm
	B2 : rojo	20 m	0.61 - 0.68 μm
	B3 : infrarrojo cercano	20 m	0.78 - 0.89 μm
	B4 : infrarrojo medio (IRM)	20 m	1.58 - 1.75 μm
SPOT 1	Pancromática	10 m	0.50 - 0.73 μm
SPOT 2	B1 : verde	20 m	0.50 - 0.59 μm
SPOT 3	B2 : rojo	20 m	0.61 - 0.68 μm
	B3 : infrarrojo cercano	20 m	0.78 - 0.89 μm

Fuente: <http://www.spotimage.fr/web/es/320-resoluciones-y-modos-espectrales.php>

Identificación de características de la vegetación mediante percepción remota

El uso de la percepción remota en el análisis variables biofísicas de la vegetación, es una de las principales aplicaciones de esta ciencia (Jensen 2007). Desde los años 60 se ha utilizado para la detección de cambios en patrones de vegetación, así como para la estimación de recursos naturales y en la evaluación cuantitativa de vegetación verde (Eastman 2006).

Mediante la percepción remota ha sido posible identificar la interacción característica de la vegetación con la energía a lo largo del espectro electromagnético. Así en el rango del visible, 400-700 nanómetros (nm), la vegetación presenta dos picos de absorción de energía en las bandas del azul y del rojo, estos picos se deben principalmente a la presencia de los pigmentos en las hojas como son la clorofila, xantofila y los carotenos (Chuvieco 1990); también se observa un pico de reflectancia en el rango de la banda del verde, el cual hace que identifiquemos a la vegetación sana con el color verde. En la región del infrarrojo de los 700 a los 1300 nm, se presenta una alta reflectancia ocasionada por la estructura interna de la hoja, la que dispersa la mayor cantidad de radiación incidente. En la región del infrarrojo medio, de los 1400 a los 2800 nm, se presentan tres picos de absorción ocasionados por la presencia de agua en las hojas (Chuvieco 1990). Estas características definen la firma espectral de lo que es la vegetación sana (Speranza y Zerda 2005) (Figura 19).

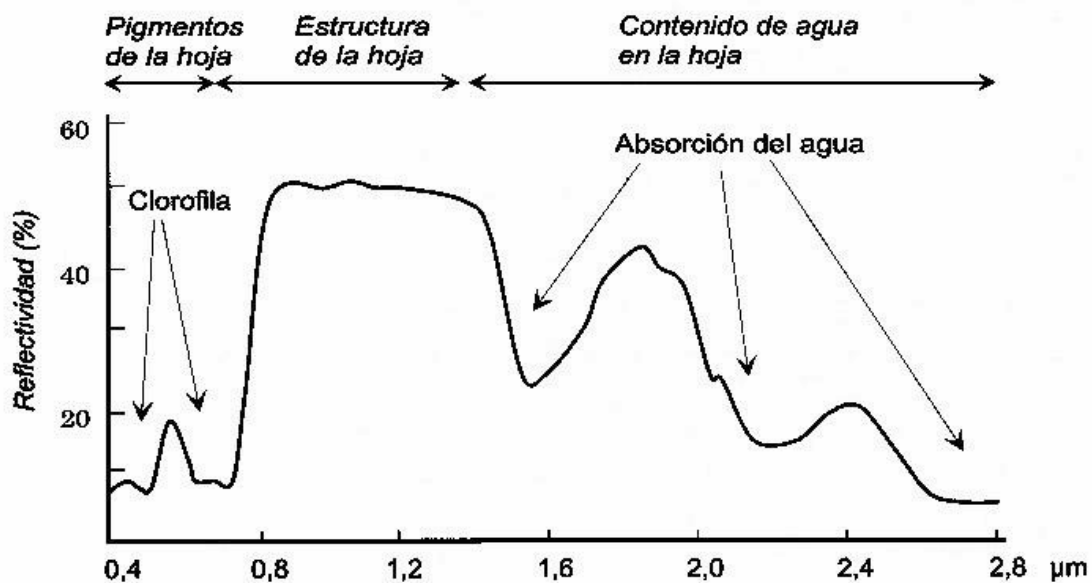


Figura 19 Firma espectral de vegetación sana. Fuente: Speranza y Zerda 2005 (tomado de Molina, 1984).

Clasificación de una imagen

Es posible identificar diferentes elementos en una imagen a partir de su respuesta espectral. Se puede diferenciar entre cuerpos de agua, áreas urbanas, zonas con cubierta vegetal, etc., haciendo una generalización de la información presente a partir del proceso de clasificación que puede ser no supervisada y supervisada (Lo 1986). Sin embargo, para la adecuada identificación de la magnitud y de la extensión de las variaciones de la cobertura vegetal en una zona de estudio, es necesario contar con información de la cobertura vegetal y de sus propiedades estructurales en un ambiente dado (Lira y García 2003).

El proceso de la clasificación no supervisada aplica algoritmos automatizados como es el ISODATA, entre otros, los cuales están presentes en los programas de tratamiento digital de imágenes. En el proceso, el algoritmo identifica como elementos de un mismo grupo, a píxeles con el mismo valor de brillantez o con valores cercanos a rangos predefinidos por el programa, asociando la información en clases con características similares.

La clasificación de la imagen obtenida por este proceso no necesariamente coincide con la realidad, esto debido a que los rangos para clasificar los píxeles pueden agrupar información muy diferente; es decir diferente tipo de vegetación, por lo que es mejor hacer un proceso de clasificación supervisada en la que se tiene mayor control sobre los elementos a clasificar. No obstante, la clasificación no supervisada representa una primera aproximación a los elementos presentes en el área de cobertura de la imagen.

La clasificación supervisada de la imagen se apoya en la identificación de elementos en campo, que permitan la adecuada selección de píxeles de entrenamiento, los cuales presenten características bien definidas (Lo 1986). La clasificación supervisada obtenida dependerá de los elementos identificados a priori, del énfasis que se le dé a cierta información, así como a la resolución de la

imagen, lo que permitirá hacer diferentes tipos de clasificaciones, por ejemplo: clasificación de recursos naturales, clasificación de actividades humanas (Jensen 1986).

Es importante realizar la evaluación de la exactitud de la clasificación obtenida, aplicando alguna de las técnicas disponibles como son: la matriz de error o de confusión con sus indicadores de exactitud del productor y exactitud del usuario, o el indicador de Kappa, los cuales nos dan una idea de la calidad de la clasificación (Congalton 1991).

Índices de vegetación

El alto contraste que existe en la energía reflejada por la vegetación en el rango del rojo e infrarrojo del espectro electromagnético, ha sido la base para el desarrollo de diferentes índices cuantitativos de vegetación (Eastman 2006), que han sido utilizados para la estimación de la biomasa, detección de cambios ambientales, identificación de la degradación del suelo, entre otras.

Los índices de vegetación permiten entre otras cosas, maximizar la sensibilidad de los parámetros biofísicos de las plantas; normalizar o modelar los efectos del ángulo de incidencia del sol, el ángulo de inclinación del satélite y el efecto atmosférico, normalizar los efectos de las variaciones del suelo como fondo de las copas de los árboles, las variaciones de la topografía; así como relacionar la información con algún parámetro biofísico medible (Jensen 2007).

Existen muchos índices de vegetación basados en la relación inversa de la reflectancia de las bandas del rojo e infrarrojo, las cuales están asociadas a la vegetación sana o a la estimación de biomasa de cultivos (Lo 1986). Los más comunes son los siguientes:

Índice de vegetación de cociente de bandas (Ecuación 2) o Ratio vegetation index en inglés (Ratio)

$$COCIENTE = \frac{IRC}{R}$$

Ecuación (2)

Donde:

IRC = infrarrojo cercano

R = rojo

Índice normalizado de diferencia de vegetación (Ecuación 3) o NDVI por sus siglas en inglés

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Ecuación (3)

Donde:

IRC = infrarrojo cercano

R = rojo

Cociente simple o (Ecuación 4) Simple Ratio Vegetation Index en inglés (RVI) que representa el contrario al Ratio o cociente

$$RVI = \frac{R}{IRC}$$

Ecuación (4)

Donde:

R = rojo

IRC = infrarrojo cercano

El índice de vegetación ajustado por efecto del suelo (Ecuación 5) o SAVI por sus siglas en inglés

$$SAVI = \frac{\rho_{irc} - \rho_r}{(\rho_{irc} + \rho_r + L)}$$

Ecuación (5)

Donde: ρ_{irc} = Banda del infrarrojo cercano expresada como reflectancias

ρ_r = Banda visible del rojo expresada como reflectancias

factor L = Constante de ajuste de suelo, varía dependiendo de la densidad de vegetación (Eastman 2006)

Transformaciones

El análisis de la vegetación y algunas de sus características en imágenes de satélite también se realiza por medio de transformaciones ortogonales como son el Análisis de Componentes Principales o PCA por sus siglas en inglés, el cual se basa en la correlación existente entre las diferentes bandas, identificando en la matriz de correlación, aquellas que aportan la mayor cantidad de información, que usualmente son las primeras dos o tres componentes principales. Este procedimiento, permite reducir la dimensionalidad de los datos, pasando de varias bandas de información a dos o máximo tres componentes principales que explican el 95 % o más de la información presente en la imagen (Jensen 1986).

La principal utilidad del análisis de componentes principales es que permite hacer el análisis de la imagen con muchos menos datos que si se utilizaran todas las bandas, reduciendo también las iteraciones y el tiempo que se requiere para el análisis. Las componentes así obtenidas pueden utilizarse en composiciones de color que resalten las características de la cobertura bajo análisis (Jensen 1986).

Otra transformación es la de gorra de borla (Tasseled Cap Transformation) de la cual su segunda componente proporciona el Índice de vegetación verde o GVI por sus siglas en inglés, la transformación fue introducida por Kauth y Thomas en 1976 (Eastman 2006).

Otra forma de realizar una segmentación detallada de la vegetación presente en la imagen y de sus características particulares, es mediante la Expansión Canónica de Variables, la cual tiene por objeto generar un nuevo espacio en el que las variables tengan máxima separabilidad es decir que no estén correlacionadas (Lira y García 2003). Las variables asociadas con la vegetación son el albedo, la fuerza del verdor y el contenido de humedad de la vegetación y se obtienen de las mismas bandas de una imagen multiespectral. Las bandas canónicas corresponden a componentes o índices de algunos de los procedimientos antes descritos; de esta forma, la banda canónica asociada con el albedo corresponde a la primera componente del Análisis de Componentes Principales, la banda asociada con la humedad contenida en la vegetación, corresponde al NDVI del infrarrojo medio e infrarrojo cercano y la banda asociada al verdor se obtiene de la transformación Tasseled Cap (Lira y García 2003).

Percepción remota aplicada a estudios de guayaba

No obstante la aplicación que se le ha dado a la percepción remota para la identificación de características específicas de cierto tipo de vegetación y que se han realizado algunos estudios particulares sobre la identificación de coberturas vegetales, como el desarrollado por Berlanga y Ruiz 2007, en el que se analizan las tendencias de cambio de la cobertura de manglar en sistemas lagunares de Nayarit y Sinaloa, o el monitoreo del desarrollo de algunos cultivos específicos como el realizado por Rodríguez et al 2003, para la discriminación de maíz entre otras especies agrícolas, o como el realizado por Baker y Falconer 1998, en el que se determinó la factibilidad de proporcionar información óptima de fertilización a los productores de cultivos, o hasta el análisis de la cobertura forestal de alguna especie en particular como el realizado por Hoffine y Sader 2001, en el que se analiza la deforestación del bosque a partir de series de tiempo de imágenes de satélite; son escasos los estudios de percepción remota aplicados al cultivo de la guayaba, dentro de los que destaca el realizado por Ruiz et al 2003, presentado

en el III Simposio binacional de Modelaje y Sensores Remotos en Agricultura México-EUA, en el que se utilizó la percepción remota para establecer calendarios de programación de cosechas en los municipios guayaberos del estado de Michoacán.

Asimismo, existen algunos estudios realizados para la identificación de plagas en algunos cultivos, como el realizado por Zhang et al 2002, en el que se identifican los efectos de plagas en tomates a partir del análisis de componentes principales, o el realizado por Blake 2005 en el que analiza la factibilidad de la detección temprana de la enfermedad extenuante en especies de roble en Texas, utilizando información hiperespectral.

La falta de investigaciones realizadas específicamente en el cultivo o plantación de la guayaba y particularmente sobre las plagas que afectan a este frutal, representó un motivo más (además de la importancia que tiene la guayaba en la economía del municipio de Calvillo) para llevar a cabo un estudio de este tipo, el cual permita determinar la factibilidad de aplicar las técnicas de la percepción remota, para identificar este frutal y los efectos de la mosca de la fruta, como apoyo al desarrollo de este cultivo de alta importancia para el estado de Aguascalientes y del municipio de Calvillo en particular.

AREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en el estado de Aguascalientes, el cual se encuentra en centro del país, al Noroeste de la Ciudad de México, aproximadamente a 580 Km. de distancia, los cuales se recorren en 6 horas por carretera de cuota (Figura 20).

El estado de Aguascalientes está constituido por 11 municipios, siendo el más importante el del mismo nombre, en el que se localiza la Ciudad de Aguascalientes, capital del estado (Figura 21).

La zona de estudio se encuentra específicamente en el municipio de Calvillo, el cual se localiza al suroeste en el estado de Aguascalientes. Al municipio de Calvillo se llega por carretera pavimentada de dos carriles, haciendo un promedio de 30 minutos saliendo de la ciudad de Aguascalientes (Figura 22).

Las coordenadas extremas del municipio de Calvillo son: al Norte 22° 06' 21" Latitud Norte, al Sur 21° 42' 48" Latitud Norte, al Este 102° 31' 11" Longitud Oeste y al Oeste 102° 52' 07" Longitud Oeste (INEGI 2006) (Figura 23).

La zona de estudio se circunscribe al área de acción de la Junta Local de Sanidad Vegetal de Calvillo (JLSV de Calvillo), la cual depende del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Aguascalientes A.C. (CESVA); esta se localiza en la parte central del Municipio (Figura 24), en lo que corresponde al Valle de Calvillo y laderas circunvecinas. El área tiene una superficie aproximada de poco más de 400 km².

La zona de trabajo de la JLSV (CESVA) cubre el área donde se desarrolla la producción agrícola en el municipio, la cual se aprecia en color verde en la Figura 24. La zona de cultivo se obtuvo de la extracción del archivo vectorial de la carta temática escala 1:250, 000 que forma parte del IRIS versión 4.0 (INEGI 2007).

Es también dentro de este perímetro que se encuentran distribuidas las trampas con las que el CESVA lleva a cabo el control fitosanitario mediante la captura de moscas de la fruta. En total el CESVA tiene 341 trampas distribuidas en la zona de trabajo, las que se identifican como puntos de color rojo en el mapa de la Figura 24.

Para el caso particular del cultivo de guayaba, se tiene que no se presenta en una superficie continua; más bien, es un cultivo disperso dentro de la zona de cultivo. Las zonas amarillas dan una idea aproximada de la dispersión del cultivo de guayaba en la zona de estudio. Esta información fue digitalizada a partir de la ortofotografía digital del INEGI, de Enero y Abril del 2000, por lo que la distribución no coincide exactamente con la distribución actual (Figura 24).

No obstante que el cultivo de la guayaba está disperso, el CESVA identifica tres zonas (Figura 25) donde se ubican las principales huertas, y que corresponden a zonas con diferente condición de presencia de la mosca de la fruta; las zonas se localizan al norte, al centro y al sur del valle.

Al norte se localiza la ZONA 1 conocida como *La Labor*; esta se constituye por las zonas operativas 01, 02 y 03 del CESVA y tiene una superficie aproximada de 163 km².

Al centro se localiza la ZONA 2, que se denomina *Calvillo*. Esta se constituye por las zonas operativas 04, 05, 06, 07 y 10 del CESVA con una superficie aproximada de 134 km².

Al sur se localiza la ZONA 3, que se conoce como *Mesa grande*, la que el Comité identifica como la de menos presencia de mosca y está a punto de declararla libre de mosca. Esta se constituye por las zonas operativas 08, 09, 11, 12 y 13, con una superficie aproximada de 110 km².



Figura 20 Ubicación de Aguascalientes. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2.

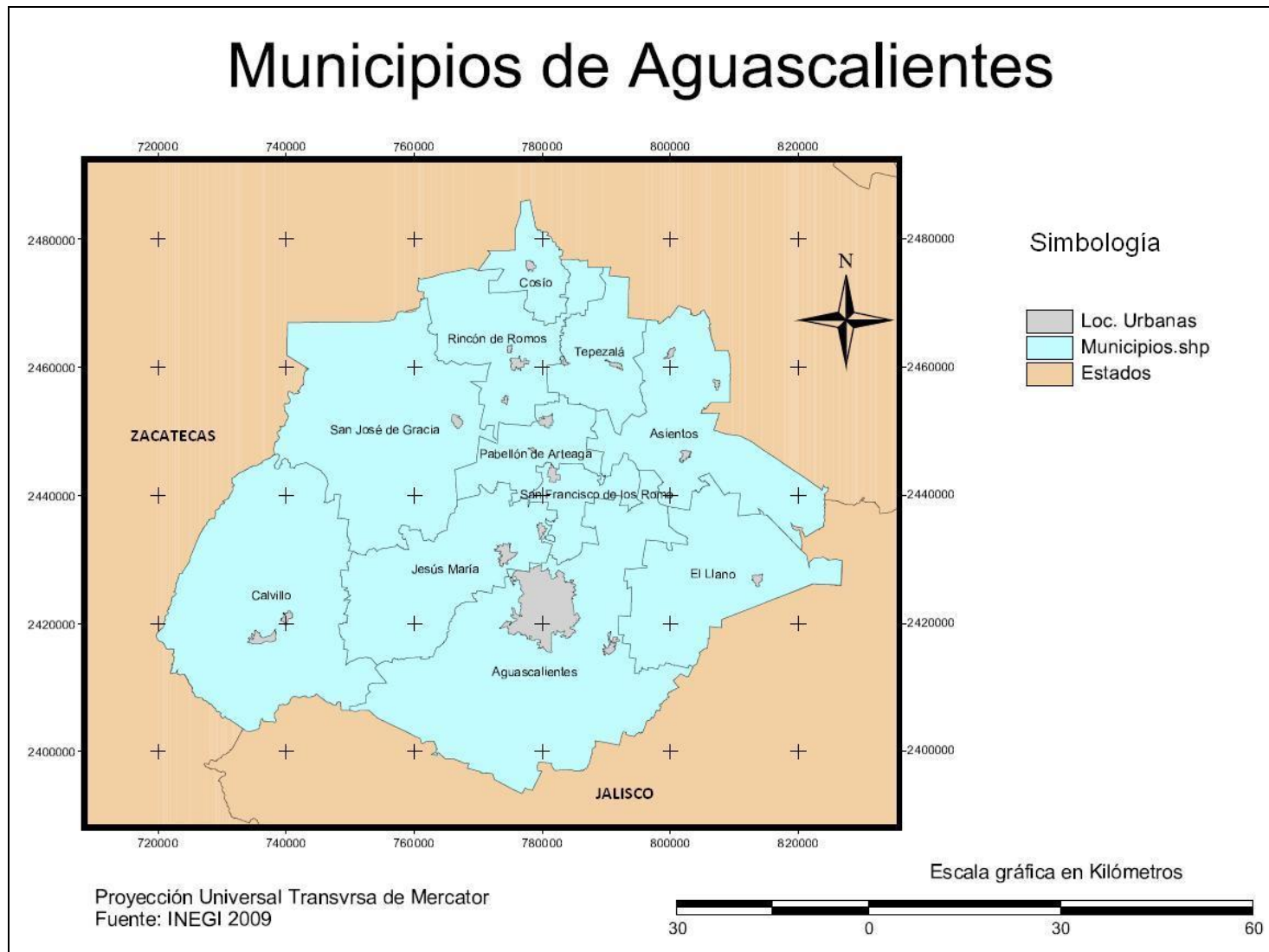


Figura 21 Estado de Aguascalientes con su división municipal. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2.

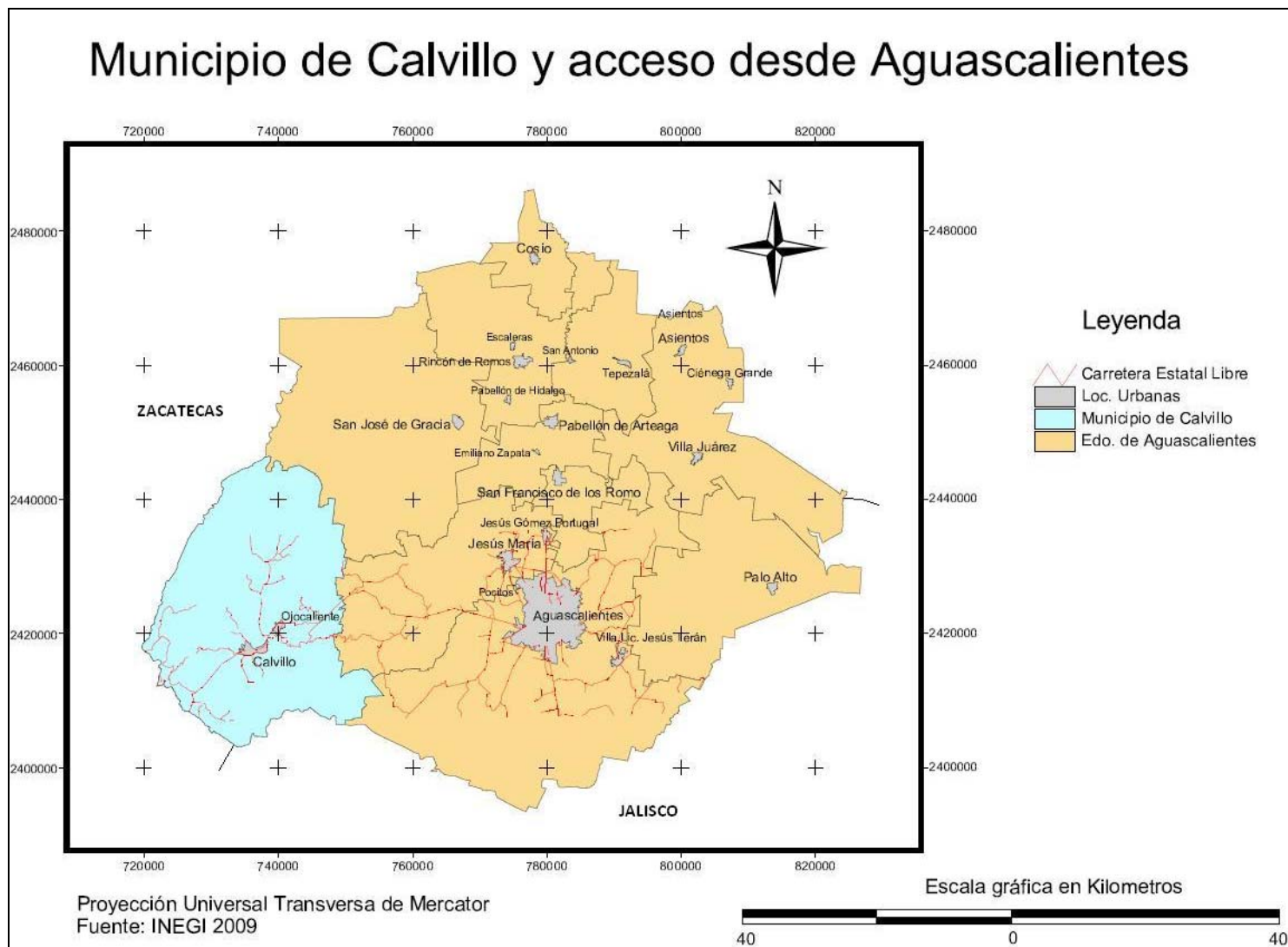


Figura 22 Localización del Municipio de Calvillo. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2.

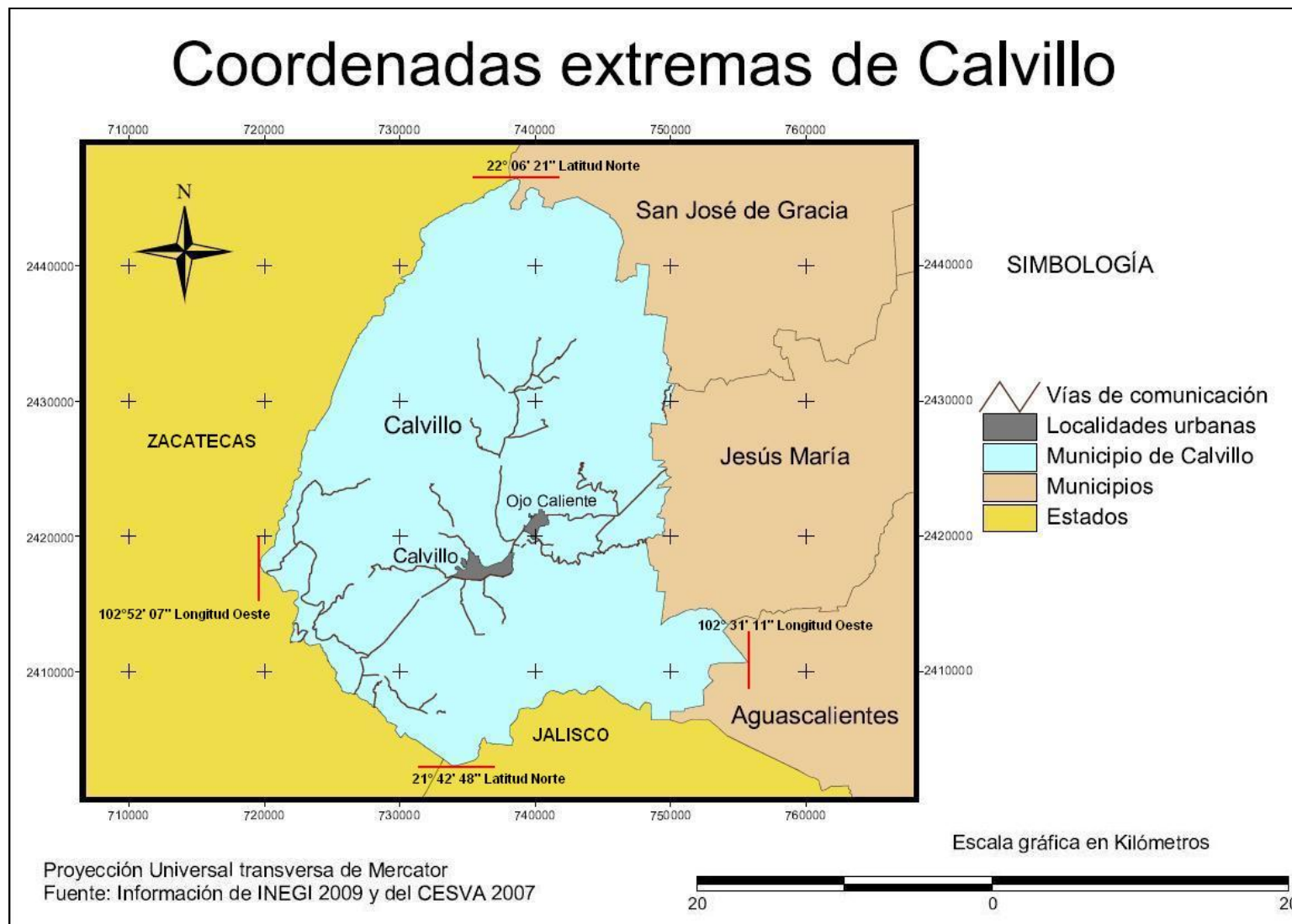


Figura 23 Coordenadas extremas del municipio de Calvillo. Fuente: Elaborado con información del IRIS 4.0 y los cuadernos municipales de INEGI.

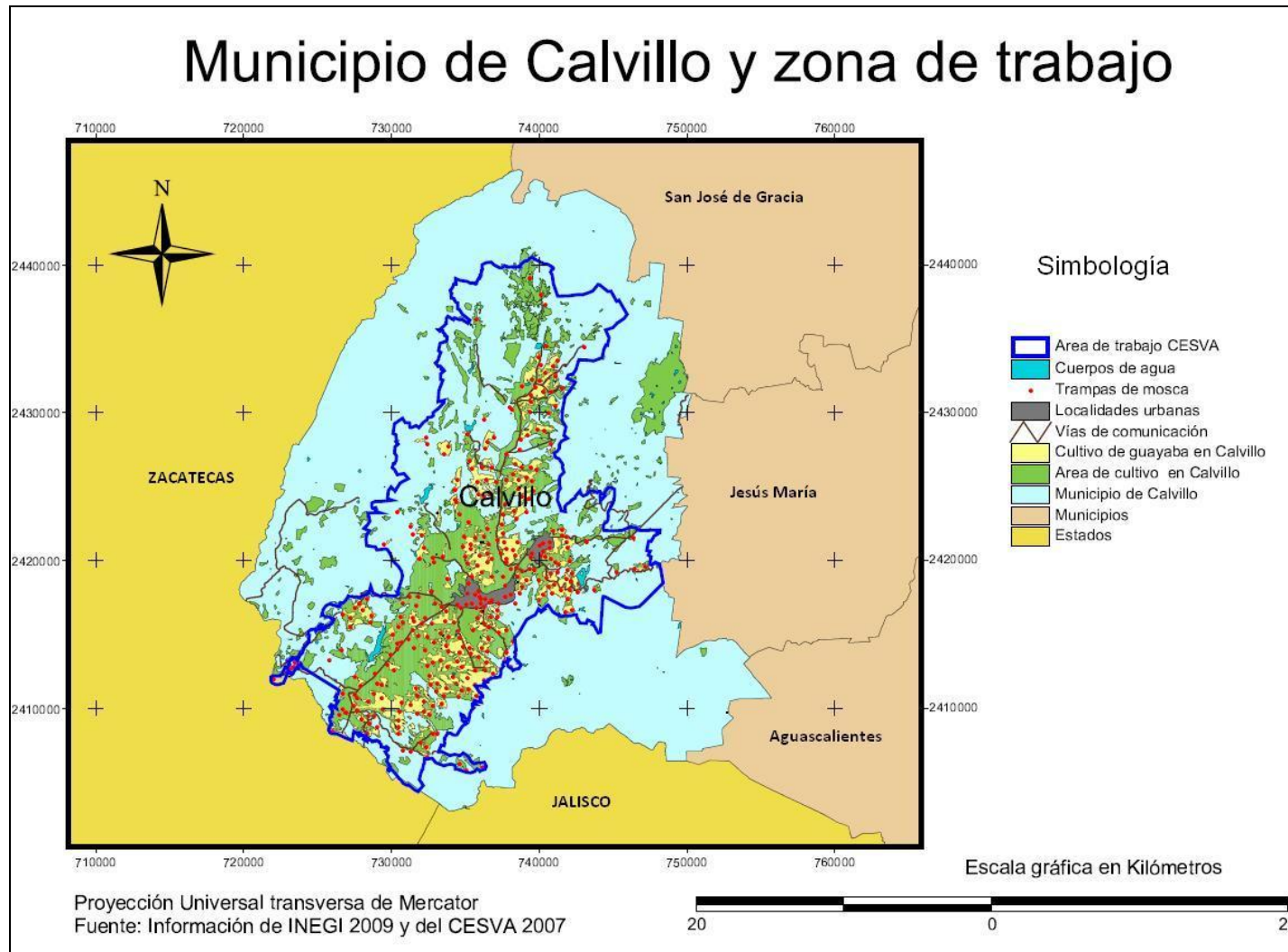


Figura 24 Detalle de la zona de acción del CESVA en el Municipio de Calvillo. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2, con información del CESVA e INEGI.

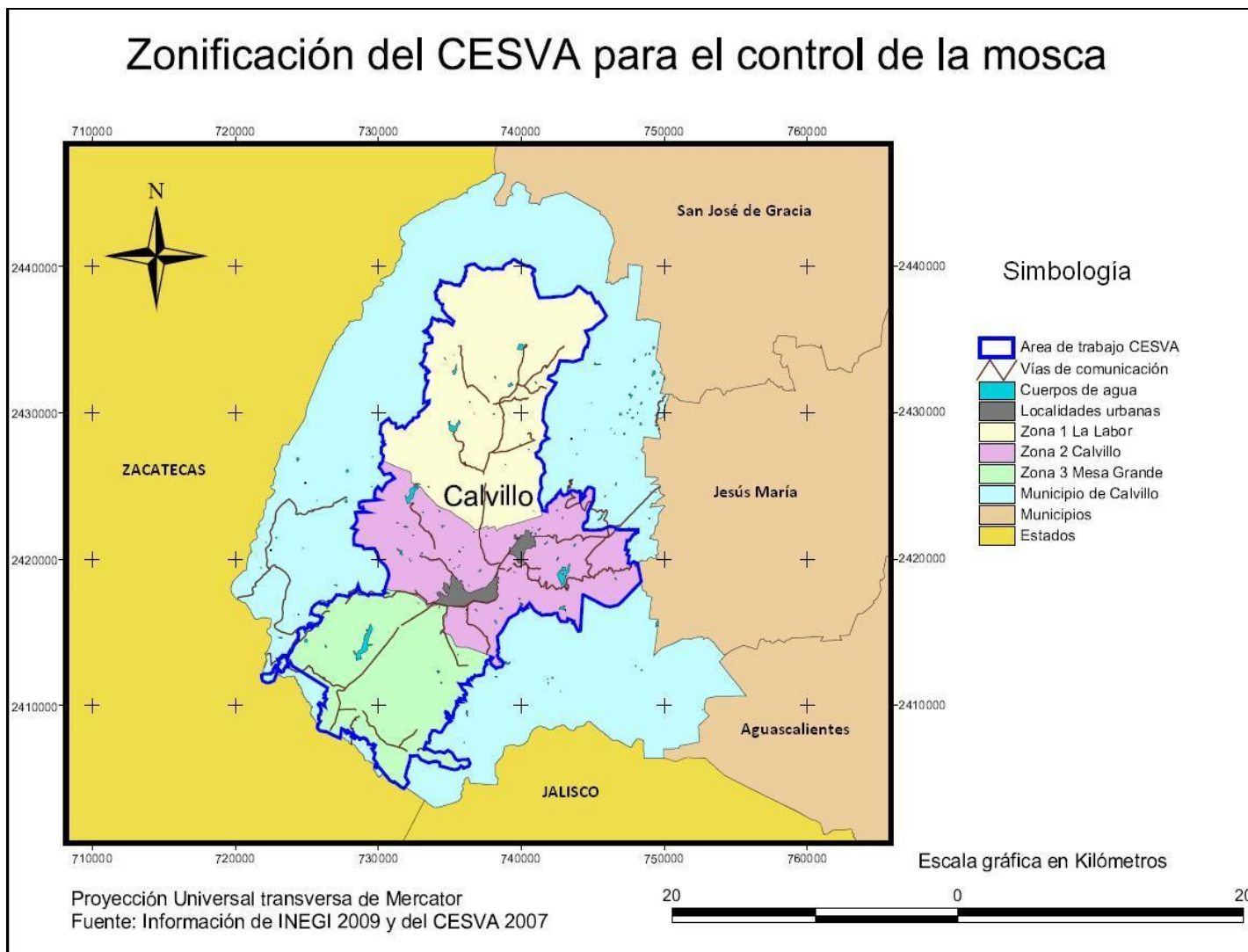


Figura 25 Zonas del CESVA en 2007. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2, IRIS 4.0 con información del CESVA e INEGI.

MATERIAL Y METODOLOGÍA

Trabajo de Campo

Se realizaron varios recorridos por el área de estudio apoyados por personal del CESVA. Estos recorridos permitieron la obtención de coordenadas con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés), de trampas visitadas en huertos con guayaba, lo anterior mediante un equipo GPS de mano marca *Thales* modelo *Mobile Mapper*.

Durante los recorridos se identificaron las diferentes etapas en las que se desarrolla el árbol de guayaba; es decir la etapa de producción, el calmeo y las etapas intermedias, así como la captura de moscas en trampas localizadas en huertos de guayaba como en árboles hospederos de la mosca, principalmente de cítricos.

Previo a los trabajos sobre la imagen de satélite y con la finalidad de contar con elementos que permitieran sustentar la hipótesis de **“identificar mediante análisis de imágenes de satélite, las áreas de guayaba con presencia de mosca de la fruta”**, fue preciso planear la realización de lecturas de respuesta espectral de hojas y árboles de guayaba en campo.

Se determinó realizar medidas de la repuesta espectral de la vegetación en diferentes condiciones en la zona de estudio, de tal forma que al analizar la información captada se observara si es posible detectar diferencias en la repuesta espectral entre árboles de guayaba con y sin presencia de mosca de la fruta.

Toma de las lecturas de respuesta espectral en campo.

La actividad de campo se realizó el día **viernes 4 de julio de 2008**. Para ello se concertó el apoyo de la junta municipal del CESVA en Calvillo, quien proporcionó un vehículo para traslado a la zona de producción de guayaba así como con el auxilio de un técnico especializado, quien conoce con detalle la distribución de las trampas en las zonas, así como los lugares con capturas de mosca de la fruta.

Se seleccionaron tres zonas para realizar las lecturas de respuesta radiométrica; la primera una con árbol de guayaba en la que no se ha reportado captura de mosca, la segunda con reporte de captura de mosca de la fruta y la tercera también con reporte de captura de mosca pero en momentos diferentes; esto, con la finalidad de confirmar la información de las lecturas anteriores. Los sitios seleccionados se conocen bajo el nombre de Loma Larga, La Teresa y Malpaso respectivamente.

Para realizar las lecturas de repuesta espectral, se contó con el apoyo de un espectroradiómetro propiedad de la UNAM, marca *Analytical Devices, Inc.*, modelo *Field Spec@pro* acompañando de una minicomputadora que desempeñó funciones de controlador del equipo; se utilizó como dispositivo de captura un detector de 1 grado de abertura para concentrar la lectura en zonas sin que se vea afectada por la reflectancia de los elementos circundantes.

En los sitios seleccionados para las lecturas de respuesta espectral también se registraron sus posiciones GPS.

Se inició la actividad entre las 9:30 y 10:00 horas en la zona de Loma Larga, designada como LOLA para el registro de datos. Se inició a esa hora con la finalidad de que el sol tuviera un ángulo de incidencia sobre los árboles, el cual no generara demasiadas sombras en las hojas.

En preparación a la toma de lecturas, se configuró el equipo con el intervalo de registro de información y con el nombre de la zona, guardando esta información en la PC que controla al espectroradiómetro (Figura 26).



Figura 26 Configuración de parámetros de observación en el espectroradiómetro. Fuente: Autor.

Posterior a la configuración, fue necesario realizar la calibración de la corriente oscura (Dark Current) del equipo. En esta calibración, el espectroradiómetro registra el ruido que genera por sí mismo como parte de su funcionamiento, para que posteriormente este ruido sea restado a las lecturas tomadas, corrigiéndolas por este efecto.

También fue necesario calibrar el equipo apuntando el detector a una superficie blanca de referencia; utilizando la que el equipo tiene para este fin (Figura 27), con esta calibración el equipo dispone de una reflectancia de referencia la cual corresponde a la unidad.



Figura 27 Calibración del espectroradiómetro con la superficie de referencia blanca. Fuente: Autor.

Una vez calibrado el equipo, se procedió a tomar la respuesta espectral de hojas del árbol, colocando el sensor a una distancia aproximada a 10 cm. del elemento que se está tomando la lectura (Figura 28). La lectura de la respuesta espectral se realizó desde la posición aproximada en la que ilumina el sol y teniendo el sensor en posición perpendicular al elemento que se le está obteniendo la respuesta espectral.



Figura 28 Toma de lecturas de repuesta espectral de hojas y árbol sin presencia de mosca de la fruta. Fuente: Autor.

Después de haber realizado suficientes lecturas en diferentes hojas de un árbol sin presencia de mosca, se repitió el procedimiento de lectura de la corriente

oscura y la calibración con la superficie de referencia blanca, para realizar ahora la lectura de la respuesta espectral del árbol completo, para lo cual se apuntó el sensor a una distancia aproximada de 3 metros, tomando las lecturas desde la dirección de la que ilumina el sol y apuntando diferentes áreas del árbol, principalmente con follaje más brillante, que son las que están reflejando la luz del sol. Se tomaron lecturas de varios puntos del árbol, de tal manera que se tuviera información suficiente para la definición de la firma espectral.

En este lugar donde no había presencia de mosca, se tomaron además lecturas de respuesta radiométrica de árboles de naranjo y lima ya que son hospederos de la mosca de la fruta; asimismo se tomaron lecturas de hojas y árboles de guayaba que estaban saliendo de la etapa de calmeo; es decir, con poco follaje (Figura 29).



Figura 29 Lectura de la respuesta espectral de la guayaba en calmeo. Fuente: Autor.

Se continuó con la toma de lecturas en la zona denominada La Teresa, a la que se le asignó el nombre de LATER para el registro de lecturas radiométricas. Esta zona tenía registros recientes de captura de moscas de la fruta, concretamente desde dos semanas atrás se había dado presencia de la mosca.

No obstante los registros recientes de presencia de mosca, en la zona de La Teresa, a simple vista no había diferencias perceptibles entre los arboles de una y otra zona. Se repitió el procedimiento de calibración del la corriente oscura y de la

superficie de referencia blanca para posteriormente registrar información de las hojas de árboles cercanos a la trampa donde se capturó la mosca de la fruta.

Por último, se realizó el traslado a la zona de Malpaso, a la que se le asignó el nombre de MAL1 para el registro de sus datos. En esta zona también se reportó presencia de mosca de la fruta, por lo que se esperaba obtener respuestas espectrales similares a las obtenidas en La Teresa (Figura 30).



Figura 30 Toma de lecturas de respuesta espectral en hojas del árbol de guayaba en Malpaso. Fuente: Autor.

La información generada por las respuestas espectrales se respaldó en la PC y se preparó para su revisión y análisis en gabinete.

Análisis de la información de campo

La información obtenida en campo en los tres sitios donde se realizó la toma de lecturas radiométricas se analizó con el programa *ViewSpec Pro Versión 2.03* (*Analytical Spectral Devices Inc.*). Independientemente de que se revisaron todos los datos registrados, se concentró el análisis específicamente en los espectros asociados con árboles de guayaba.

Para la zona de Loma Larga, en la que no hay presencia de la mosca de la fruta, se analizaron cuatro grupos de datos: LOLA, correspondiente a hojas de árbol de

guayaba; LOLA2 correspondiente a árbol completo (Figura 31); LOLA6 que corresponde a hojas de árbol de guayaba en calmeo (con poco follaje) y por último LOLA7, que corresponde al árbol completo en calmeo (Figura 32).

En todos los casos se generó el espectro correspondiente al promedio de las lecturas realizadas.

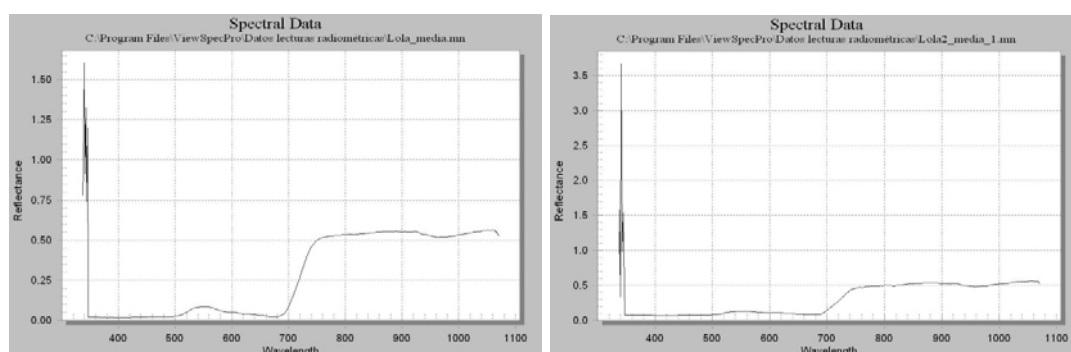


Figura 31 LOLA y LOLA2, Espectros de hojas y de árbol de guayaba sin presencia de mosca de la fruta. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

Los espectros de las hojas y del árbol en Loma Larga presentan valores de reflectancia muy similares tanto en el verde (550 nm) como en el infrarrojo cercano (800 nm). Particularmente en el infrarrojo cercano, los valores de reflectancia están entre 0.55 y 0.50.

Comparando los espectros de las hojas y del árbol en calmeo, es notorio un incremento en la reflectancia en ambos casos, siendo más notorio en el espectro de la hoja que llega a presentar reflectancia entre 0.80 y 0.85 en el mismo segmento del espectro.

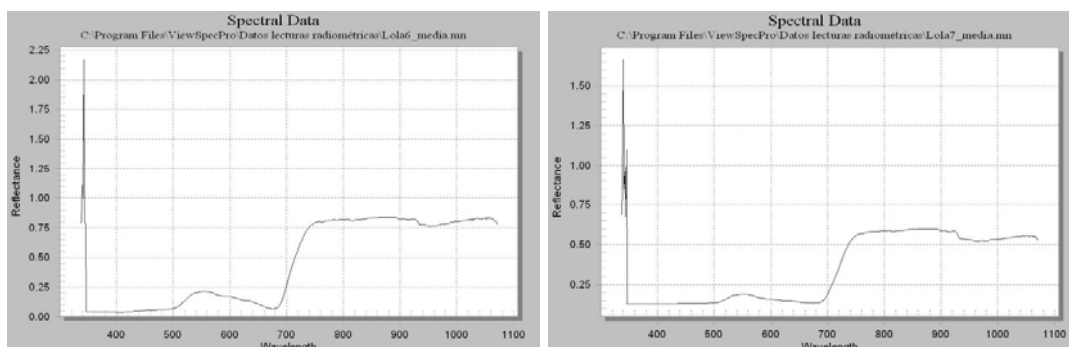


Figura 32 LOLA6 y LOLA7, Espectros de hojas y de árbol de guayaba en etapa de calmeo y sin presencia de mosca de la fruta. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

En la zona de La Teresa, donde se reportaron capturas de mosca de la fruta en las dos semanas previas a la fecha en la que se hicieron las lecturas de la respuesta espectral, se analizaron cuatro grupos de datos: LATER1 que corresponde a hojas del árbol de guayaba, LATER2 que corresponde al árbol de guayaba completo (Figura 33) y LATER3a y LATER3b que corresponde a hojas de otro árbol de guayaba y al árbol completo respectivamente (Figura 34).

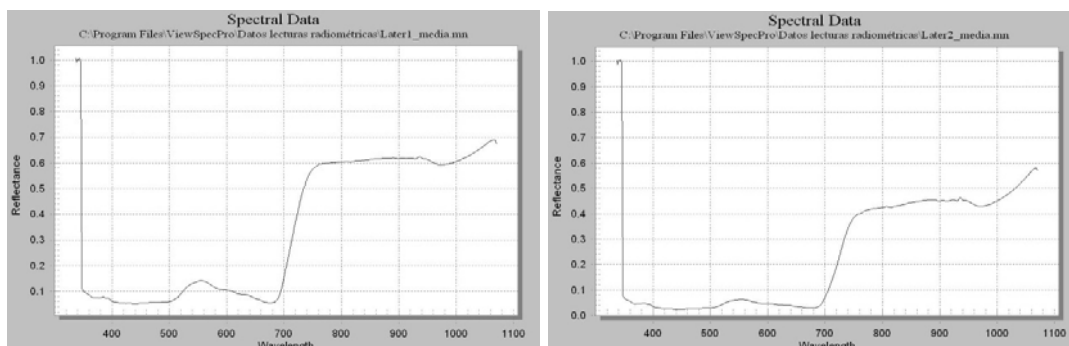


Figura 33 LATER1 y LATER2, Espectros de hojas de árbol de guayaba con presencia de mosca de la fruta. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

Los espectros LATER1 y LATER2 que son del mismo árbol presentan un comportamiento similar en la parte final del espectro, mostrando un sensible incremento en el rango de los 1000 nm a los 1080 nm. La curva ascendente en el infrarrojo cercano se acentúa más en el espectro del árbol completo, la cual no se presenta en los espectros de Loma Larga.

La revisión de los espectros de las hojas y del árbol correspondientes al segundo espécimen muestreado en la zona le La Teresa (LATER3a y LATER3b), muestran un incremento mucho más acentuado en el infrarrojo cercano disparándose la reflectancia a partir de los 1010 nm.

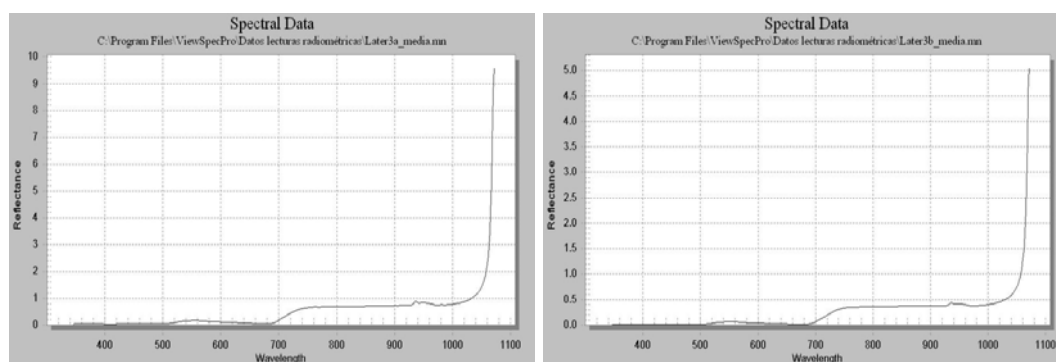


Figura 34 LATER3a y LATER3b, Espectros de hojas y árbol de guayaba (segundo árbol muestreado) con presencia de mosca de la fruta. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

De la misma forma que en los casos anteriores, en estos espectros la reflectancia de las hojas siempre fue mayor a la del árbol completo, esto tal vez debido a que el sensor de 1 grado se concentra más en la reflectancia de la hoja y cuando se apunta al árbol, la lectura se ve afectada por la reflectancia de los objetos circundantes.

Particularmente para los espectros de La Teresa, es notorio el incremento que se da en el infrarrojo dentro del rango de los 1000 nm a los 1080 nm, a diferencia de los espectros donde no hay mosca.

Con la finalidad de confirmar el efecto encontrado en los árboles de La Teresa, se tomaron las lecturas de la zona de Malpaso, donde también se registró presencia de mosca de la fruta, sólo que este lugar las capturas de mosca se dieron 10 semanas antes de la toma de las lecturas radiométricas. En este lugar sólo se analizaron dos grupos de datos MAL1 y MAL2 (Figura 35), el primero corresponde a de hojas del árbol y el segundo al árbol completo.

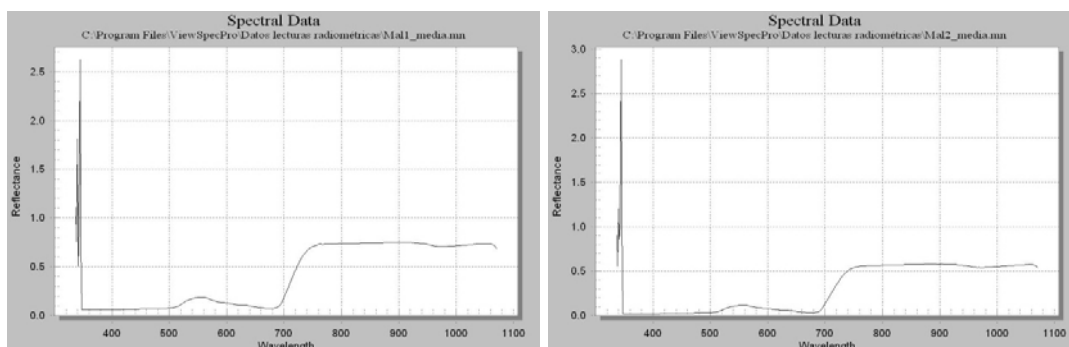


Figura 35 MAL1 y MAL2, Espectros de hojas y de árbol de guayaba con presencia de mosca de la fruta hace 10 semanas. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

Los espectros obtenidos en Malpaso resultaron muy parecidos a los de Loma Larga (LOLA6 y LOLA7), donde no hay presencia de mosca. Siguiendo el comportamiento de los espectros anteriores, el valor de reflectancia de las hojas es ligeramente mayor al del árbol completo, 0.75 y 0.60 respectivamente.

La graficación simultánea de los espectros obtenidos en las tres zonas muestra los picos de las lecturas realizadas en La Teresa (Figura 36).

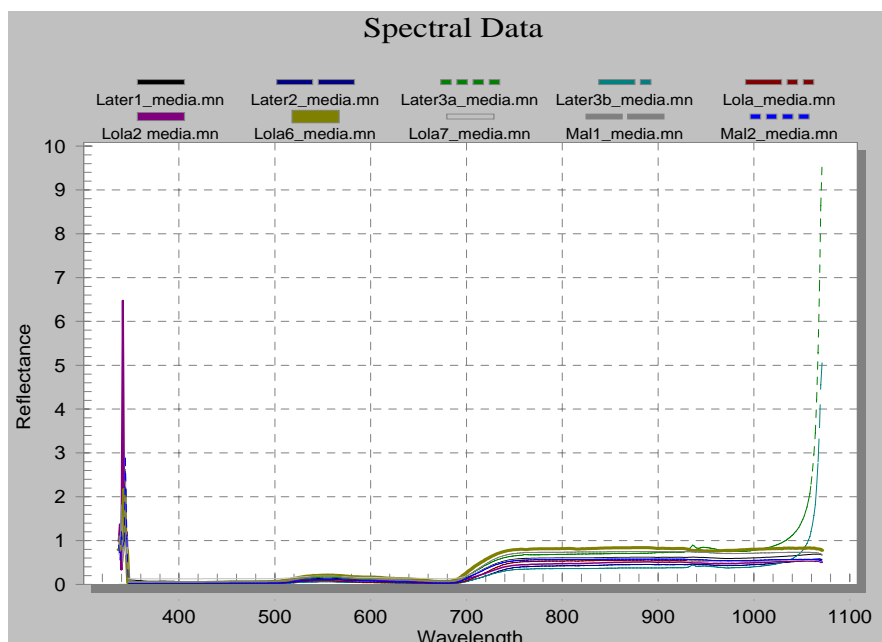


Figura 36 Gráfica resumen de respuesta espectral; Later1, 2, 3a y 3b corresponden a árbol con mosca, las observaciones de Lola, Lola 2, 6 y 7 y Mal1 y 2 a arboles sin presencia de mosca de la fruta. Fuente: Material elaborado en el programa ViewSpec Pro V 2.03.

Habiendo identificado en los espectros una diferencia sensible en el infrarrojo cercano (1000 nm a 1080 nm), se revisaron las posibilidades de identificar esta diferencia por medio del procesamiento digital de la imagen.

Integración de la información en un SIG

La información de referencia obtenida de la guayaba en el municipio de Calvillo, así como la obtenida en los diferentes recorridos de campo, fueron convertidos a formato shape para ser integrados en el Sistema de Información Geográfica denominado “*IRIS*” (*Información Referenciada Geoespacialmente Integrada en un Sistema*) versión 4.1 (INEGI 2007).

Con la información geográfica y de captura de mosca en el municipio se elaboraron diversos gráficos como apoyo al resto de las actividades de campo, así como para asignar referencia geográfica a los productos obtenidos del IDRISI.

De esta manera, la información GPS obtenida de los lugares donde se realizó la toma de lecturas de respuesta radiométrica se integraron al IRIS para relacionarlas con las zonas de trabajo que utiliza el CESVA. Las zonas conocidas como Loma Larga y La Teresa se ubican dentro de la ZONA 1 y Malpaso se ubica en la ZONA 2 (Figura 37).

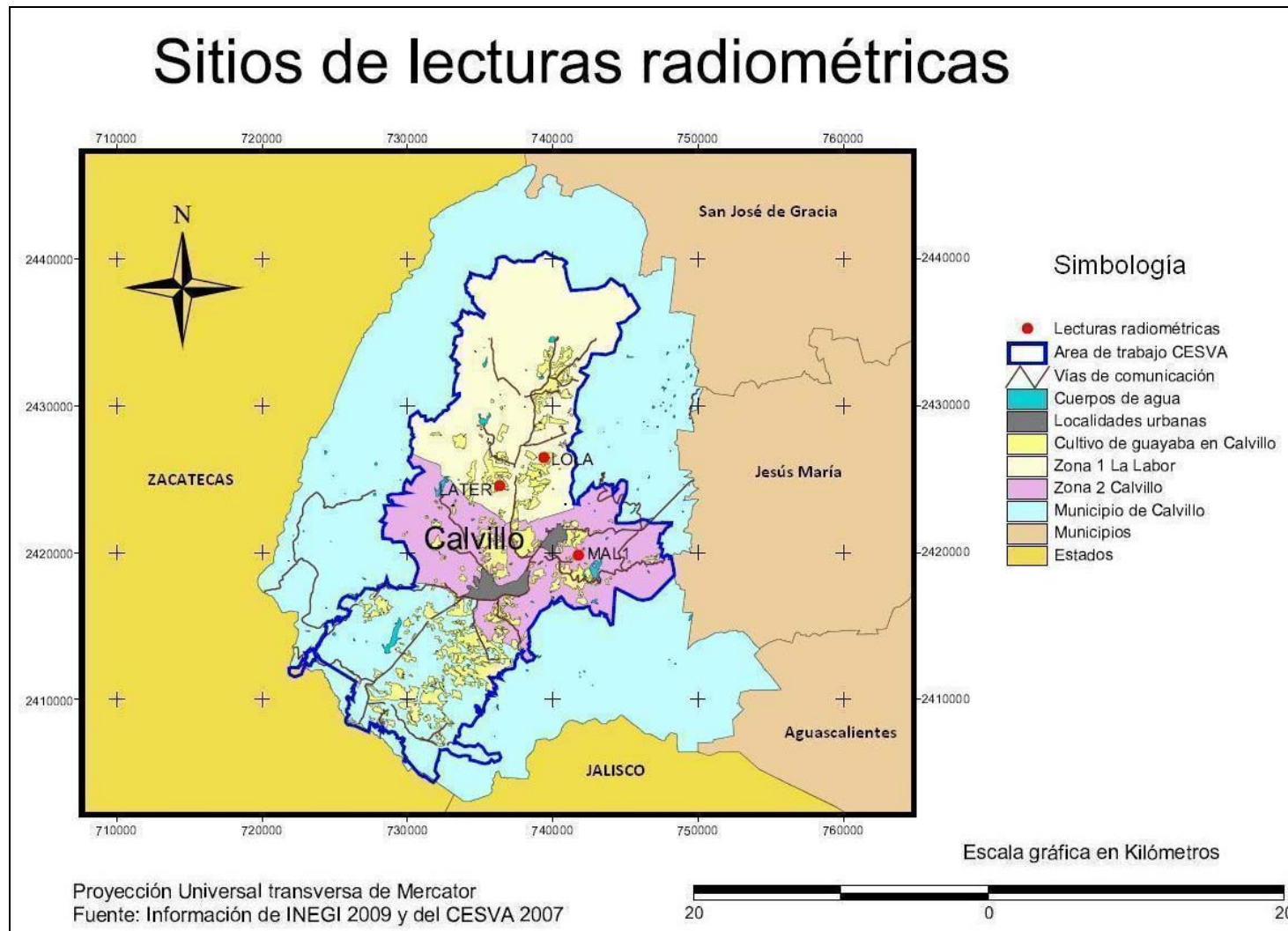


Figura 37 Ubicación de los sitios donde se tomaron lecturas de respuesta espectral. Fuente: Elaborado en IRIS 4.0 y ArcView 3.2, con información del CESVA e INEGI.

Procesamiento de la imagen de satélite

Procesamiento para la obtención de cobertura de guayaba

Para los trabajos de esta investigación, se utilizó la imagen de satélite SPOT5 multiespectral, correspondiente al ROW PATH 580/306 de fecha 15 de marzo de 2007 (Tabla 2). El procesamiento de la imagen se realizó con el programa *IDRISI/15.0 The Andes edition*.

Tabla 2 Extracto de Parámetros de la Escena

ID de la Escena	5 580-306 07/03/15 17:38:52 1 J			
Identificación de K-J	580-306			
Fecha	15/03/2007 17:38			
Instrumento	HRG 1			
Desplazamiento a lo largo del barrido	0 8			
Nivel de Preprocesamiento	1A			
Modo Espectral	J			
Número de bandas espectrales	4			
Indicador de banda espectral	HI1 (B1)	HI2 (B2)	HI3 (B3)	HI4 (B4)
Número de ganancia	6	5	5	3
Calibración de ganancia absoluta (W/m²/sr/μm)	1.829788	1.597198	1.748925	6.355
Ángulo de Orientación	13.635476 degree			
Ángulo de incidencia	L16.764573 degree			
Ángulos del sol (grados)	Azimut: 138.813766		Elevation: 58.475702	
Número de líneas	6000			
Número de pixels por línea	6000			

Fuente: extraído del Archivo VOL_INF preparado por EADS, Matra Systems & Information para Spot Image.

La cobertura original de la imagen es mucho más amplia que la zona de estudio, por lo que fue necesario realizar varios recortes para quedarse exclusivamente con el área correspondiente a la zona de estudio (al Valle de Calvillo), así como

para eliminar un área cubierta con nubosidad en la parte norte del municipio de Calvillo.

El recorte se realizó definiendo una ventana a partir de la posición de los píxeles (renglón y columna) de los puntos extremos que definían la cobertura del área de estudio, cuyas coordenadas X, Y son las siguientes:

X min= 727200

X máx= 745400

Y min= 2408900

Y máx= 2430100

Las coordenadas extremas de los píxeles se obtuvieron referidas al Datum ITRF92 (*International Earth Rotation Service, Terrestrial Reference Frame 1992, Epoch 1988.0*) y en la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) zona 13 norte.

Fue necesario realizar la corrección geométrica de la imagen recortada para llevarla a su posición real y hacer coincidir los rasgos con el resto de información cartográfica obtenida del municipio de Calvillo. Para ello se utilizaron los valores de coordenadas UTM de las esquinas de la imagen y las coordenadas de 5 puntos distribuidos dentro del área.

La calidad visual de la imagen recortada permitía una buena identificación de los elementos presentes en ella. Su histograma presentaba una distribución de los píxeles en la mayoría de los 256 valores posibles a excepción de los primeros, que son valores asociados con el color negro. Por la calidad visual de la imagen, no se consideró necesario realizar el realce por estiramiento del histograma.

Se realizaron varias composiciones en falso color infrarrojo utilizando las combinaciones de bandas de la imagen, en las posiciones correspondientes al Rojo, Verde y Azul (RGB) siguientes: 321, 432, 431, 423, 421, 412, siendo las más

útiles para la identificación de los diferentes tipos de vegetación, las combinaciones 321 y 412 (Figura 38 y Figura 39 respectivamente).

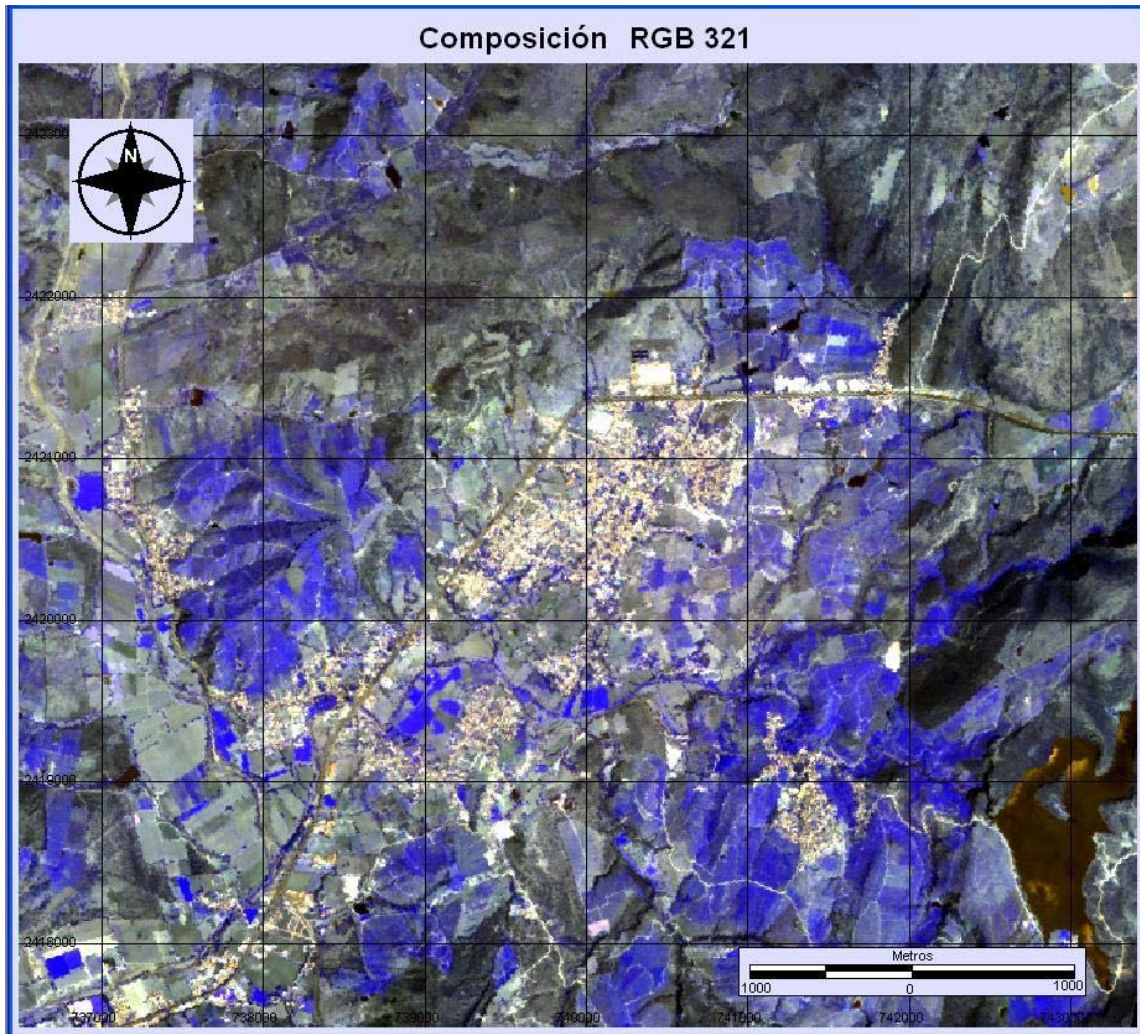


Figura 38 Composición en falso color Infrarrojo 321. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

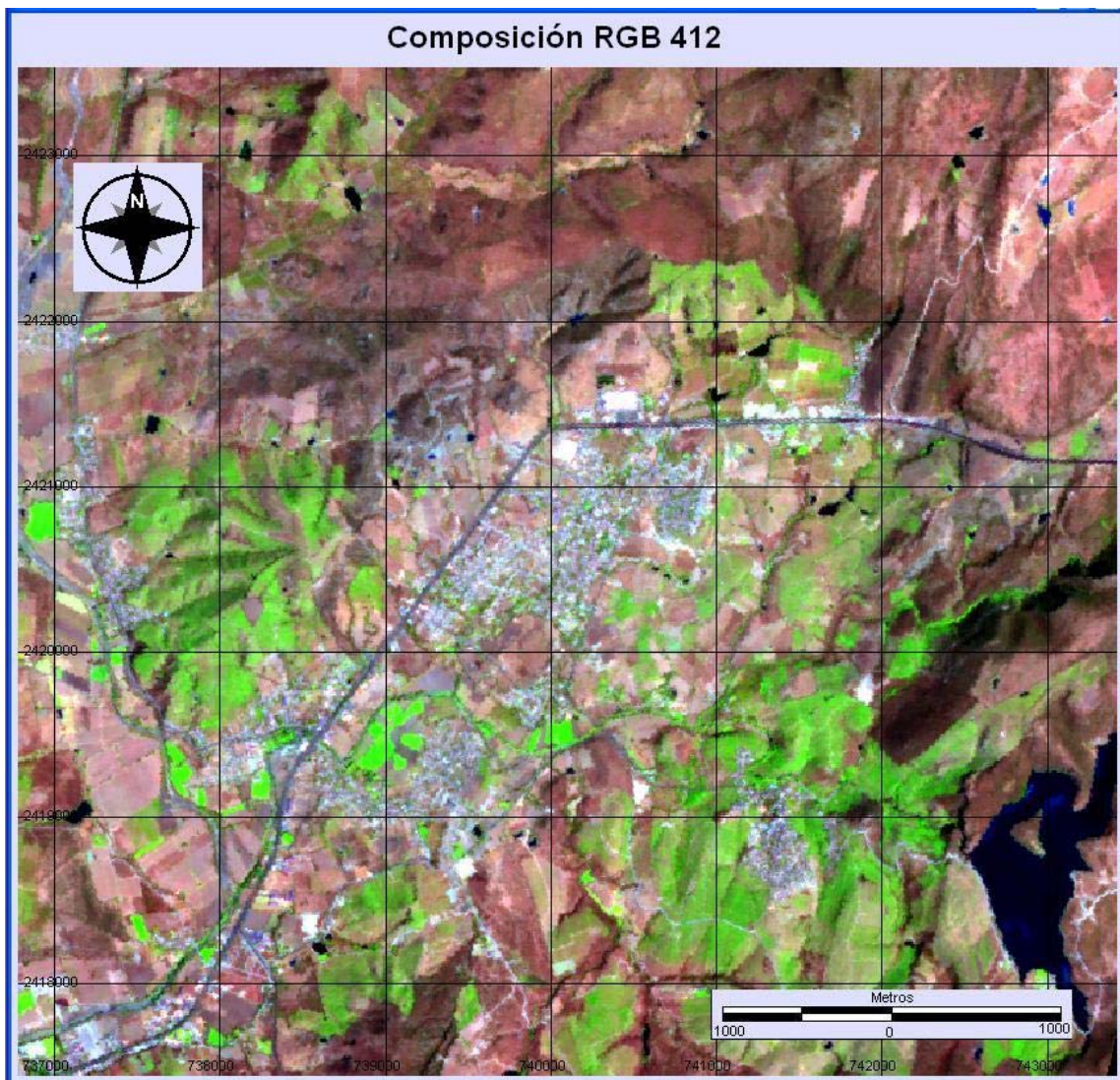


Figura 39 Composición en falso color Infrarrojo 412. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Para obtener la cobertura de vegetación asociada a los cultivos de guayaba, se utilizaron las composiciones de falso color infrarrojo 321 y 412, para realizar la identificación de coberturas de vegetación conocidas, que permitieran obtener la clasificación de la imagen por los métodos de clasificación supervisada y no supervisada.

En la clasificación supervisada, se definen “clases de información”, es decir, la información que es de interés para el analista, para que posteriormente el resto de la imagen se asocie con alguna de las clases definidas según la similitud que tenga con cada una, empleando alguno de los algoritmos que realiza esta asociación. En la clasificación no supervisada, de manera automatizada, un algoritmo identifica las “clases espectrales” presentes en la imagen y las agrupa de acuerdo a criterios estadísticos, para posteriormente asociar las agrupaciones de píxeles con una clase de información específica.

Primero se realizó la clasificación no supervisada de la imagen, utilizando la opción de Clúster en sus versiones fina y burda, en las que el programa de procesamiento asigna automáticamente un mayor número de clases para la versión fina que en la burda, así como definiendo manualmente el número máximo de clases a representar.

Para la clasificación supervisada de la imagen, sobre la composición de falso color infrarrojo 412, se identificaron áreas bien definidas con coberturas de suelo representativas y sobre ellas se digitalizaron polígonos de entrenamiento definiendo 16 clases de información incluyendo tres clases asociadas al cultivo de guayaba en diferentes estados de producción.

La generación de polígonos de entrenamiento requiere de un mínimo de información que permita hacer los cálculos estadísticos necesarios. Como regla general, el número mínimo de píxeles que se deben coleccionar por clase está en función del número de bandas n y debe ser igual a $n+1$, esto para poder calcular la inversa de la matriz de covarianza de cada clase calculada (Jensen 1986).

El programa IDRISI indica como mínimo 10 píxeles por banda y dado que la imagen SPOT cuenta con cuatro bandas, el requisito fue de 40 píxeles como mínimo. En todos los casos, los polígonos de entrenamiento se definieron con más del triple de píxeles necesarios.

Los píxeles de los polígonos de entrenamiento representan un vector X_c (Ecuación 6) que incluye los valores de cada píxel en cada una de las bandas de la imagen para la clase que se está definiendo.

$$X_c = \begin{Bmatrix} BV_{ij,1} \\ BV_{ij,2} \\ \vdots \\ BV_{ij,K} \end{Bmatrix}$$

Ecuación (6)

Donde $BV_{ij,k}$ es el valor de brillantez del píxel con posición ij en la banda respectiva (Jensen, 1986).

La información de los píxeles de los polígonos de entrenamiento se analizan estadísticamente hasta obtener diferentes matrices como son las de valores promedio, desviación estándar, varianza, valor mínimo, valor máximo, varianza covarianza y correlación que proporcionan información sobre las características espectrales de cada clase definida (Jensen 1986).

Con los polígonos de entrenamiento se generaron 16 firmas espectrales (Figura 40) con el módulo *Makesig*, las firmas fueron comparadas entre sí para observar la calidad de su definición, ya que esta se refleja en la calidad de la clasificación obtenida.

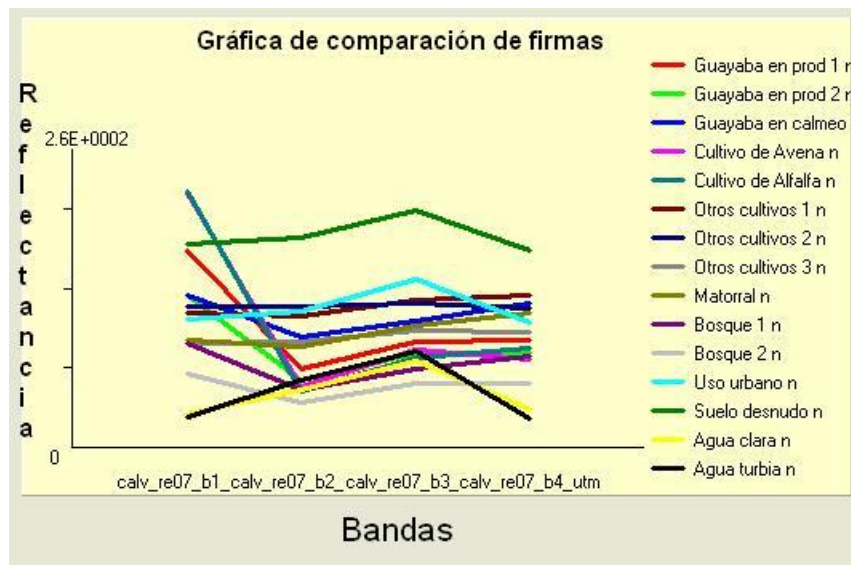


Figura 40 Firmas espectrales de algunas clases definidas en los polígonos de entrenamiento. Fuente: Generado en IDRISI.

Se revisaron las firmas gráficamente empleando el método del dispersograma (*scatterplot*) en dos dimensiones, utilizando las combinaciones de pares de bandas posibles: 4-3, 4-2 (Figura 41), 4-1, 3-2, 3-1 y 2-1.

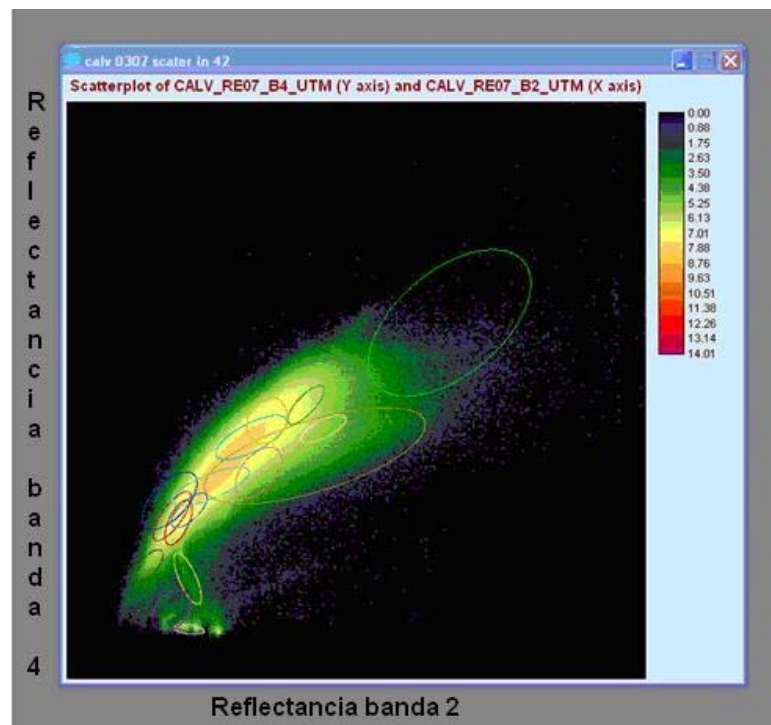


Figura 41 Dispersograma de las firmas espectrales obtenidas bandas 4 y 2. Fuente: Generado en IDRISI.

Para identificar el mejor grupo de bandas a utilizar y minimizar los errores en la clasificación, se revisaron las firmas obtenidas mediante la divergencia (Ecuación 7) y la divergencia transformada (Ecuación 8). En la primera se evalúa el grado de separabilidad de los posibles pares de clases en un número constante de bandas, usando la siguiente ecuación (Jensen 1986).

$$Diverg_{cd} = 0.5Tr\left[(V_c - V_d)(V_c^{-1} - V_d)^{-1}\right] + 0.5Tr\left[(V_c + V_d)(M_c - M_d)(M_c - M_d)^T\right]$$

Ecuación (7)

La divergencia transformada sugerida por Kumar y Silva en 1977 (Jensen 1986) proporciona una reducción exponencial del peso conforme aumenta la distancia entre clases, presentando los valores de la divergencia en una escala que va del 0 al 2000. Un valor de 2000 es indicativo de una excelente separación de clases o firmas. Arriba de 1900 es una buena separación y por debajo de 1700 se considera una pobre separación de clases.

$$Diverg_{cd}^T = 2000\left(1 - \exp\left(\frac{-Diverg_{cd}}{8}\right)\right)$$

Ecuación (8)

Las 16 firmas generadas se utilizaron para correr la clasificación supervisada, con el módulo *Hard Clasifiers* empleando las opciones del paralelepípedo, del vecino más cercano, mínima distancia y máxima similitud (Figura 42).

Para la opción del vecino más cercano, se modificaron los parámetros, restringiendo el algoritmo para utilizar únicamente los 8 vecinos más cercanos en lugar de 30 y elevando a 150 la cantidad de pixeles por clase en los polígonos de entrenamiento, los cuales tiene por defecto 50 y empleando las 4 bandas en la clasificación.

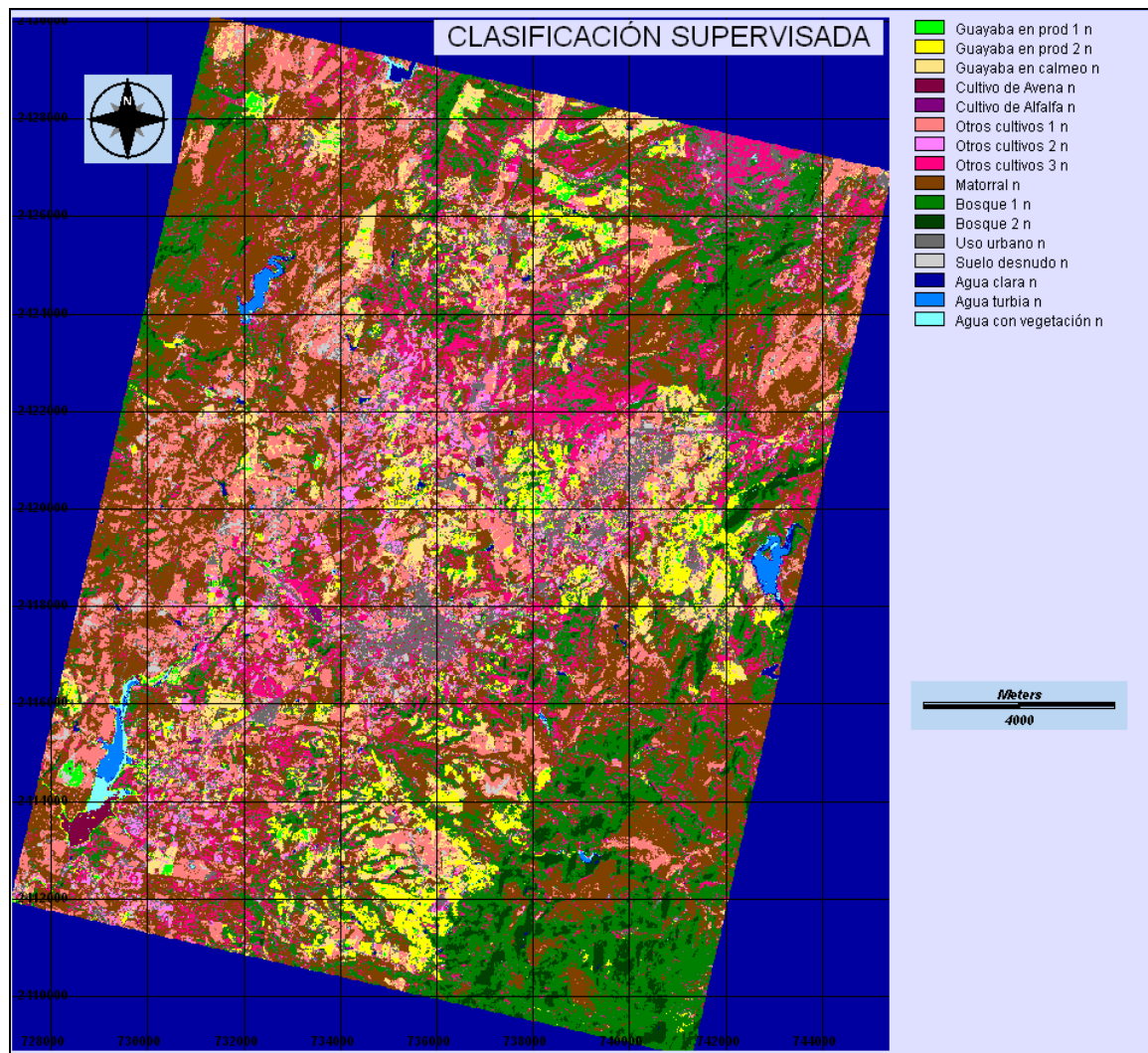


Figura 42 Clasificación supervisada obtenida de las 4 bandas de la imagen de satélite. Fuente: Elaborado en IDRISI.

Se evaluó la exactitud de la clasificación mediante la matriz de error o de confusión (Congalton 1991) (Tabla3), y se obtuvo para toda la clasificación y para cada clase, el valor de Kappa (Ecuación 9) (Tabla 4) a partir de la siguiente expresión.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Ecuación (9)

Donde r es el número de renglones de la matriz, x_{ij} es el número de observaciones en el renglón i y columna j , x_{i+} y x_{+j} son los totales marginales del renglón i y la columna j , respectivamente y N es el número total de observaciones.

Tabla 3 Matriz de error de la clasificación supervisada vs firmas definidas

	Guayaba en producción 1	Guayaba en Producción 2	Guayaba en calmeo	Cultivo de avena	Cultivo de alfalfa	Otros cultivos 1	Otros cultivos 2	Otros cultivos 3	Matorral	Bosque 1	Bosque 2	Urbano	Suelo desnudo	Agua clara	Agua turbia	Agua con vegetación	Total
Guayaba en producción 1	162	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	171
Guayaba en Producción 2	0	221	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	226
Guayaba en calmeo	0	0	229	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	231
Cultivo de avena	0	0	0	363	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	373
Cultivo de alfalfa	0	0	0	20	503	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	524
Otros cultivos 1	0	0	0	0	0	400	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	402
Otros cultivos 2	0	0	0	0	0	0	287	0	0	0	0	1	0	0	0	0	288
Otros cultivos 3	0	0	0	0	0	0	0	274	7	0	0	8	0	0	0	0	289
Matorral	0	0	0	0	0	0	0	0	893	0	0	28	0	0	0	0	921
Bosque 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1096	8	8	0	0	0	0	1112
Bosque 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	631	0	0	0	0	0	644
Urbano	0	0	1	0	0	0	3	2	9	5	1	1885	0	1	0	0	1907
Suelo desnudo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	251	0	0	0	260
Agua clara	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	177	29	0	206
Agua turbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2892	0	2894
Agua con vegetación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	938	940
Total	162	221	230	386	520	400	291	276	909	1114	640	1945	251	180	2923	940	11388

Fuente: Obtenida en IDRISI en el modulo CROSSTAB

Tr= 11202 Exactitud global de la clasificación = 98.37%

Tabla 4 Evaluación de la clasificación supervisada

<i>Clase</i>	<i>Exactitud del productor</i>	<i>Exactitud del Usuario</i>	<i>KIA</i>
<i>Guayaba en producción 1</i>	100.00%	94.74%	1.0000
<i>Guayaba en Producción 2</i>	100.00%	97.79%	1.0000
<i>Guayaba en calmeo</i>	99.57%	99.13%	0.9955
<i>Cultivo de avena</i>	94.04%	97.32%	0.9403
<i>Cultivo de alfalfa</i>	1.73%	1.72%	0.9672
<i>Otros cultivos 1</i>	100.00%	99.50%	1.0000
<i>Otros cultivos 2</i>	98.63%	99.65%	0.9862
<i>Otros cultivos 3</i>	99.28%	94.81%	0.9927
<i>Matorral</i>	98.24%	96.96%	0.9796
<i>Bosque 1</i>	98.38%	98.56%	0.9831
<i>Bosque 2</i>	98.59%	97.98%	0.9858
<i>Urbano</i>	96.92%	98.85%	0.9034
<i>Suelo desnudo</i>	100.00%	96.54%	1.0000
<i>Agua clara</i>	98.33%	85.92%	0.9833
<i>Agua turbia</i>	98.94%	99.93%	0.9894
<i>Agua con vegetación</i>	99.79%	99.79%	0.9979

(KIA) Índice Kappa de correspondencia

Fuente: Valores obtenidos en IDRISI módulo de CROSSTAB

Así mismo, se emplearon los puntos de control de sitios con guayaba obtenidos durante los recorridos de campo, generando un mapa temático que muestra la coincidencia de los puntos de control con los sitios definidos como guayaba.

Adicionalmente, se comparó la cobertura de guayaba obtenida, con la digitalización huertos de guayaba extraída de la cobertura de ortofotografías tomadas en el año 2000 (Figura 43).

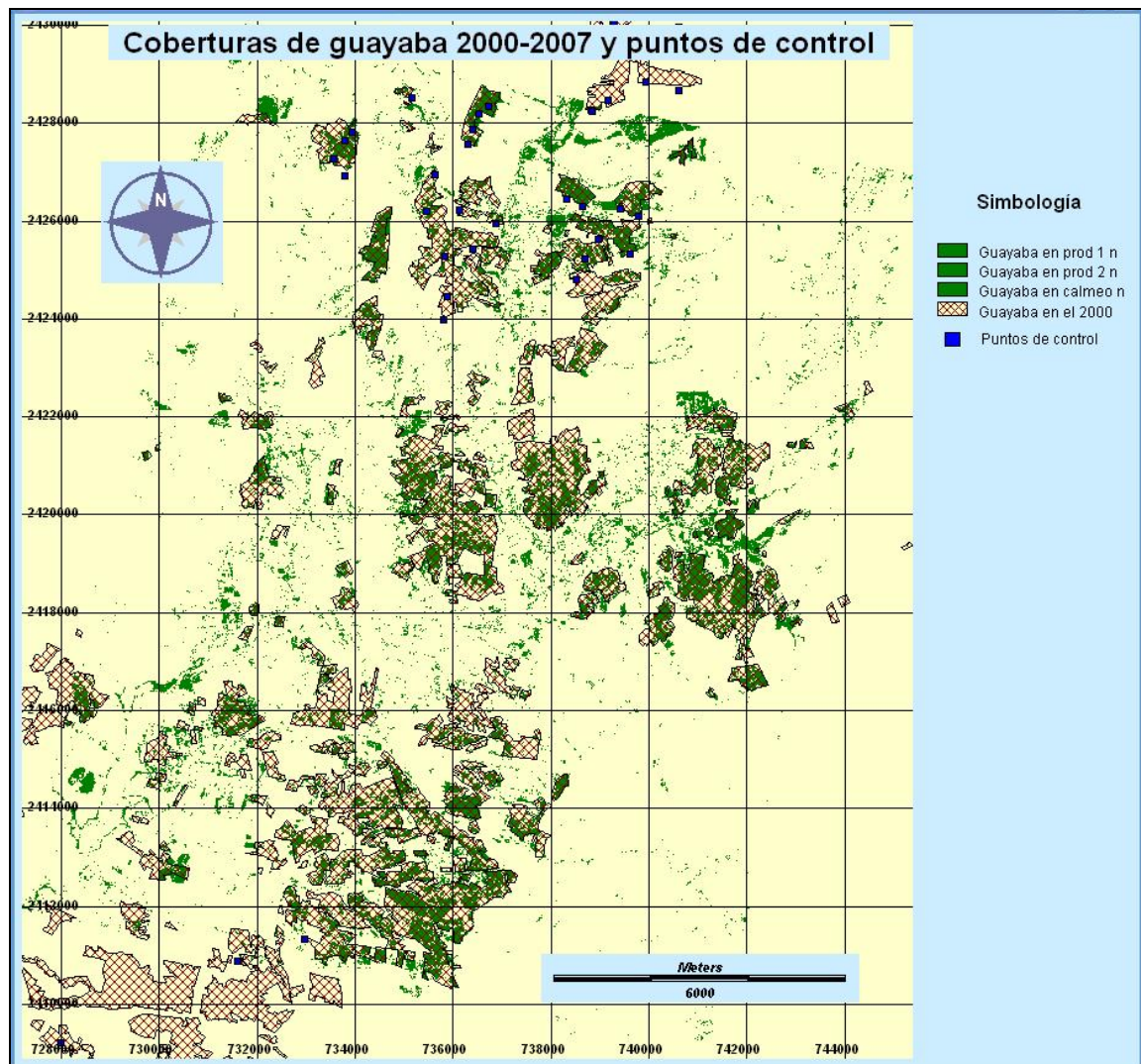


Figura 43 Comparación de coberturas de guayaba. Fuente: Elaborado en IDRISI.

Con la clasificación supervisada final se realizó la separación de la cobertura de las clases asociadas a la guayaba en sus diferentes etapas, integrándolas en una sola capa correspondiente a guayaba de la cual se obtuvo la superficie correspondiente a cada una.

Con esta cobertura, se generó un mapa temático y se exportó para su integración en el Sistema IRIS junto con el resto de información del proyecto (Figura 44).

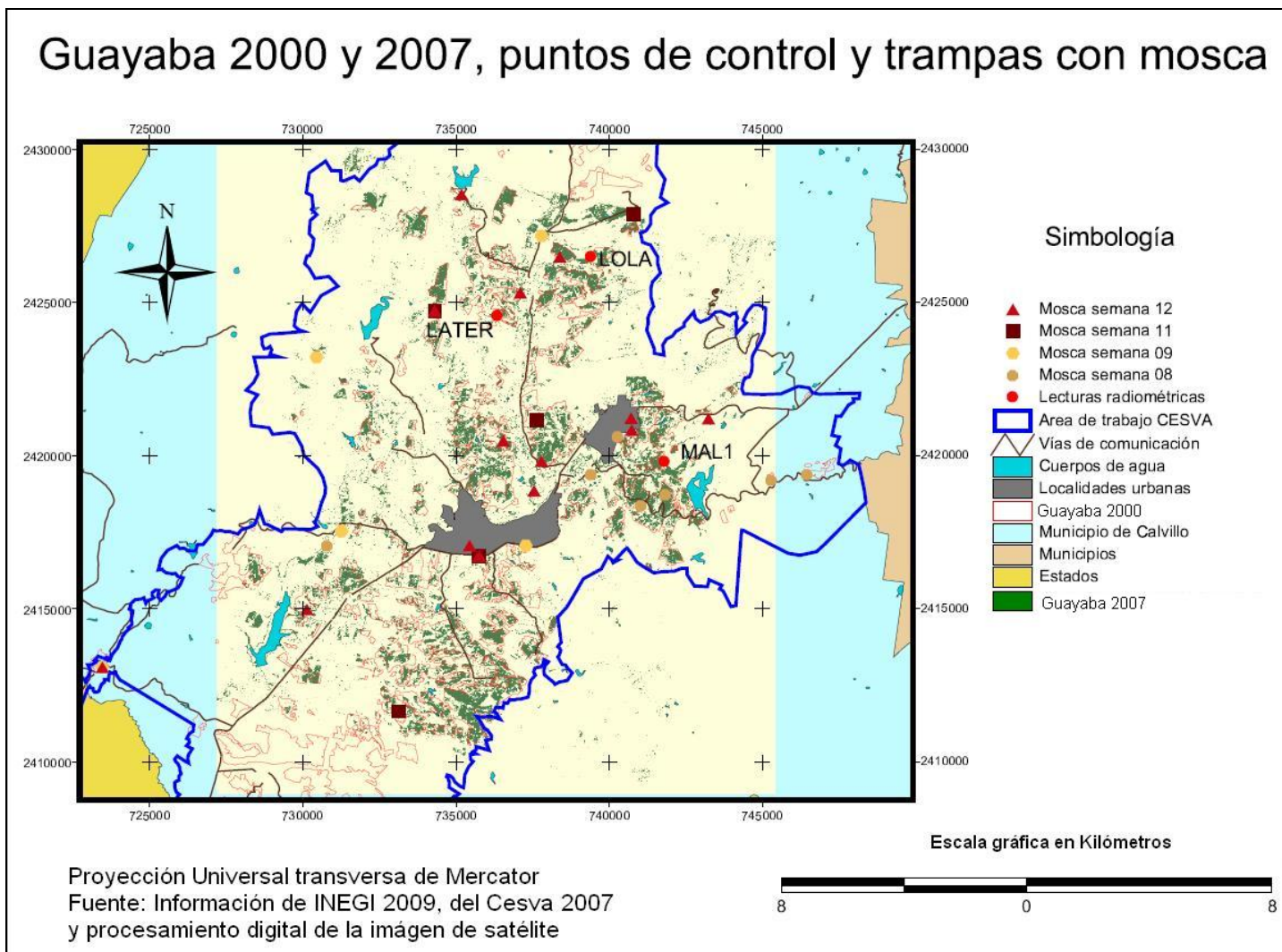


Figura 44 Comparación de coberturas de guayaba 2007 vs 2000 y trampas con mosca. Fuente: Elaborado en ArcView 3.2 con información del CESVA, INEGI y resultado del proceso digital de la imagen.

Procesamiento para validar las lecturas radiométricas de campo

Como comprobación de los resultados obtenidos en las lecturas radiométricas de campo, se realizó el procesamiento de la imagen de satélite multiespectral de la zona de Calvillo, sin embargo, la imagen de satélite SPOT 5 no cuenta con una banda que presente información entre los 1000 nm y 1100 nm (infrarrojo cercano) que es la región del espectro electromagnético en la que se detectaron las diferencias entre los árboles con presencia y sin presencia de mosca de la fruta.

La imagen SPOT 5 cuenta con dos bandas en el infrarrojo, una en el infrarrojo cercano entre los 790 y los 890 nm y otra en el infrarrojo medio entre los 1580 nm y los 1750 nm (Tabla 1).

Debido al problema de información inexistente en la banda del infrarrojo en la imagen de satélite SPOT 5 y apoyándose en los resultados del espectro obtenido en LATER3 en el que la reflectancia se dispara a partir de los 1000 nm, se asumió la hipótesis de que **“el valor de reflectancia en la banda 4 (infrarrojo medio) de la imagen SPOT presentaría el mismo comportamiento”**; es decir que se incrementaría el valor en el ancho de esta banda.

Definida la premisa anterior, se analizó la imagen disponible mediante el Índice de Vegetación obtenido por cociente de las bandas 4 (infrarrojo medio) y 2 (rojo) (Ecuación 10), referido en la bibliografía de percepción remota como Ratio Vegetation Index (Eastman, 2006) de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\text{Cociente} = \frac{IRM}{R}$$

Ecuación (10)

Donde:

IRM= Banda del infrarrojo medio (banda 4)

R= Banda del rojo (banda 2)

Con la aplicación de este índice de vegetación se esperaba obtener valores muy elevados para las zonas con presencia de mosca, siempre que la reflectancia mantuviera el mismo comportamiento que en el Infrarrojo cercano.

El procesamiento de la imagen en IDRISI arrojó una imagen en la que el índice varía entre 0.16 hasta 2.92 (Figura 45).

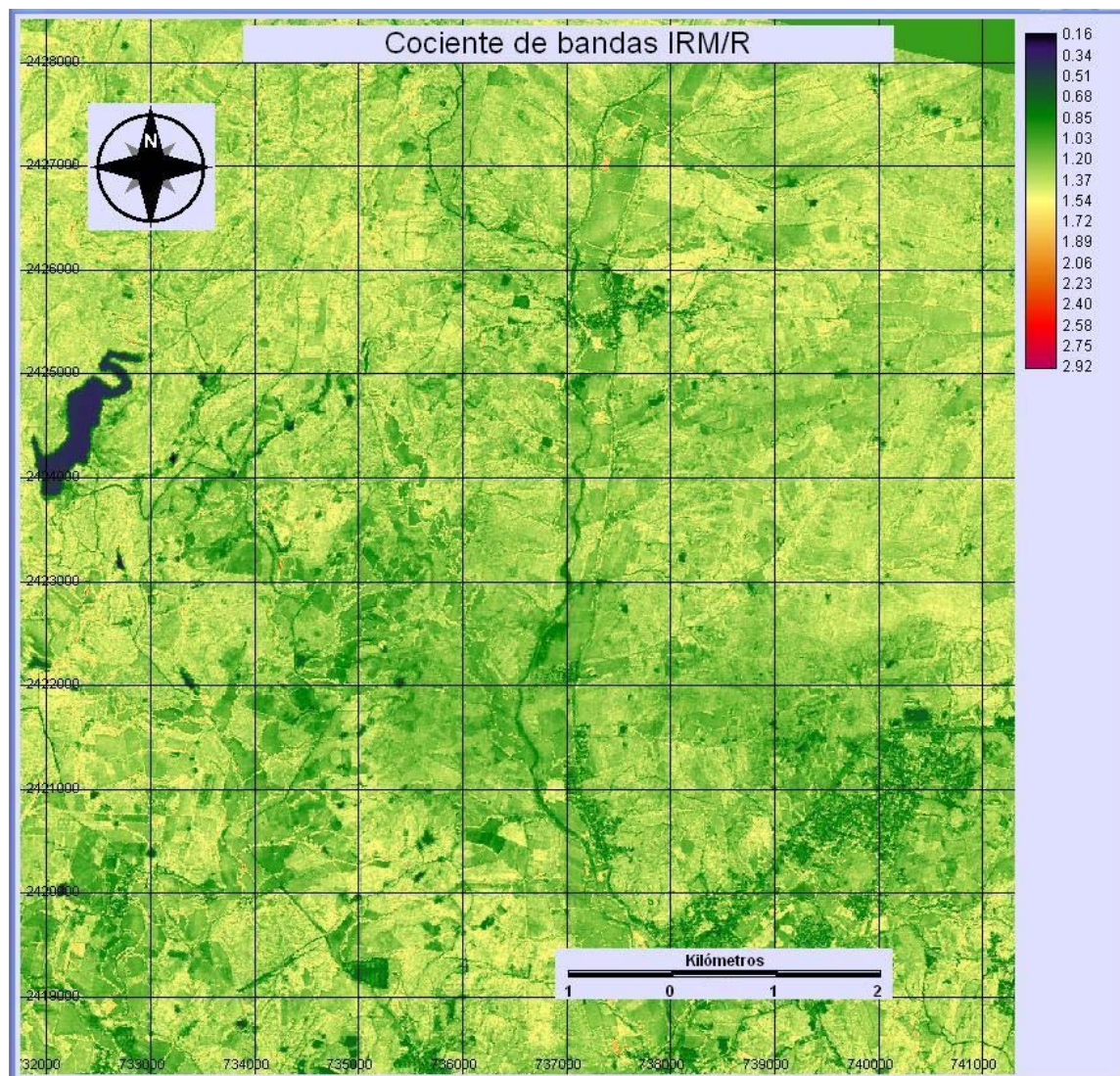


Figura 45 Extracto de Imagen resultado del aplicar el cociente de bandas infrarrojo medio/rojo (IRM/R).
Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07.

Debido a que el cociente de bandas no presentó el comportamiento esperado (valores exageradamente altos), se optó por analizar en la imagen del cociente, los sitios en los que específicamente se reportó captura de mosca **para la fecha de la toma de la imagen**, partiendo de la posibilidad de identificar algún efecto de la presencia de mosca, en la imagen obtenida del cociente simple de las bandas 4/2. Para ello se utilizaron los datos de captura de mosca del CESVA.

Se identificó en la imagen la ubicación de las trampas que reportaron captura de mosca en el municipio de Calvillo durante las semanas 8 a 12 del año 2007, que comprenden el período de las dos últimas semanas de Febrero y las 3 primeras semanas de Marzo.

Alrededor de cada trampa se delimitó un círculo de 400 metros de radio dentro del cual se identificaron los valores máximos y mínimos del cociente de bandas para los píxeles circundantes a la trampa (Figura 46). En algunos casos, el círculo delimitado contenía vegetación diferente a la guayaba, la cual fue excluida en el proceso, limitándolo a áreas con plantación de guayaba.

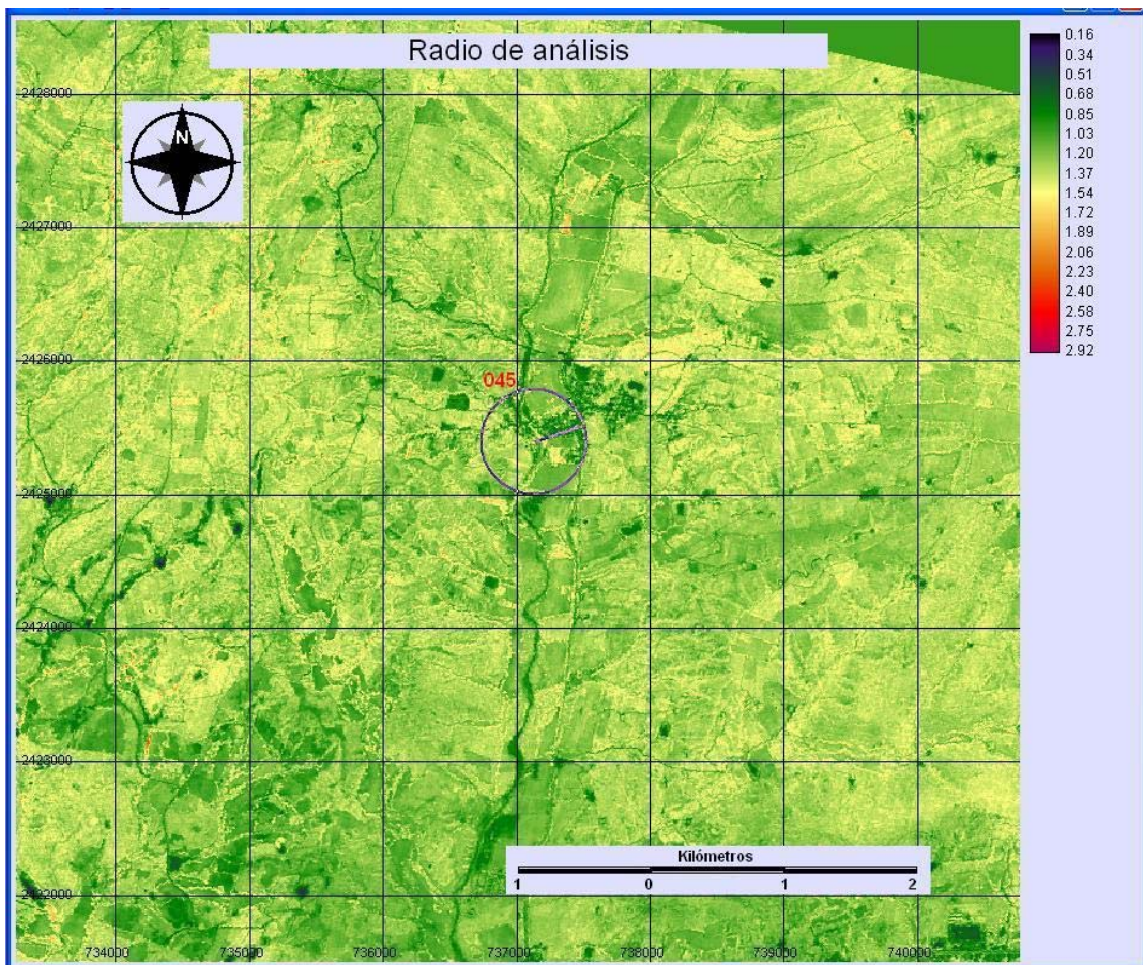


Figura 46 Radio de análisis de valores del índice infrarrojo medio/rojo (IRM/R). Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Se consideró analizar las semanas 8 a 12 con la finalidad de identificar:

1.- Como se comporta la el índice del cociente de bandas 4/2 en las zonas de trampas con mosca en la semana 11 que corresponde a la toma de la imagen.

2.- Si es posible detectar algún comportamiento de la vegetación a partir del índice después de varias semanas de haberse detectado la presencia de mosca; esto para las trampas que reportaron mosca entre las semanas 8 a 10.

3.- Si es posible identificar algún efecto sobre los árboles, previo a la detección y captura de mosca, a partir del índice del cociente de bandas; esto para las trampas con mosca reportada en la semana 12.

Con la finalidad de comprobar si el comportamiento del índice del cociente de las bandas 4/2 difiere de lo observado en las zonas con captura de mosca, también se analizaron zonas con trampas sin reporte de captura de mosca en la semana de la toma de la imagen. Se seleccionaron trampas en las tres zonas y se realizó el mismo procedimiento de identificación de los valores mínimo y máximo del índice.

Así mismo, para aquellas zonas de la imagen con los máximos valores del cociente de bandas, se verificó el tipo de cultivo al que hacen referencia.

Adicionalmente se realizó el análisis estadístico básico a los valores promedio del proceso anterior, obteniendo para los grupos de trampas con mosca y trampas sin mosca, las medidas de tendencia central, las de dispersión, así como los histogramas y análisis de normalidad de los datos. El análisis se realizó en dos partes, primero para los datos de trampas con mosca separados por semana y los datos sin mosca y posteriormente para los datos de trampas con mosca agrupados.

RESULTADOS OBTENIDOS

Resultados de la clasificación supervisada

De las 16 firmas obtenidas, la correspondiente al uso de suelo urbano presentaba alta dispersión, sobreponiéndose al resto de las firmas; además de esta, algunas firmas como bosque 1 y bosque 2 presentaron una leve sobreposición; la correspondiente al agua con vegetación también presentaba una fuerte dispersión en la banda 1. No obstante, esta sobreposición se daba en solo una banda por lo que en ningún caso afectó el resultado final.

Adicionalmente se evaluó la separación de firmas mediante la divergencia transformada obteniendo valores de 1999.45 a 2000 en la mayoría de las firmas. Las firmas que presentaron valores más bajos para la evaluación de la separación fueron las correspondientes a cultivo de avena y cultivo de alfalfa con 1745.75 y bosque 1 con bosque 2 con 1949.12. Estos valores son sensiblemente más bajos que el valor óptimo de 2000, el cual es indicativo de una buena separación de firmas. El promedio general de separación fue de 1997.03 por lo que se decidió utilizar las 16 firmas en las cuatro bandas para generar la clasificación supervisada.

Se obtuvieron los mejores resultados para la clasificación supervisada con el algoritmo de máxima similitud. Esta clasificación permitió una mejor identificación de los diferentes elementos presentes en la imagen (Tabla 5). Particularmente en la identificación de los espacios con cobertura de guayaba y su diferenciación de otras coberturas vegetales. La estimación de la exactitud de la clasificación se realizó únicamente mediante la matriz de error, obteniendo una exactitud global de 98.37% y un índice de Kappa=0.98.

Tabla 5 Comparación del Índice de Kappa de Correspondencia (KIA) de las clases en las diferentes clasificaciones generadas.

<i>Clase</i>	<i>Paralelepípedo</i>	<i>Vecino más cercano</i>	<i>Minima distancia2</i>	<i>Maxima similitud</i>
<i>Guayaba en producción 1</i>	0.0000	0.9008	0.9320	1.0000
<i>Guayaba en Producción 2</i>	0.0000	0.8928	0.9499	1.0000
<i>Guayaba en calmeo</i>	0.0000	0.8725	0.8428	0.9955
<i>Cultivo de avena</i>	0.2687	0.6497	0.8443	0.9403
<i>Cultivo de alfalfa</i>	0.3381	0.6804	0.9672	0.9672
<i>Otros cultivos 1</i>	0.0000	0.9096	0.7442	1.0000
<i>Otros cultivos 2</i>	0.0000	0.8410	0.4499	0.9862
<i>Otros cultivos 3</i>	0.0000	0.5558	0.7956	0.9927
<i>Matorral</i>	0.0000	0.9146	0.7581	0.9796
<i>Bosque 1</i>	0.2002	0.9256	0.9376	0.9831
<i>Bosque 2</i>	0.9984	0.7581	0.9716	0.9858
<i>Urbano</i>	0.9957	0.7805	0.6990	0.9034
<i>Suelo desnudo</i>	1.0000	0.7354	1.0000	1.0000
<i>Agua clara</i>	0.9110	0.1628	0.9889	0.9833
<i>Agua turbia</i>	1.0000	0.9701	0.8786	0.9894
<i>Agua con vegetación</i>	1.0000	0.9893	0.9861	0.9979

Fuente: Valores obtenidos en IDRISI módulo de CROSSTAB

La clasificación supervisada presentó una alta coincidencia con la cobertura de guayaba digitalizada del año 2000. Permitió además identificar la reducción de los polígonos que había en el año 2000 así como la integración de nuevos espacios al cultivo de la guayaba. Adicionalmente, la coincidencia también se corroboró con la comparación de la cobertura de guayaba obtenida con la clasificación, con los puntos de control obtenidos durante los recorridos de campo.

La cobertura de la imagen procesada no corresponde exactamente con la cobertura total de la superficie de guayaba en el municipio, debido a que durante el recorte se eliminó un segmento de la imagen en la parte norte, por estar afectada por la presencia de una gran nube que obstruía la identificación de elementos por debajo de ella; y en la parte sur, porque el espacio correspondiente quedaba fuera de la cobertura de la imagen.

La superficie total de la cobertura de guayaba obtenida del segmento de imagen de satélite procesada fue de 3 074 0511 hectáreas.

Resultados del cociente de bandas infrarrojo medio/rojo (IRM/R)

Los valores máximos y mínimos obtenidos de los sitios correspondientes a las trampas que reportaron mosca en las diferentes semanas se encuentran en la tabla 6.

En términos generales, las trampas con presencia de la mosca en la semana 8, presentaron valores del índice que van desde 0.9 a 1.2 en el valor mínimo, mientras que para el valor máximo va de 1.2 a 1.4 (Figura 47).

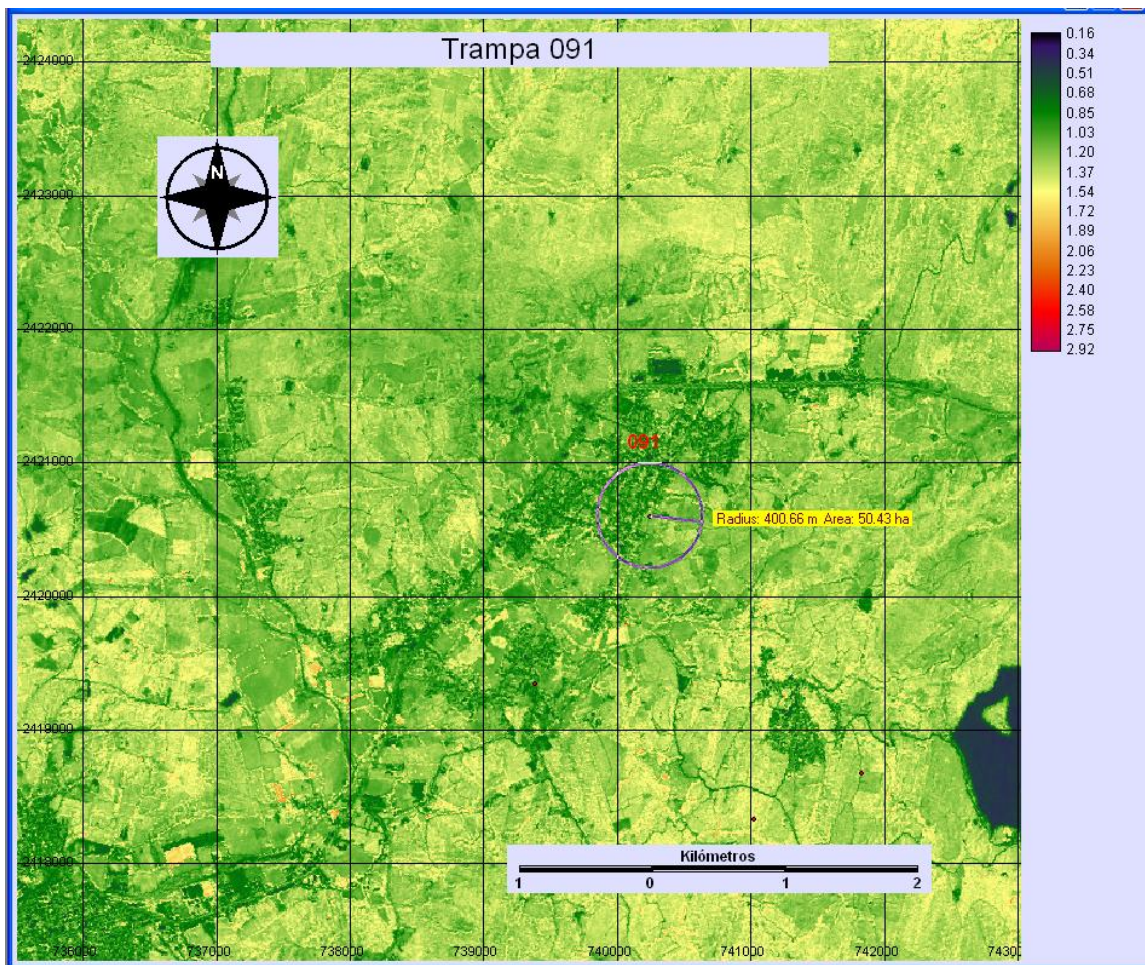


Figura 47 Trampa 091 con captura de mosca en la semana 8. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Para las trampas con reporte de mosca en la semana 9, los valores del índice fueron de 1.3 a 1.4 en el mínimo y de 1.6 a 1.8 para el máximo (Figura 48).

Tabla 6 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en trampas con presencia de mosca en las semanas 8 a 12 del 2007

Zona	Trampa	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Cociente IRM/R		
							Mínimo	Máximo	Promedio
2	135	X					0.9	1.3	1.1
2	116	X					1.0	1.2	1.1
2	126	X					1.3	1.7	1.5
2	091	X					1.1	1.3	1.2
2	106	X					1.1	1.3	1.2
2	105	X					1.2	1.4	1.3
3	252	X	X				1.0	1.2	1.1
3	251	X					1.0	1.3	1.15
1	062		X				1.4	1.8	1.6
2	178		X				1.3	1.6	1.45
2	182		X				1.4	1.7	1.55
3	265		X			X	1.3	1.7	1.5
1	050			X			1.4	1.8	1.6
2	156			X	X	X	1.2	1.9	1.55
2	157			X			0.7	1.2	0.95
3	223			X			1.2	1.5	1.35
1	056				X		1.3	1.5	1.4
1	192				X	X	1.4	1.7	1.55

2	078	X		1.3	1.5	1.4
3	302	X		1.2	1.7	1.45
1	032		X	1.3	1.9	1.6
1	045		X	1.2	1.7	1.45
1	052		X	1.2	1.6	1.4
2	205		X	1.2	1.6	1.4
2	084		X	1.3	1.7	1.5
2	103		X	1.2	1.5	1.35
2	155		X	1.1	1.7	1.4
2	094		X	0.8	1.2	1
2	095		X	1.1	1.4	1.25
2	096		X	1.0	1.3	1.15
3	221		X	1.2	1.5	1.35
3	313		X	nd	nd	nd

n/d No disponible (Trampa fuera de la imagen trabajada)

Semana de la toma de la imagen Spot 15-03-2007

Fuente: Elaborado con información del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Aguascalientes (CESVA), Delegación Calvillo y valores identificados.

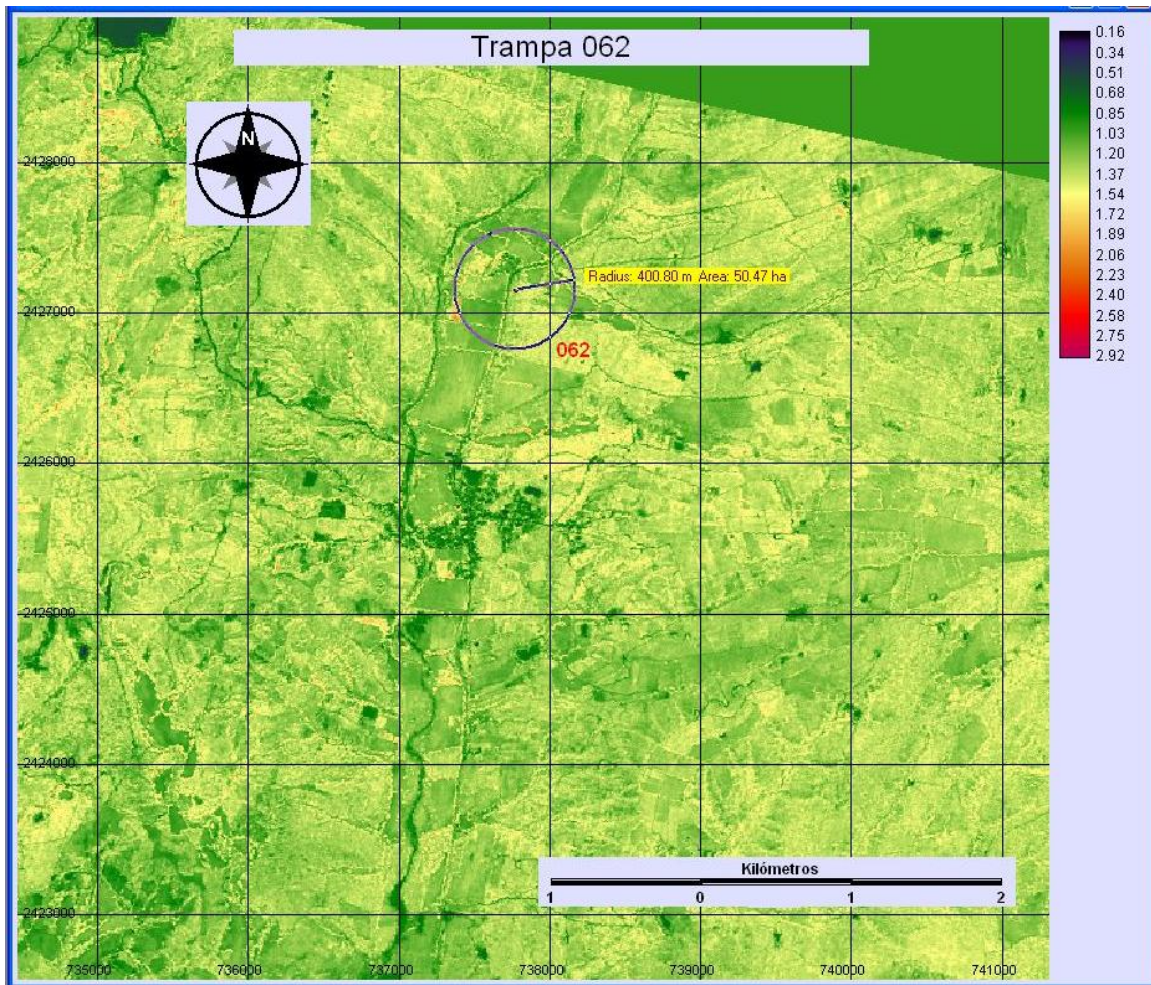


Figura 48 Trampa 062 con captura de mosca en la semana 9. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Para la semana 10 se tuvieron valores mínimos de reflectancia de 1.2 a 1.4 y máximos de 1.5 a 1.9, muy parecidos a los de la semana 9 (Figura 49).

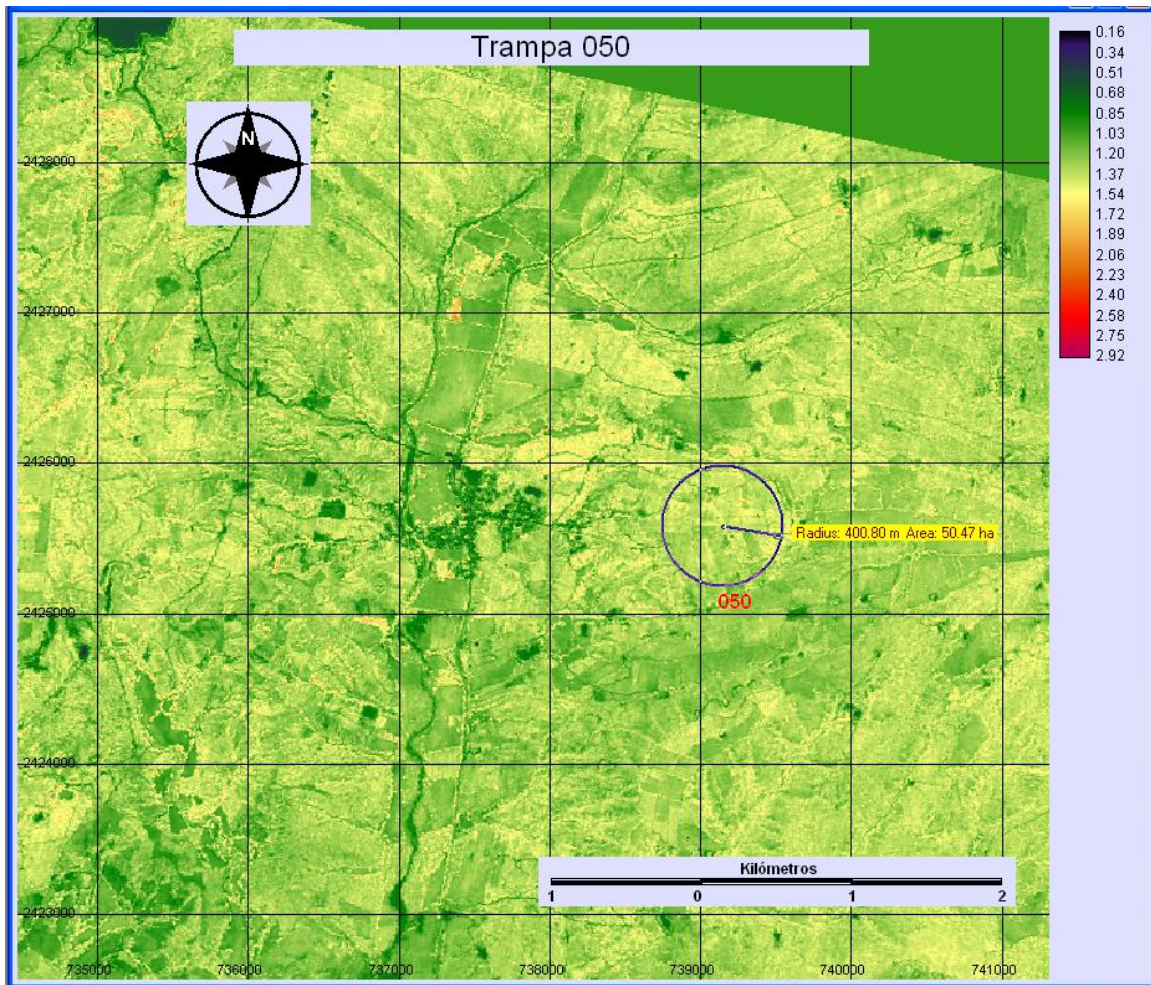


Figura 49 Trampa 050 con captura de mosca en la semana 10. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Para la semana 11 en la que fue tomada la imagen, los valores mínimos se mantuvieron entre 1.2 y 1.4 y los máximos entre 1.5 y 1.7, nuevamente parecidos a las dos semanas anteriores (Figura 50).

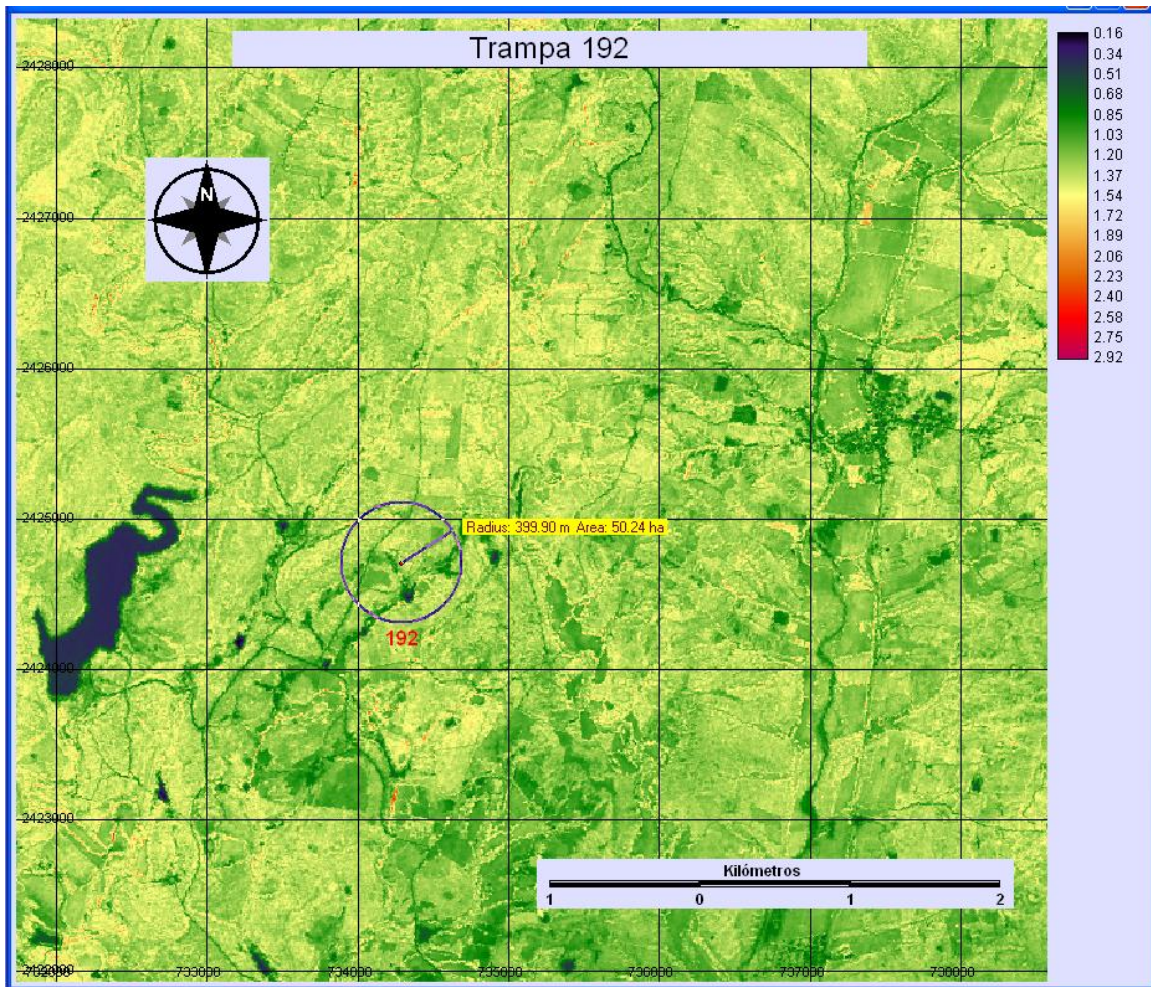


Figura 50 Trampa 192 con captura de mosca en la semana 11. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Para las trampas que tuvieron mosca en la semana 12 los valores mínimos de reflectancia fueron de 0.8 a 1.3 y los máximos de 1.2 a 1.9 algunos casos con valores altos parecidos a las semanas 9 a 11 pero otros con valores bajos semejantes a la semana 8 (Figuras 51 y 52).

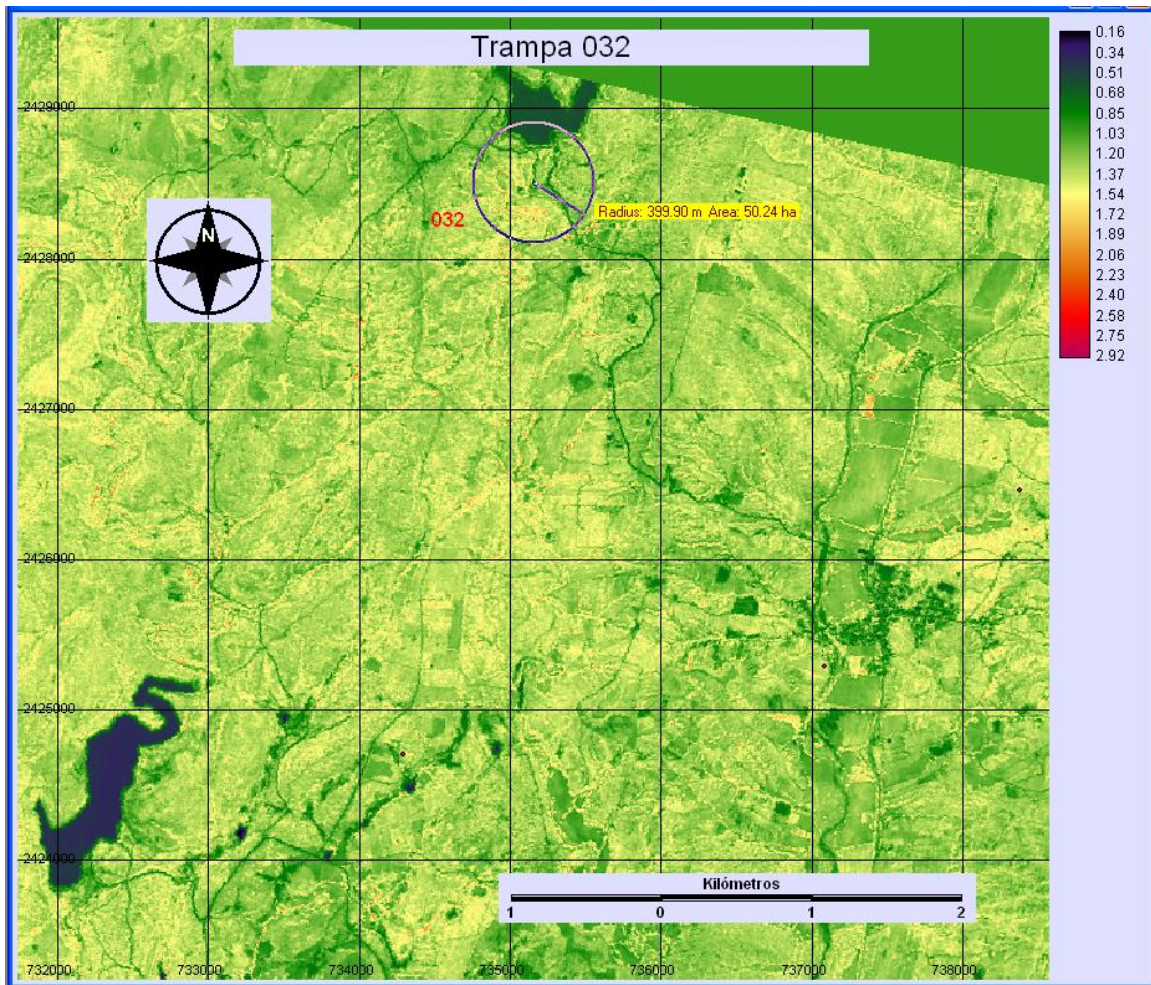


Figura 51 Trampa 032 con captura de mosca en la semana 12 y valores semejantes a las semanas 9 a 11. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

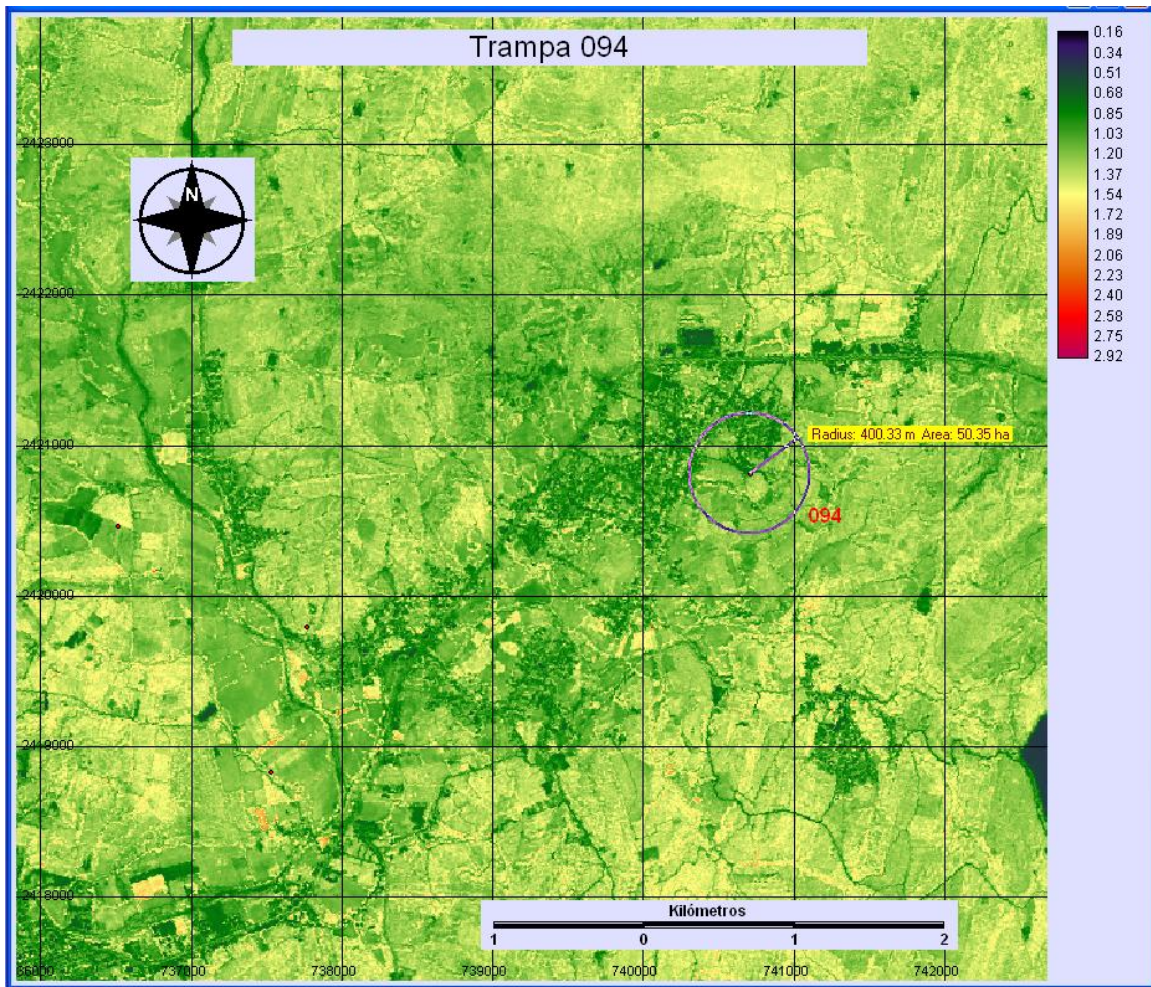


Figura 52 Trampa 094 con mosca en la semana 12 y valores de reflectancia semejantes a la semana 8. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Con respecto a las trampas donde no se reporto presencia de mosca, se encontró que los valores máximos y mínimos eran muy parecidos a los de las trampas de la semana 8, en los cuales parece que ya no se observa el efecto de haber tenido presencia de mosca (Figura 53). Se encontró que los valores van de 0.7 a 1.4 respectivamente. Eliminando los valores extremos, quedan los índices promedio de 0.9 a 1.3, los valores para las trampas analizadas se resumen en la tabla 7.

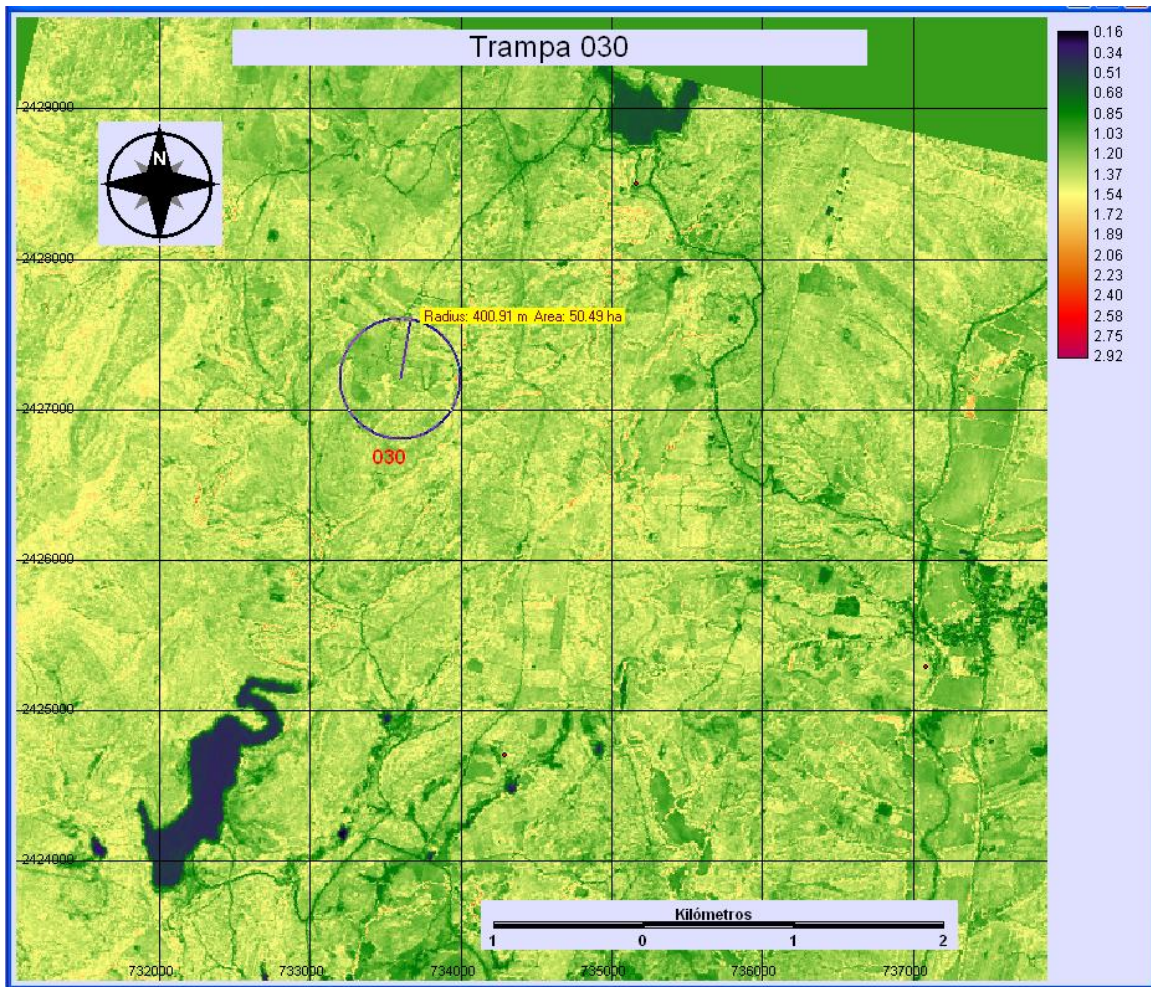


Figura 53 Trampa 030 sin presencia de mosca. Fuente: Imagen SPOT 5 multiespectral K-J 580-306, fecha de la imagen 15/03/07, resultado del cociente de bandas IRM/R.



© CNES 2007, Producida por ASERCA-INEGI bajo Licencia de SPOT IMAGE. "Contiene información de © CNES 2007"

Tabla 7 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en trampas sin presencia de mosca semana 11 del 2007

Zona	Trampa	Cociente IRM/R		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	30	1.1	1.3	1.2
1	37	1	1.2	1.1
1	191	1.1	1.3	1.2
1	46	1.1	1.3	1.2
1	63	1.1	1.3	1.2
2	186	1	1.3	1.15
2	204	1	1.3	1.15
2	205B	0.7	1	0.85
2	s/n	0.9	1.3	1.1
2	118	1.1	1.3	1.2
2	121	1.1	1.3	1.2
2	125	1.1	1.3	1.2
3	258	1	1.3	1.15
3	151	1.1	1.3	1.2
3	238B	1.1	1.4	1.25

Fuente: Elaborado con información del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Aguascalientes (CESVA), Delegación Calvillo y valores identificados.

De manera complementaria, se encontró que los cultivos de avena y alfalfa fueron los que presentaron los valores máximos del índice, los cuales están en promedio cercanos a 2 (Tabla 8).

Tabla 8 Cociente infrarrojo medio/rojo (IRM/R) en cultivos con máximos valores

Cultivo	Cociente IRM/R		
	Mínimo	Máximo	Promedio
<i>Avena</i>	1.55	2.05	1.80
<i>Alfalfa</i>	1.6	2.18	1.89

Fuente: Elaborado con información del Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Aguascalientes (CESVA), Delegación Calvillo y valores identificados.

El análisis de las estadísticas básicas de los datos por semana mostró un valor medio arriba de 1.3 para los datos con mosca con excepción de la semana 8 con una media de 1.2 mientras que para el grupo de datos sin mosca la media fue de 1.5 (Tabla 9).

El análisis de los datos agrupados considerando sólo las semana 9 a 12 ajustó el valor medio a 1.38 con una mediana y moda de 1.4 y una desviación estándar de 0.18, en comparación de los valores para el grupo de datos sin mosca con un valor medio de 1.5, una mediana y moda de 1.2 y una desviación estándar de 0.09 (Tabla 10).

Tabla 9 Estadística básica por variable, datos de trampas con mosca por semana y sin mosca

	Con mosca semana 12	Con mosca semana 11	Con mosca semana 10	Con mosca semana 09	Con mosca semana 08	Sin mosca
N	11	5	3	5	7	15
Media	1.35	1.47	1.3	1.44	1.2214	1.1567
Error estándar de la media	0.05	0.03391	0.1893	0.0886	0.05329	0.02433
Mediana	1.4	1.45	1.35	1.5	1.2	1.2
Moda	1.4	1.40(a)	.95(a)	1.10(a)	1.10(a)	1.2
Desviación estándar	0.16583	0.07583	0.32787	0.19812	0.141	0.09424
Varianza	0.028	0.006	0.108	0.039	0.02	0.009
Asimetría	-0.844	0.315	-0.67	-1.804	1.51	-2.732
Error estándar de la asimetría	0.661	0.913	1.225	0.913	0.794	0.58
Curtosis	0.982	-3.081		3.504	2.3	8.727
Error estándar de la Curtosis	1.279	2		2	1.587	1.121
Rango	0.6	0.15	0.65	0.5	0.4	0.4
Mínimo	1	1.4	0.95	1.1	1.1	0.85
Máximo	1.6	1.55	1.6	1.6	1.5	1.25
Suma	14.85	7.35	3.9	7.2	8.55	17.35

a Existen múltiples modas. Se muestra el valor más bajo

Fuente: Obtenida en el programa SPSS con los datos de los promedios de los índices de las trampas consideradas.

Tabla 10 Estadística básica por variable, datos de trampas con mosca agrupados, excepto semana 8

	Con Mosca (semanas 9- 12)	Sin Mosca	Con mosca Semana 8
N	24	15	7
Media	1.3875	1.1567	1.2214
Error estándar de la media	0.03701	0.02433	0.05329
Mediana	1.4	1.2	1.2
Moda	1.4	1.2	1.10(a)
Desviación estándar	0.18133	0.09424	0.141
Varianza	0.033	0.009	0.02
Asimetría	-1.087	-2.732	1.51
Error estándar de la asimetría	0.472	0.58	0.794
Curtosis	0.646	8.727	2.3
Error estándar de la curtosis	0.918	1.121	1.587
Rango	0.65	0.4	0.4
Mínimo	0.95	0.85	1.1
Máximo	1.6	1.25	1.5
Suma	33.3	17.35	8.55

a Existen múltiples modas. Se muestra el valor más bajo

Fuente: Obtenida en el programa SPSS con los datos de los promedios de los índices de las trampas consideradas.

El histograma de los datos de trampas con mosca presenta una distribución asimétrica, cargada a la derecha, hacia los valores altos 1.3 a 1.6 (Figura 54). El histograma de las trampas sin mosca también es asimétrico a la derecha concentrando las observaciones entre 1.1 y 1.2 (Figura 55). El histograma correspondiente a los datos con mosca de la semana 8 es asimétrico hacia la izquierda y con agrupación de los datos entre 1.1 y 1.2 (Figura 56), con un comportamiento similar al de los datos sin mosca.

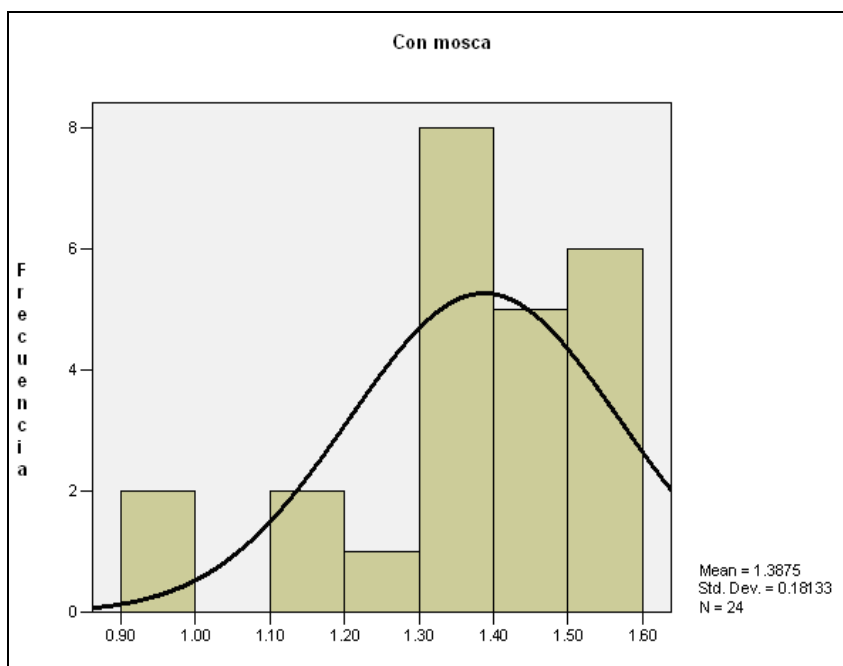


Figura 54 Histograma de datos agrupados con mosca. Mean=media, Std. Dev.= Desviación Estándar, N=Total de observaciones. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

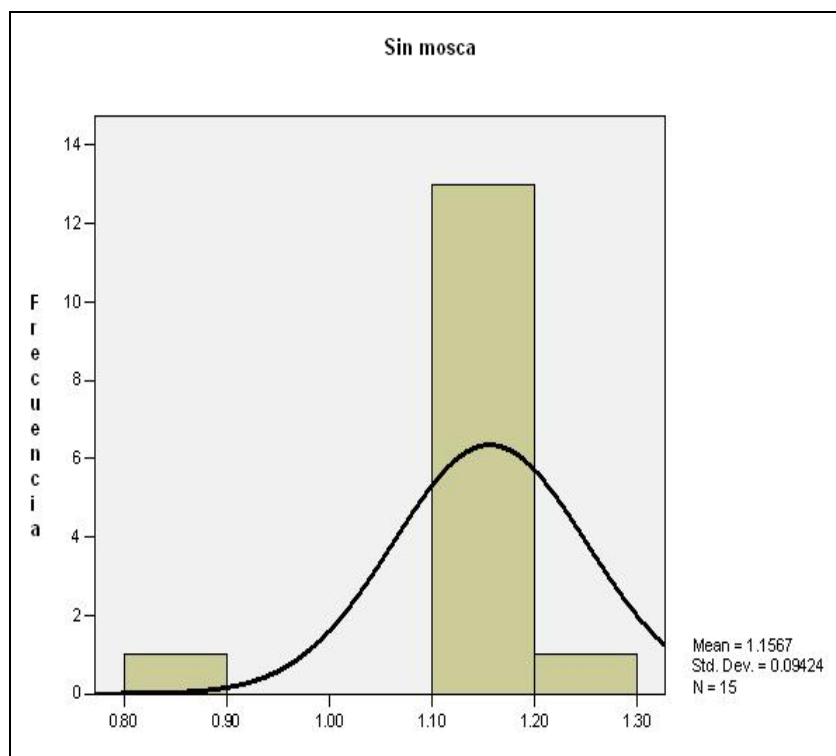


Figura 55 Histograma de datos agrupados sin mosca. Mean=media, Std. Dev.= Desviación Estándar, N=Total de observaciones. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

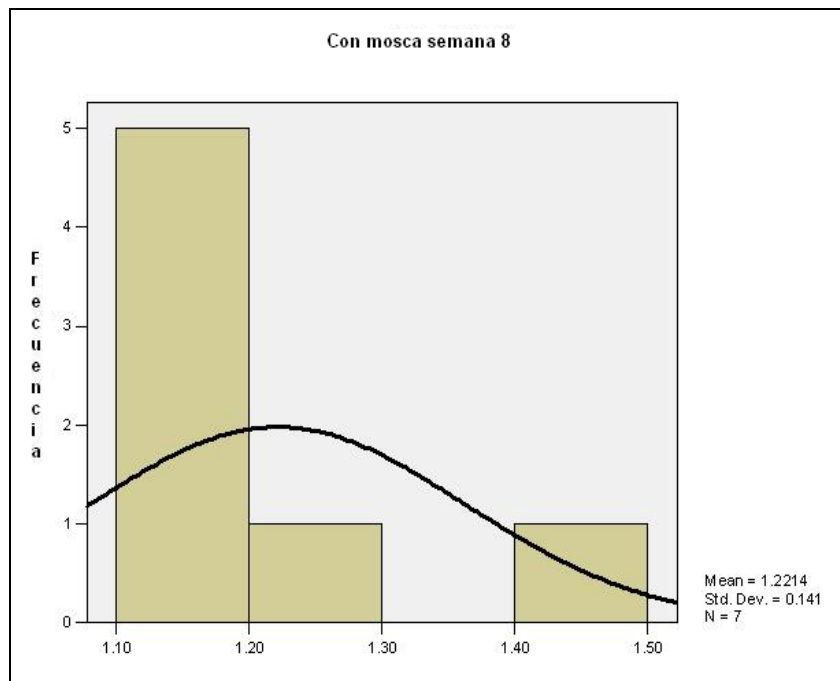


Figura 56 Histograma de datos agrupados sin mosca. Mean=media, Std. Dev.= Desviación Estándar, N=Total de observaciones. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

El análisis de normalidad a partir del gráfico Q-Q Plot para cada uno de los grupos de datos presenta la tendencia normal con un fuerte efecto de algunas observaciones en las colas las cuales puede considerarse como outliers o valores fuera de tolerancia (Figuras 57,58 y 59).

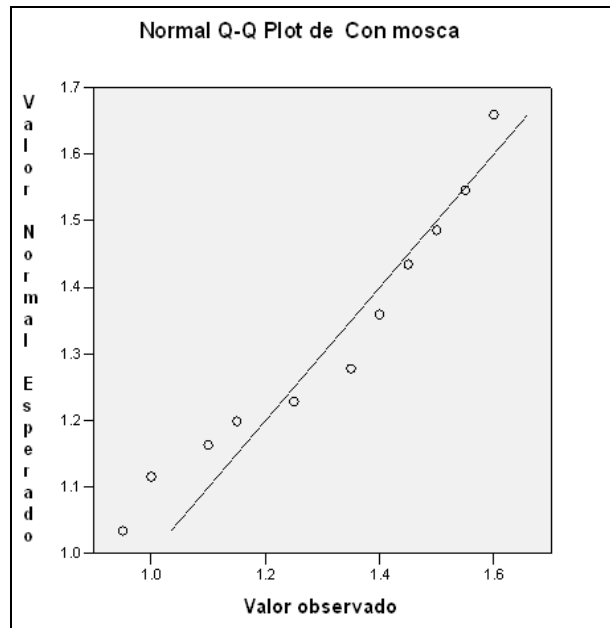


Figura 57 Análisis de normalidad de datos con mosca. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

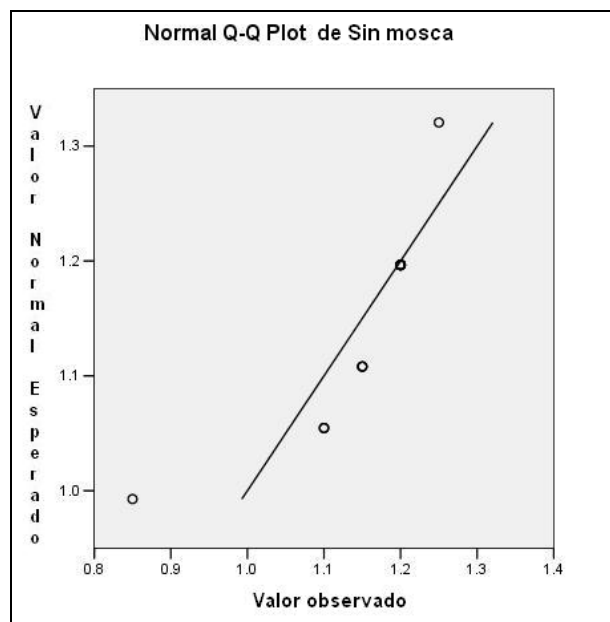


Figura 58 Análisis de normalidad de datos sin mosca. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

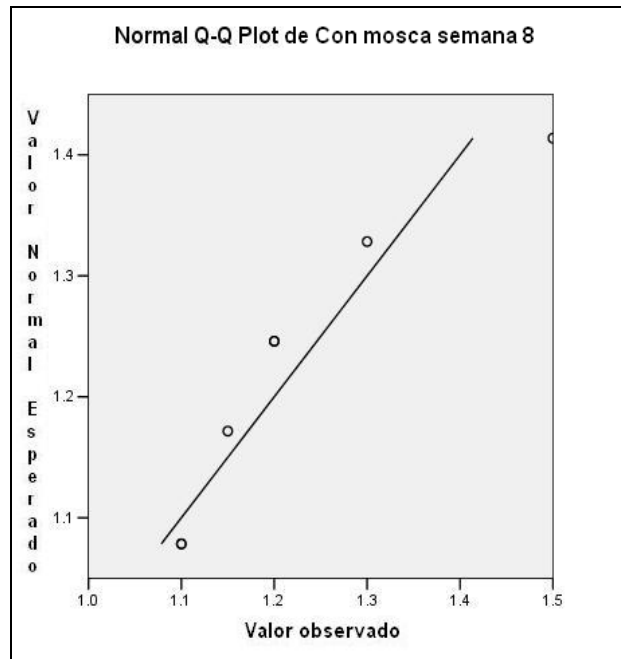


Figura 59 Análisis de normalidad de datos con mosca en la semana 8. Fuente: Elaborado en SPSS con datos del índice infrarrojo medio/rojo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores del cociente de las bandas 4/2 mostraron que en el ancho de banda de los 1500 nm a los 1700 nm, la reflectancia vuelve a descender tal como se observa en un espectro típico de vegetación como se puede apreciar en la figura 19. Esto ocurre por efecto del agua contenida en las hojas según el comportamiento del espectro la vegetación vigorosa o sana (Chuvieco 1990) (Speranza y Zerda 2005).

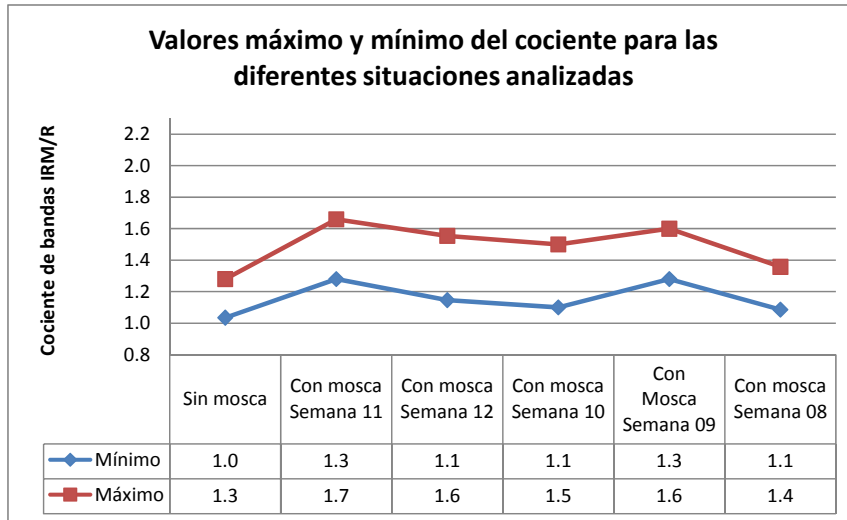
En principio, este resultado evidenció que la hipótesis planteada de que la reflectancia también se dispararía en la banda del infrarrojo medio no era del todo correcta.

No obstante lo anterior, el cociente de bandas 4/2 si evidenció un comportamiento específico cuando se asoció directamente con las trampas con captura de mosca y se comparó contra trampas sin mosca y contra otros cultivos, los valores máximos y mínimos de las trampas con mosca presentaban un incremento casi constante para ambos valores, aunque no de la magnitud esperada inicialmente (Gráfica 1).

Algo interesante fue que la imagen permitió identificar un comportamiento similar para aquellas trampas que reportaron captura de mosca en las semanas previas a la toma de la imagen de satélite, mostrando que las trampas con captura de mosca hasta dos semanas antes de la toma de la imagen, aún presentan efectos sobre los árboles de guayaba.

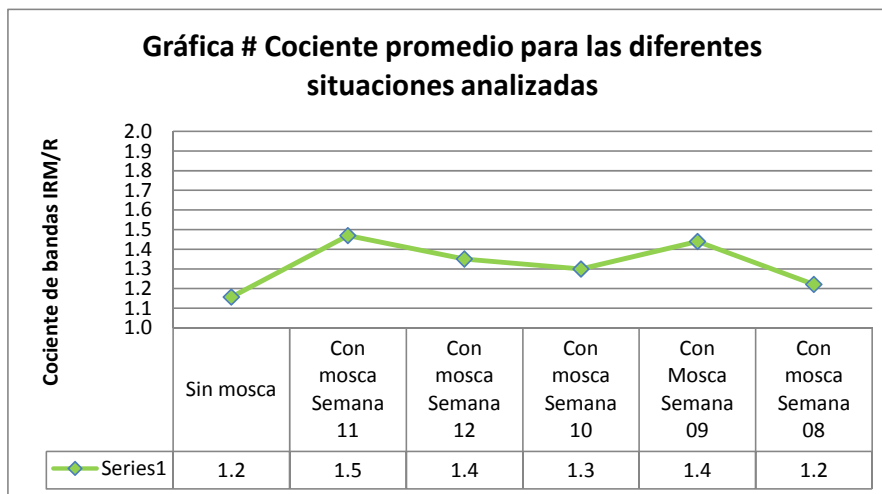
Así mismo, la imagen permitió identificar valores similares para aquellas trampas que reportaron captura de mosca una semana después de la fecha en la que fue tomada la imagen de satélite. Esto se puede asociar con las diferentes fases de desarrollo de la mosca, la cual en su primera fase se lleva a cabo en los frutos y posteriormente cuando el fruto contaminado cae al suelo, la larva se desarrolla en

la tierra en la que se desarrolla el mismo árbol para después emerger como espécimen adulto (Perales et al 2005).



Gráfica 1 Cociente máximo y mínimo Fuente: elaborado con información del cociente de bandas 4/2 de la imagen SPOT5 multiespectral K-J 580-306.

El análisis exploratorio de los valores promedio del índice del cociente de bandas por semana (Tabla 9), mostró claramente que en las trampas con mosca son de 0.2 a 0.3 mayores que aquellas en las que no hay presencia de ésta (Gráfica 2).



Gráfica 2 Cociente promedio Fuente: elaborado con información del cociente de bandas 4/2 de la imagen SPOT5 multiespectral K-J 580-306.

Este comportamiento fue más evidente en el análisis exploratorio de los datos agrupados de todas las trampas con mosca, (excluyendo los de la semana 8) contra los datos de las trampas sin mosca (Tabla 10), donde se aprecia mejor la separación entre ambos grupos de datos.

El análisis del cociente y de los estadísticos de los datos también permitió identificar que las trampas con tres semanas o más de haber detectado mosca, ya no presentan el mismo comportamiento y que sus valores se presentaron más parecidos a los de las trampas sin mosca. Esto se puede estar asociado al tiempo que requieren los controles químicos y mecánicos que se aplican en los lugares donde se captura mosca para que comiencen a mostrar resultados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se validó positivamente la hipótesis planteada de **“identificar mediante análisis de imágenes de satélite, las áreas de guayaba con presencia de mosca de la fruta”**, cumpliendo los objetivos general y particulares de la Investigación. El resultado de la hipótesis está respaldado por las siguientes conclusiones:

- I. Como parte del objetivo general, se pudo identificar mediante la respuesta espectral de los árboles de guayaba, que hay un comportamiento específico de los que están afectados por la presencia de mosca de la fruta; sin embargo al tratar de reproducir e identificar estas diferencias en la imagen de satélite, el proceso se vio limitado por la falta de una banda con información en el rango de los 1000 a los 1100 nm.

No obstante las limitaciones y que en principio pareció no coincidir el resultado del procesamiento con la hipótesis modificada, con la información disponible se pudo identificar un comportamiento específico en las zonas con presencia de mosca de la fruta a través del índice obtenido por el cociente de las bandas infrarrojo medio/rojo. La cantidad de datos revisados sugieren que se trata de un comportamiento consistente, directamente asociado a la presencia de mosca de la fruta y no a otros aspectos externos como pueden ser los meteorológicos o a etapas fenológicas del cultivo, pues las condiciones meteorológicas aplicaron para toda la zona cubierta por la imagen y los espacios asociados con la etapa de caldeo de los árboles no están relacionadas con la presencia de mosca. Lo anterior permitió validar la hipótesis sobre el cociente empleado.

Adicionalmente a la confirmación de la hipótesis, se obtuvo respuesta positiva a las preguntas planteadas durante la fase de procesamiento de la información, las cuales están relacionadas con la temporalidad con la que puede detectarse la presencia de la mosca en la imagen de satélite:

- 1.- Fue posible identificar un efecto relacionado con la presencia de la mosca a partir del cociente infrarrojo medio/rojo, ya que en el grupo de trampas con mosca, el 79% de las trampas tiene valores del índice mayores a 1.35, como lo muestra el análisis estadístico de los datos.
 - 2.- Fue posible detectar los efectos de la presencia de mosca en las dos semanas anteriores a la semana de la toma de la imagen, pues los valores del índice se comportan muy semejantes a los valores de las trampas con mosca en la semana de la toma de la imagen.
 - 3.- También fue posible detectar algún efecto por la mosca en trampas donde no se ha reportado mosca, este es el caso de las trampas que hasta la semana 12 reportaron presencia de mosca; estas presentan un comportamiento similar a las trampas con mosca de la semana de la toma de la imagen.
- II. Si bien los resultados son positivos, no se consideran concluyentes. La identificación de este comportamiento en la imagen de satélite procesada representa un resultado alentador para continuar con el análisis, empleando índices de vegetación más específicos, los cuales no se utilizaron en esta investigación hasta no haber agotado las posibilidades con los procedimientos más básicos.

En este sentido, es preciso realizar el procesamiento con información específica de las bandas en las que se identificó la diferencia durante las lecturas radiométricas de campo, por lo que se sugiere utilizar alguna otra imagen de satélite que disponga de información en esa porción del espectro electromagnético. Actualmente sólo el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y el LANDSAT (MSS) tienen bandas con información en el rango de los 1000 nm a los 1100 nm, aunque tienen como desventaja su resolución espacial que es de 1 y 4 km para el AVHRR y de 80 m para

LANDSAT, comparada con los 10 m del satélite SPOT 5. Otra opción es la de obtener una imagen hiperespectral, tal vez de algún sensor aerotransportado configurable, en el que se pueda captar esta banda de información. La disponibilidad de más de una banda en el rango de los 1000 a los 1100 nm y una mejor resolución espacial redundarán en resultados más concretos.

- III. Se considera conveniente reproducir estos resultados con imágenes de diferentes épocas del año, con la finalidad de descartar que estas diferencias estén asociadas a la fenología del árbol de guayaba y a los efectos climatológicos presentes durante la toma de la imagen.

- IV. Finalmente, en el proceso para alcanzar los objetivos particulares de esta investigación, se corroboró la bondad de las técnicas de clasificación supervisada apoyadas con datos de campo en la definición de los polígonos de entrenamiento, como procedimiento para la identificación de la cobertura del cultivo de la guayaba y para la estimación de la superficie de este cultivo en el municipio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASERCA-ASPRA Consultores. 1996. Estudio mundial de la guayaba. ASERCA. México. Abril 1996. 189 p.

Baker Doran J., Falconer Allan. 1998 Remote sensing and GIS applied to site-specific agriculture. SIMPLOT-Utah State University-NASA. Idaho USA. 54 p.

Berlanga Robles C. A., Ruiz Luna A. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del Sistema lagunar Teacapán-Agua brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. Revista Universidad y Ciencia No. 23. México. p 29 a 46.

Blake, W. 2005. Early Detection of Oak Wilt Disease in Quercus spp.: A Hyperspectral Approach. A term paper in partial fulfillment for the requirements of ES6973. University of Texas San Antonio. USA. 14 p.

Canada Centre for Remote Sensing. (2007) Fundamentals of remote sensing. Digital edition. Canadá. http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php.

Chuvieco E. 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Colección Monografías y tratados Ger. Ediciones Rialp S.A. Madrid. España. 453 p.

CODAGEA-INIFAP (CEPAB). Sin año de publicación. Tecnología para producir Guayaba en Calvillo Aguascalientes. Folleto para productores Núm. 28. Aguascalientes. México. Edición digital.
<http://www.aguascalientes.gob.mx/codagea/produce/28.htm>

Congalton R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing Environment No. 37. USA. p 35-46.

Eastman J. Ronald. 2006. IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing. IDRISI Production. Clark University. USA. 327 p.

Gobierno del Estado de Campeche. (Sin Año). Condiciones para el manejo y control de fruta hospedera de mosca de la fruta. Gobierno del estado de

Campeche 2003 2008-Promotora de Servicios comerciales del estado de Campeche. Campeche. México.

Hoffine E., Sader S. 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. Remote Sensing Environment No. 80. USA. p 385-396.

INEGI. 2007. Anuario Estadístico del Estado de Aguascalientes. Aguascalientes. México.

INEGI. 2006. Carta topográfica escala 1:50 000 CALVILLO F13D17. 2ª edición. México. 1 Hoja.

INEGI. 2006. Carta topográfica escala 1:50 000 AGUASCALIENTES F13D18. 2ª edición. México. 1 Hoja.

INEGI. 2006. Cuadernos estadísticos municipales del Estado de Aguascalientes (Municipio de Calvillo). Formato digital. México.

INEGI. 2007. Información Referenciada geoespacialmente Integrada en un Sistema (IRIS), Navegante geoestadístico. Versión 4.0.2 México.

InfoASERCA 1. 1996. Una pincelada a la fruticultura en México. Revista Claridades Agropecuarias No. 35. InfoASERCA. Julio 1996. México. 36 p.

InfoASERCA 2. 1996. La fruticultura como generadora de divisas. Revista Claridades Agropecuarias No. 35. InfoASERCA. Julio 1996. México. 36 p.

InfoASERCA. 1998. La guayaba en México, un largo camino por recorrer. Revista Claridades Agropecuarias No. 59. InfoASERCA. Julio 1998. México. 32 p.

INIFAP, SAGARPA, USDA, ARS, Fundación PRODUCE. 2003. Memoria Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos México-USA. Edición digital. Aguascalientes, México. 297 p.

Jensen John R. 1986. Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. Prentice-Hall. New Jersey. USA. 379 p.

Jensen John R. 2007. Remote Sensing of the Environment, an Earth Resource Perspective. Geographic Information Series. Pearson Prentice Hall. USA. 592 p.

Lira Chávez Jorge. 1987. La percepción remota: Nuestros ojos desde el espacio. Colección La ciencia desde México # 33. Editorial Fondo de Cultura Económica. México. 150 p.

Lira Chávez Jorge. 2002. Introducción al tratamiento digital de imágenes. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. 379 p.

Lira Chávez Jorge y García E. 2003. Characterization of vegetation in the south of México by means of canonical expansion. International Journal of Remote Sensing Vol. 24 No. 5, Taylor & Francis Ltd. p 1083-1093.

Lo Chor Pang. 1986. Applied Remote Sensing. Longman Scientific & Technical. Longman Group UK Limited, New York. USA. 393 p.

National Agricultural Statistics Service. 2009. Remotely sensed data for crop condition and crop yield. United States Department of Agriculture (USDA). USA. Digital edition.

http://www.nass.usda.gov/Surveys/Remotely_Sensed_Data_Crop_Yield/index.asp

Perales de la Cruz, Miguel Ángel., Padilla Ramírez, José Saúl., González Gaona, Ernesto., Reyes Phillips, Héctor Rogelio., compiladores. 2005. Manual para la producción integral de la guayaba. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-INIFAP-Consejo Nacional Mexicano de la Guayaba A.C.-Fundación PRODUCE Aguascalientes A.C. México. 179 p.

Research Information Centre. 2009. Satellites help forecast crop yield. European Commission. UE. Digital edition.

http://ec.europa.eu/research/infocentre/article_en.cfm?id=/research/headlines/news/article_06_09_15_en.html&item=Infocentre&artid=2273

Rodríguez Moreno Victor M., Tiscareño López Mario, Báez González Alma D. 2003. Discriminación del maíz (*Zea mays* L) entre otras especies agrícolas y estimación de su superficie establecida usando imágenes LANDSAT 7 ETM+ Simposio Binacional de Modelaje y sensores remotos México-USA Memoria. Aguascalientes. México. p 140-150.

Ruiz Corral José Ariel., Medina García Guillermo., González Acuña Irma J., Ortiz Trejo Ceferino., Flores López Hugo E., Martínez Parra Ramón A., Byerly Murphy Keir F. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP-SAGAR, Jalisco México. 324 p.

Ruiz Corral José Ariel., Anguiano Contreras José., Alcántar Rocillo Juan José., Chávez León Gilberto., Coria Ávalos Víctor Manuel. 2003. Guava harvest programming capabilities in Michoacán México. Simposio Binacional de Modelaje y sensores remotos México-USA Memoria. Aguascalientes. México. p 174-180.

Sabins Floyd F. 1986. Remote Sensing, Principles and Interpretation. 2nd Edition. W H Freeman and Company. New York, USA. 449 p.

SAGARPA. 2006. Plan Rector del Sistema Producto Guayaba: Estado de Aguascalientes. SAGARPA-DDR1. Mayo.

Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias INIFAP. 1998. Guía para la asistencia técnica agrícola: área de influencia del Campo Experimental Pabellón. 4ª Edición. Aguascalientes. México. 429 p.

Speranza F. C. y Zerda H. R. 2005. Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. Edición digital. INTA. Argentina. 10 p. http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/areasuelos/ndvi_forestal.pdf

SPOTIMAGE 2008 Système Pour l'Observation de la Terre. Satélites SPOT Bandas espectrales y resoluciones, Web page, Francia. <http://www.spotimage.fr/web/es/320-resoluciones-y-modos-espectrales.php>

SPP-CSNEGI. 1981. Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología. 1ª edición. México. 48 p.

Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. 1999. *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM.

Zhang M., Liu X., O'Neill M. 2002. Spectral discrimination of *Phytophthora infestans* infection on tomatoes based on principal component and cluster analyses. International Journal Remote Sensing Vol. 23 No 6. Taylor & Francis Group. USA. p 1095-1107.

Páginas web consultadas y relacionadas con el tema

- <http://www.aguascalientes.gob.mx/estado/municipios/mfps2.aspx>
- <http://guayabablog.blogspot.com/>
- <http://www.aguascalientes.gob.mx/codagea/produce/28.htm>
- http://www.infoagro.com/frutas/mosca_de_la_fruta.htm
- http://senasicaw.senasica.sagarpa.gob.mx/portal/html/sanidad_vegetal/campanas_fitosanitarias/campana_nacional_contra_mosca_de_la_fruta.html
- http://senasicaw.senasica.sagarpa.gob.mx/portal/html/sanidad_vegetal/campanas_fitosanitarias/moscas_nativas_de_la_fruta.html
- [http://www.ecologia.edu.mx/folemtex/documentos/FEM43\(3\)2.pdf](http://www.ecologia.edu.mx/folemtex/documentos/FEM43(3)2.pdf)
- http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/52-myrta3m.pdf
- <http://www.amsda.com.mx/PRNacionales/Nacionales/PRNguayaba22.pdf>
- http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_e.php
- <http://www.spotimage.fr/web/es/554-imagenes-spot.php>
- http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/areasuelos/ndvi_forestal.pdf
- http://www.nass.usda.gov/Surveys/Remotely_Sensed_Data_Crop_Yield/index.asp
- http://ec.europa.eu/research/infocentre/article_en.cfm?id=/research/headlines/news/article_06_09_15_en.html&item=Infocentre&artid=2273