

17

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA ZONA CENTRO DEL ESTADO DE MICHOACÁN EMPLEANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES E INFORMACIÓN TEMÁTICA

T E S I S

Que para obtener el grado de
Licenciado en Geografía



P R E S E N T A

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

Ericka Gabriela García Contreras

Dirigida por:

Dr. Jorge Lira Chávez



Ciudad Universitaria, México D.F. 2000

281257



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.



A mi mamá:
por darme la vida, por su
plena confianza y apoyo
siempre brindados.

Agradecimientos

A mi mamá por haberme demostrado y enseñado todo el valor y la fortaleza que se tiene cuando se desean hacer las cosas, por su gran apoyo y confianza depositados en mí.

Mis más sincero agradecimiento al Dr. Jorge Lira, por haber aceptado dirigir mi tesis, por compartir sus conocimientos en este trabajo de tesis que es muy enriquecedor para mi formación, y enseñarme lo que verdaderamente es la Percepción Remota, gracias por todo su gran apoyo y comprensión brindados siempre.

Agradezco a todos mis maestros de la Facultad por mi formación académica y al Dr. Jorge Caire Lomelí por todas sus enseñanzas en clase.

Al Coordinador Eduardo A. Pérez Torres por su amistad, confianza y ser uno de los sinodales.

Al jurado de esta tesis, Mtra. Ma. Eugenia Villagómez, Dra. Silvana Levi y Dra. Liliana Levi, por aceptar ser mis sinodales, sus comentarios y revisar gentilmente mi trabajo.

Al Biolg. Javier Apodaca, de la SEMARNAP, por el material brindado para la presente tesis.

Al Dr. Gerardo Bocco, del Centro de Ecología UNAM, Unidad Académica Morelia, por el material geomorfológico del estado de Michoacán, y a su estudiante de doctorado Miguel Ángel Torres por mandar muy amablemente el material solicitado.

Al Ing. Alan Ortega jefe del Laboratorio de Geomática de Aserca por todas las facilidades que me brindó.

Al Lic. Miguel Uribe, del Laboratorio de Geomática de Aserca, por toda su paciencia, gran apoyo y tiempo invertidos en la realización de la presente tesis, así como también al Ing. Ricardo Pastrana, gracias por su apoyo en la parte final de este trabajo.

Al Lic. Sergio Varela del Inventario Nacional Forestal, por el material brindado.

Al Sr. Arturo, de la biblioteca del Instituto de Geografía por su buena amistad y por todo el material prestado muy amablemente .

Me es grato agradecer, a mi amiga Dulce Ma. Abrajan por su perdurable y linda amistad que ha crecido durante todo este tiempo juntas.

A Gaby mi amiga y compañera de LabPr, gracias por tu amistad durante este tiempo y en la lejanía.

A mi amigo Alejandro Hernández por su bella amistad y gran apoyo siempre brindado en cómputo.

A mis amigos de la Facultad, Daniel por la presura que tenía para que me titulara, a Luisa por su amistad, consejos y todas las prácticas juntas y a Sergio por mantenerme riendo durante la carrera.

A todos mis amigos del museo Universum, en especial a Gris, Emy, Juanita, Ricardo, Dolores y Raquel, gracias por todos esos fines de semana juntos.

A todos los chicos que han estado en LabPr y que he tenido el gusto de conocerlos, Dubhe, José, Gaby, Manuel, Francisco, Nidiyare, Olinda y Ricardo.

A Kamyla, por todas las noches esperarme como buen perro fiel cuando llegaba.

Especialmente a mi, por mi gran espíritu de seguir adelante con todo, por no desistir y terminar felizmente esta tesis que me costo mucho trabajo, pero en la cual aprendí muchas cosas nuevas e interesantes; y así poder aportar mi granito de arena en beneficio del Colegio de Geografía.

A Alejandro Suárez, por su gran amor y cariño, por enseñarme lo que hace la Física y tenerme mucha paciencia.

A la DGAPA por la beca otorgada.

Y al Instituto de Geofísica por sus instalaciones brindadas, en mi estancia para la realización de mi tesis.

Índice

Introducción	1
Conceptos y definiciones	4

I Características de la zona de estudio

1.1 Información del área de estudio	6
1.2 Ubicación	7
1.3 Coordenadas	8
1.4 Escala de trabajo y características de las principales plataformas orbitales empleadas en Percepción Remota	8
1.5 Fecha de la imagen Landsat TM 28-47	10
1.6 Georreferenciación	11
1.7 Geología	13
1.8 Clima	14
1.9 Tipos de vegetación	15

II Metodología de análisis

2.1 Diagrama de bloques para el análisis de la imagen multiespectral digital Landsat TM 28-47, del año 1996, del estado de Michoacán	18
2.1.1 Cargar todas las bandas del estado de Michoacán contenidas en un CD-ROM a la PC.....	21
2.1.2 Recorte de la zona de estudio, imagen multiespectral digital: Micho	22
2.1.3 Recorte de una subimagen con vegetación únicamente de la zona de estudio para el análisis canónico: Miveg	26
2.1.4 Compuesto a color, histogramas y contraste	30
2.1.5 Análisis en Componentes Principales (PCA) transformación <i>Karhunen-Loeve (KL)</i> de la subimagen: Miveg	37
2.1.6 Obtención de los parámetros en la transformación PCA de la subimagen Miveg	38
2.1.7 Kernel de la transformación que caracteriza la vegetación	44
2.1.8 Algebra de bandas	44
2.1.9 Componente Principal 1	45
2.2.1 Índice de Vegetación Normalizado	46
2.2.2 Análisis Canónico y la Transformación <i>Kauth-Thomas</i>	48

III Análisis estadístico de la imagen

3.1 Matriz de correlación de las bandas sintéticas, Componente 1:cpe01, Índice de vegetación Normalizado: ndvi y Transformación <i>Kauth-Thomas</i> : verde	53
3.1.1 Matriz de covarianza	54
3.1.2 Matriz de correlación	55
3.1.3 Componentes, Eigenvalores y Eigenvectores	55
3.1.4 Compuesto a color RGB de las tres bandas sintéticas: cpe01, ndvi y verde	56
3.1.5 Clasificación con Isodata empleando las bandas sintéticas: cpe01, ndvi y verde	57
3.1.6 Imagen con 15 número de clases	59
3.1.7 Edición de la imagen para resolver ambigüedades de sombra, mapa temático con 13 clases	60

IV Información Temática

4.1 Modelo Digital del Terreno	62
4.1.1 Geología	64
4.1.2 Tipos de clima	66
4.1.3 Vegetación	67
4.1.4 Unidades del Paisaje Geomorfológico	70

V Resultados y Conclusiones

5.1 Resultados	72
5.2 Conclusiones	73

VI Bibliografía	75
-----------------------	----

Glosario	78
Infraestructura de LabPr	81

INTRODUCCIÓN

Dentro del acelerado avance de las ciencias, la Geografía ha tenido un amplio desarrollo para la solución de problemas que existen en el espacio geográfico, esto con la ayuda de ciencias auxiliares como la Cartografía Automatizada, la Percepción Remota, la Física, las Matemáticas y la Informática, entre otras, hace que se impulse una revolución tecnológica en una de las ciencias más antiguas: la Geografía.

Esto permite a los llamados Sistemas de Información Geográfica y a la Percepción Remota mejorar algunas tareas tradicionales, que ayudan a los geógrafos en un positivo y rápido procesamiento, almacenamiento y manipulación de la información geográfica.

Para la realización del presente trabajo, se tiene una estrecha relación de la Percepción Remota con la Geografía; es por ello que se realiza y se hace una integración de un conjunto de conocimientos y herramientas generando de esta manera, interpretaciones, actividades y resultados interdisciplinarios de ambas ciencias.

Mediante el procesamiento digital de imágenes y con el manejo de la información espacial de la zona centro del estado de Michoacán se pretende reunir, traslapar y analizar la correlación que existe con la caracterización de la vegetación en esta área geográfica. Esto permitirá integrar espacio y tiempos determinados por la geografía del lugar.

Las bases para el desarrollo de esta tesis, son básicamente el procesamiento y el análisis de una imagen digital multispectral e información temática de la zona centro del estado de Michoacán, analizando tres variables canónicas que caracterizan a la vegetación, y las cuales son: el Análisis de Componentes Principales (utilizando la componente 1), el índice de vegetación normalizado (NDVI); y la transformación *Kauth-Thomas* (utilizando la componente verdor).

Esto con el objetivo de presentar una metodología para caracterizar tipos de coberturas de la vegetación, por medio de las tres variables canónicas mencionadas arriba, y después formar una imagen multibanda, siendo insertada esta última en un clasificador espectral no supervisado llamado *Isodata* generando un mapa temático de tipos de coberturas de vegetación.

De lo anterior, el estado de la vegetación tiene tres características o variables decorrelacionadas y son principalmente: el albedo del terreno incluyendo la vegetación, que es, de estas tres variables canónicas, el análisis de componentes principales, la componente 1. La siguiente característica es la intensidad en el verdor, y se obtiene aplicando la transformación *Kauth-Thomas*, utilizando la segunda componente llamada verdor. Por último el contenido de humedad que está dado por el índice de vegetación normalizado. Tomando en consideración lo anterior mediante el procesamiento digital de imágenes se hizo un análisis canónico de la vegetación en la zona centro del estado de Michoacán.

Con la metodología utilizada se demuestra que para realizar estudios de coberturas vegetales se tiene un óptimo resultado si se hace un análisis canónico y su implantación por medio de la transformación *Kauth-Thomas*, la descomposición en componentes principales y un índice de vegetación normalizado, es decir, que estas tres variables decorrelacionadas se complementan entre sí para una mejor caracterización de la vegetación.

Esto es un proceso de análisis canónico diseñado especialmente para estudiar la estructura espacial de la cobertura vegetal presente en una imagen multispectral. El análisis canónico es, separar una clase (en este caso vegetación) del resto de la imagen y se define de la siguiente manera: "El análisis canónico es una variante de la transformación *Karhunen-Loeve* (KL), pero con un carácter más específico, pues incluye información

acerca del comportamiento estadístico de las clases de patrones de la imagen multispectral y por lo mismo se requiere de información apriori acerca de la misma" (Lira, 1998). En esta transformación del análisis canónico se pretende obtener una máxima separación entre las clases espectrales predefinidas, y si se quiere separar una sola clase del resto, se utiliza la transformación de *Kauth-Thomas*; es decir que la vegetación ha sido separada espectralmente del resto de los patrones espectrales de la imagen.

El análisis canónico en percepción remota es la reducción y la selección de características espectrales, así como el resultado de las clases frecuentemente distribuidas en la dirección de la información de máxima varianza. Esto es particularmente cierto para tipos de cobertura espectralmente similares (Richards, 1986).

Ahora pasaremos al Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), cuya función presenta la sensibilidad de los cambios en la cobertura vegetal, basándose en la diferencia de reflectancia que la vegetación muestra, y evaluar la humedad de la vegetación viva (Hardy y Burgan, 1999).

Para este trabajo se utilizaron las siguientes bandas de acuerdo a la relación abajo escrita:

$$NDVI = \frac{\text{banda7} - \text{banda4}}{\text{banda7} + \text{banda4}}$$

Utilizando la banda micho4 que se encuentra en el infrarrojo cercano (IRC) y la banda micho7 que está en el infrarrojo medio (IRM).

Y con el análisis en componentes principales se obtuvo la primer componente principal, que es una suma ponderada de las bandas originales, esto es que, contiene la mayor parte de la información de las bandas originales y de esta manera evaluar el albedo de las coberturas de la vegetación.

El análisis en componentes principales se define de la siguiente manera: "La descomposición en componentes principales es una transformación al conjunto de datos que se aplica simultáneamente a todas las bandas que componen la imagen, obteniéndose como resultado una imagen multispectral con bandas decorrelacionadas.

Esta transformación es denominada por algunos autores como Karhunen-Loeve (KL), Hotelling o Transformación de Eigenvector" (Lira, 1998).

Con estas variables, al final, se formó una imagen multibanda como ya se mencionó arriba, compuesta por la componente principal 1, el índice de vegetación normalizado y la transformación *Kauth-Thomas*, para luego ser insertada dentro de un clasificador espectral no supervisado y generar un mapa temático de tipos de coberturas de vegetación.

Las capas de información complementarias para este mapa temático fueron: la geología del lugar, el Modelo Digital del Terreno (MDT) y las unidades geomorfológicas.

La tesis contiene cinco capítulos de los cuales el primero abarca las características de la zona de estudio como son: información del área, su ubicación, las coordenadas, la escala de trabajo y las principales plataformas orbitales empleadas en Percepción Remota, fecha de la imagen, la georreferenciación, así como la descripción de las características del clima, geología y tipos de vegetación. En el segundo capítulo se encuentra la metodología de análisis, mediante la cual se hace un diagrama de bloques en donde se realizan cada una de las etapas y los procesos por los cuales tiene que pasar la imagen multispectral digital. En el tercero, que es el análisis estadístico de la imagen, se sigue con las etapas del diagrama de bloques para generar un grupo de bandas sintéticas que caracterizan a la

vegetación, y se obtienen los coeficientes de la transformación, se genera la matriz de correlación para utilizar los clasificadores de segmentación espectral y producir el mapa temático. En el capítulo cuarto, que es la información temática, son generadas las capas de información de los temas de Geología, el Modelo Digital de Terreno y la Unidades Geomorfológicas y sobre impuestos con la imagen. Y en el quinto capítulo y último, están los resultados y las conclusiones.

Esta tesis fue hecha en el laboratorio de Percepción Remota (LabPr), del Instituto de Geofísica de la UNAM, dirigida por el Dr. Jorge Lira Chávez, fue desarrollada la presente tesis, en el marco del proyecto de investigación: IN102797, financiado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), mediante una beca de apoyo económico que la DGAPA me dió para la realización del presente trabajo.

CONCEPTOS Y DEFINICIONES

Los seres vivos disponemos de sentidos que nos permiten apreciar las condiciones de nuestro entorno. Sentimos remotamente algunas de tales condiciones mediante el oído o la vista. Por ejemplo, el oído reacciona a las ondas sonoras que viajan a través de la atmósfera, permitiéndonos oír el trueno, el viento y otros sonidos, y una visión normal es sensible a algunas de las energías electromagnéticas emitidas y reflejadas por los objetos (Robinson, 1984).

En los párrafos siguientes se escriben los conceptos y elementos que se utilizan en el procesamiento digital de imágenes y son adaptados del libro de La Percepción Remota: Nuestros ojos desde el espacio, por el Dr. J. Lira (1995), publicado por el Fondo de Cultura Económica, México.

Ahora todo ser humano se encuentra rodeado de imágenes que percibe a través del sentido de la vista; la mayor cantidad de información la recibe en forma de imágenes, de todo tipo, en todos colores y en blanco y negro. La radiación electromagnética que proviene de los objetos circundantes hiere la retina, que a su vez la transforma en pulsos eléctricos, formando la psicovisión la imagen correspondiente a la escena de interés. El subsistema de formación de imágenes (Lira, 1987) del ser humano es bastante limitado en cuanto al tipo y energía de la radiación se refiere. Su sensibilidad se restringe a una pequeña porción del espectro electromagnético; es incapaz de percibir imágenes de cualquier otro tipo de radiación (Lira, 1995).

La Percepción Remota es de gran importancia como ciencia multidisciplinaria, y se ha convertido por ejemplo en la parte útil para la elaboración de mapas, entre otros.

La definición más aceptada es: la extracción de información acerca de una superficie (física o virtual) empleando un mecanismo de transporte de energía (electromagnética o acústica, por ejemplo) y un arreglo de sensores remotos, los cuales generan datos de dicha superficie en forma de una imagen multispectral. El análisis de estos datos se hace generalmente con propósitos de prospección del medio ambiente.

El objetivo de estudio y principio de análisis en percepción remota es precisamente el paisaje, sistema físico tridimensional, iluminado por una fuente de iluminación.

Los elementos que componen una imagen digital están dados primeramente por una escena con la cual interactúa la energía radiante emitida por una fuente de iluminación (figura 1.1).

Sobre la escena se define un elemento con dimensiones físicas, denominado **campo instantáneo de vista (CIV)** (figura 1.1), cuyo tamaño depende de las dimensiones del paisaje, de la resolución del sensor remoto y de la distancia de éste al CIV. En otras palabras, el tamaño del campo depende de la geometría particular paisaje/escena/sensor y de la eficiencia de este último.

Un **pixel** (figura 1.1) es la representación numérica o lógica del campo instantáneo de vista y es la medida de la energía promedio que proviene de dicho campo; a cada pixel le corresponde sólo un campo y viceversa.

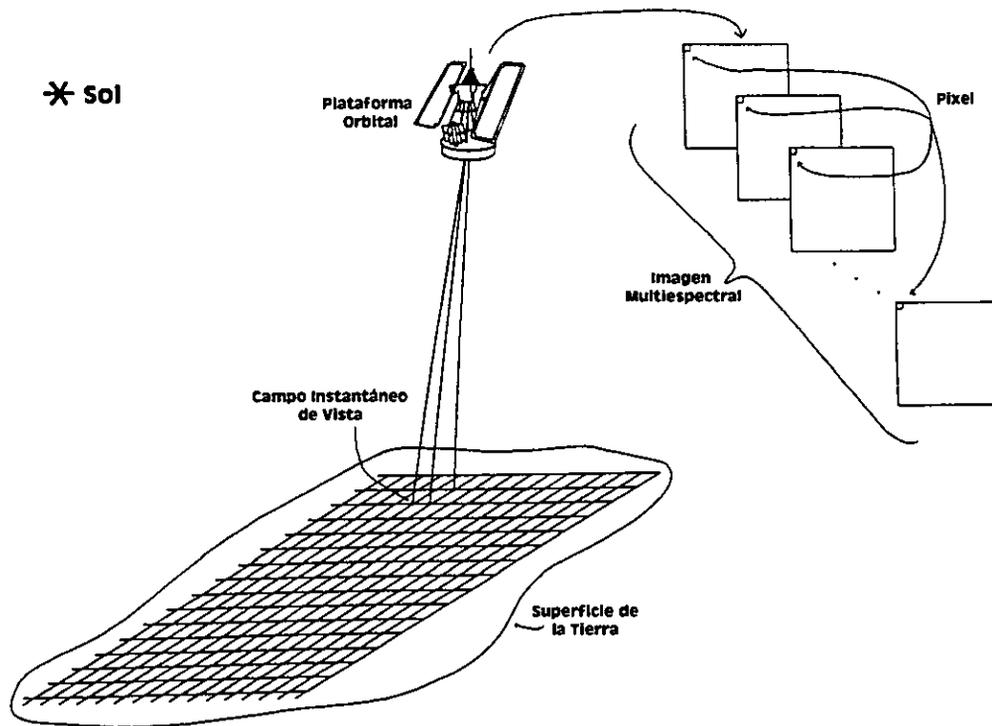


Figura 1.1.- Esquema de la generación de una imagen digital multiespectral.

Una imagen digital es la representación lógica de una escena y que en general esta representación tiene forma numérica y algunas veces visual.

Al conjunto de imágenes digitales (cuatro o siete) se le denomina **imagen multiespectral** (figura 1.1) y al conjunto de de números para cada CIV se les conoce como **firma espectral**.

La firma espectral representa la respuesta característica de un objeto a determinadas longitudes de onda.

De ahí que una imagen multiespectral esté formada por un conjunto de imágenes digitales, cada una de ellas conteniendo aquellos aspectos de la escena que corresponden a un color determinado y que, a su vez, la firma espectral contenga las características del conjunto de objetos que se encuentran en el CIV para cada color empleado en la observación correspondiente de la escena.

CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1 Información del área de estudio.

La ubicación espacial de la zona de estudio (figura 1.2) está comprendida dentro de las siguientes provincias fisiográficas:

1) Provincia del Sistema Volcánico Transversal.

La zona está integrada por grandes sierras volcánicas, coladas de lava, conos dispersos, amplios escudos-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas, cadenas de grandes estrato-volcanos y sobre el paralelo de 19° está el trazo de la gran falla Clarión.

También cuenta con amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como: Pátzcuaro y Cuitzeo (Síntesis Geográfica de Michoacán, 1985).

2) Subprovincia Neovolcánica Tarasca.

Se caracteriza por un vulcanismo reciente (del plioceno). Está clasificada fisiográficamente como sierra volcánica con llanuras, e igual que el Sistema Volcánico Transversal, tiene grandes coladas de lava y sierras complejas.

Los conos cineríticos (se caracterizan por la expulsión de cenizas) de una sola fase eruptiva, basáltica y están a una altitud de 2000m.

El cerro de Tancítaro es sumamente amplio, presenta una cresta alargada que alcanza 3845 msnm, es abundante en rocas lávicas andesíticas y está rodeada por unos 250 conos volcánicos pequeños, entre ellos el Paricutín (Síntesis Geográfica de Michoacán, 1985).

3) Subprovincia Escarpada Límitrofe del Sur.

Por el declive que presenta esta subprovincia de aproximadamente 30 kilómetros y con un descenso que va de los 2000 hasta los 300 msnm se le llama Escarpada Límitrofe del Sur.

Presenta material volcánico del terciario por lo tanto es más antiguo y por ende más erosionado que el de la provincia anterior.

Esta región fisiográficamente es una zona de transición climática porque tiene climas de los templados hacia los cálidos.

1.2 Ubicación.

El área de estudio (figura 1.2) seleccionada para este trabajo se encuentra en el estado de Michoacán el cual forma parte de la región Centro Occidente de México, su localización espacial de dicho estado es $20^{\circ}23'44''$ y $18^{\circ}09'49''$ de latitud norte y $100^{\circ}04'48''$ y $103^{\circ}44'20''$ de longitud oeste.

El cuadrángulo seleccionado abarca las coordenadas extremas $18^{\circ}51'56.12''$ a $19^{\circ}34'55.27''$ de latitud norte y $102^{\circ}30'17.46''$ a $101^{\circ}06'20.61''$ de longitud oeste del estado de Michoacán.

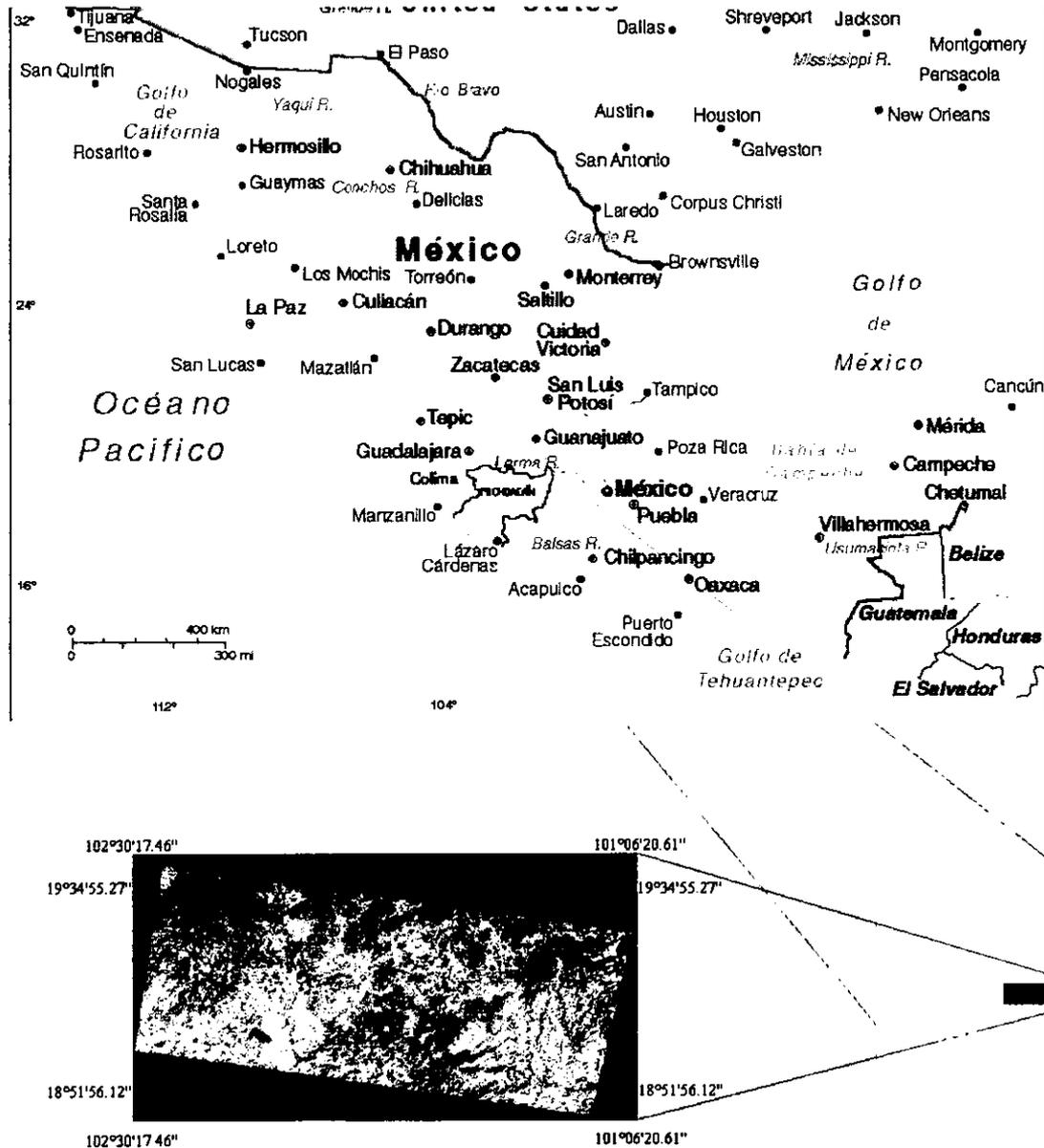


Figura 1.2.- Área de estudio comprendida dentro del estado de Michoacán.

1.3 Coordenadas.

Están dadas por el posicionamiento de un punto sobre la tierra, donde las intersecciones entre los meridianos y los paralelos representan o definen un espacio geográfico sobre la superficie terrestre.

La zona de estudio seleccionada abarca una extensión aproximada de 149.27km por 89.08km, comprendiendo el cuadrángulo 18° 51' 56.12'' a 19° 34' 55.27'' de latitud norte y 102° 30' 17.46'' a 101° 06' 20.61'' de longitud oeste correspondiente a las cartas topográficas editadas por el INEGI E13-3, E13-6-9, E14-1 y E14-4, a escala 1:250,000, que se encuentran entre las coordenadas extremas 18° 00' a 20° 00' de latitud norte y 100° 00' a 104° 00' de longitud oeste del estado de Michoacán.

Para la identificación de la zona de estudio se requirió de cuatro espacio-mapas de escala 1:250,000 elaborados por el INEGI, en los cuales se situaron y se identificaron los rasgos más representativos como son: las ciudades y poblados, las principales vías de comunicación, los ríos y los accidentes montañosos.

1.4 Escala de trabajo y características de las principales plataformas orbitales empleadas en Percepción Remota.

Las escalas que se pueden definir a partir de imágenes del sensor TM (Mapeador Temático) del satélite Landsat son: 1:250,000 y 1:100,000.

Landsat es el nombre de una serie de satélites lanzados por la agencia NASA de los EUA para la observación de la Tierra. Landsat es un acrónimo de "Land Satellite" (Satélite de la Tierra), (Lira, 1987).

Características:

a) Amplia cobertura: el Satélite Landsat (Tabla 1) orbita a una altura de 705 km, cubriendo una faja continua de superficie terrestre con un ancho de 185 km, lo que permite adquirir escenas de 185 x 185 km² (34,225 km²) y tener una cobertura sinóptica del terreno.

b) Resolución espectral: la resolución espectral determina la capacidad del sensor para captar la reflectancia⁺ de los elementos en las diferentes regiones y bandas del espectro electromagnético (figura 1.3). El TM cuenta con 7 bandas espectrales definidas por los intervalos del espectro electromagnético: mostrados en la tabla 1.

Las regiones más utilizadas en imágenes ópticas para fines de percepción remota utilizando el Mapeador Temático son las siguientes:

Rango de reflectancia	Espectro
(0.45 a 0.52) μm	Visible - azul
(0.52 a 0.60) μm	Visible - verde
(0.63 a 0.69) μm	Visible - rojo
(0.76 a 0.90) μm	Infrarrojo cercano
(1.55 a 1.75) μm	Infrarrojo medio
(2.08 a 2.35) μm	Infrarrojo medio
(10.4 a 12.5) μm	Infrarrojo térmico

⁺ La reflectancia de un objeto es una medida de la capacidad que tiene para reflejar la luz.

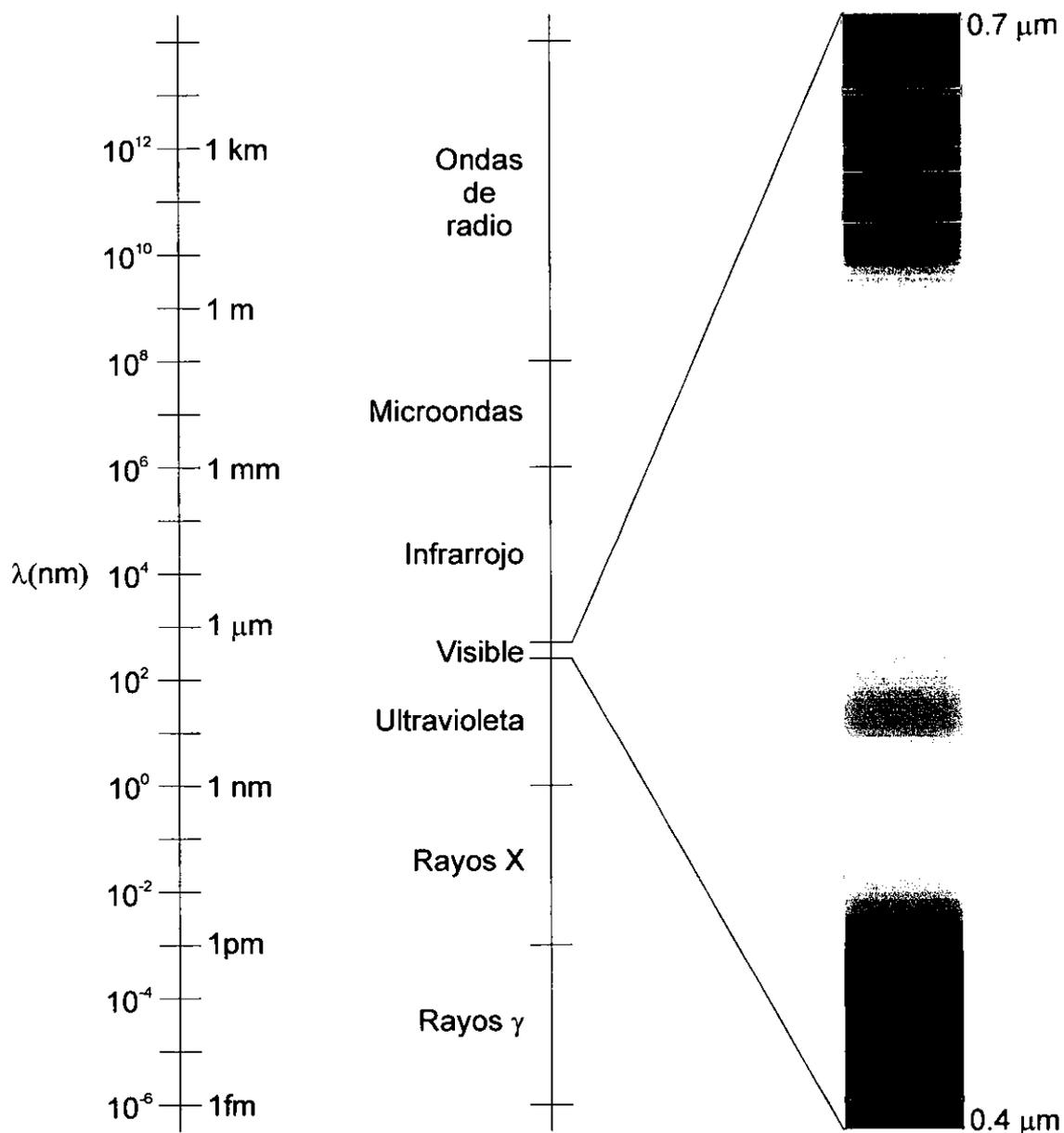


Figura 1.3.- Espectro electromagnético

En la siguiente tabla se muestran las principales plataformas orbitales empleadas en percepción remota.

Tabla 1.- Principales plataformas orbitales empleadas en Percepción Remota.

Plataforma Dato	IKONOS 2	Landsat 7	IRS 1C, 1D	SPOT 2	SPOT 4
Fecha de Lanzamiento	Septiembre, 1999	Abril, 1999	Diciembre, 1995 Septiembre, 1997	Enero, 1990	Marzo, 1998
Altura Promedio	681 km	705 km	700 km	822 km	822 km
Período de la Órbita	98 minutos	99 minutos	101 minutos	101 minutos	101 minutos
Período de Cobertura	16 días	16 días	24 días	26 días	26 días
Tamaño del CIV	bandas 1-4: 4 x 4 m ² banda 5 1 x 1 m ²	bandas 1-5 y 7: 30 x 30 m ² banda 6: 150 x 150 m ² banda 8: 15 x 15 m ²	banda 1: 5.8 x 5.8 m ² bandas 2, 3: 23.5 x 23.5 m ² banda 5: 70.5 x 70.5 m ²	bandas 1-3: 20 x 20 m ² banda 4: 10 x 10 m ²	banda 2: 10 x 10 m ² y 20 x 20 m ² bandas 1, 3, 4: 20 x 20 m ²
Tamaño de la Imagen	11 x 13 km ²	185 x 185 km ²	142 x 142 km ²	60 x 60 km ²	60 x 60 km ²
Bandas Espectrales	1) 0.45-0.52 μm 2) 0.52-0.60 3) 0.63-0.69 4) 0.76-0.90 5) 0.45-0.90	1) 0.45-0.52 μm 2) 0.53-0.61 3) 0.63-0.69 4) 0.78-0.90 5) 1.55-1.75 6) 10.4-12.5 7) 2.09-2.35 8) 0.52-0.90	1) 0.50-0.75 μm 2) 0.52-0.59 3) 0.62-0.68 4) 0.77-0.86 5) 1.55-1.70	1) 0.50-0.59 μm 2) 0.61-0.69 3) 0.79-0.90 4) 0.51-0.73	1) 0.50-0.59 μm 2) 0.61-0.68 3) 0.79-0.89 4) 1.53-1.75

c) Resolución espacial: el elemento de resolución espacial es definido por el tamaño asociado al pixel de la imagen. Por ejemplo, los datos captados por el sensor Landsat TM-7 (Tabla 1) tienen una resolución espacial de 30 x 30 m² por cada pixel, con excepción de la banda 6 cuya resolución es de 60 x 60 m² y de la banda 8 con resolución de 15 x 15 m².

d) Cobertura cíclica repetitiva: los satélites Landsat viajan en una órbita polar geocéntrica a una velocidad constante de manera que le permite pasar sobre el mismo lugar cada 16 días y adquirir imágenes de manera repetitiva, bajo las mismas condiciones de iluminación.

También cuenta con una órbita síncrona con el sol que permite que todas las áreas sean cubiertas por el satélite dentro de un mismo intervalo de tiempo (de 9:30 am a 10:00 am hora solar local); de tal manera de obtener información constante, actualizada y con poco porcentaje de nubes, ya que en las mañanas, generalmente en las mismas condiciones de iluminación, el cielo está más despejado que en cualquier otro momento del día (Anguizola et al., 1991).

Estas características de repetición regular de los satélites de Percepción Remota permiten la observación de la superficie terrestre bajo condiciones controladas. Este hecho conduce a que en un período de 16 días el satélite Landsat observa una porción determinada del terreno a la misma hora y en condiciones de iluminación parecidas.

1.5 Fecha de la imagen Landsat TM 28-47.

El período de adquisición de las imágenes es importante debido a que ahí podemos

ver como ha sufrido cambios la cobertura del terreno entre un lapso y otro, ya sea por acción antropogénica o por algún fenómeno natural. También permite a los usuarios seleccionar imágenes de la estación climática que necesiten para sus propósitos de estudio y del año en que fue tomada, esto es porque se aprecian las diferencias de las cubiertas vegetales entre las estaciones de secas y las de lluvias, entonces cambian y la interpretación es distinta.

La imagen Landsat TM 28-47 del estado de Michoacán empleada en el presente trabajo es de la fecha 1996/11/11, está orientada a la órbita (8.9°), con un tamaño nominal de pixel de $28.5 \times 28.5 \text{ m}^2$ y comprende 5965 líneas por 6967 columnas.

1.6 Georreferenciación

La georreferenciación es para integrar la información geográfica con la imagen multiespectral, esto es, para que ambos tengan el mismo sistema de coordenadas. Es por eso que se realiza una transformación geométrica punto a punto de los detalles de la imagen multiespectral con la información geográfica, quedando ambos en un mismo sistema de coordenadas eligiendo la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator).

Para esto tenemos que saber que el aspecto que presenta una imagen digital de satélite depende de varios factores, a saber: la curvatura de la superficie terrestre en la latitud de la escena, el movimiento de la Tierra, la velocidad relativa del satélite con respecto a la Tierra, las desviaciones de su posicionamiento con respecto al nadir y las variaciones en su altura, en consecuencia, el aspecto de la imagen no coincide geoméricamente ni con el que tiene un mapa, ni con el que se tendría si se observase a la Tierra desde una posición estática relativa a su superficie (Lira, 1992).

Ahora, para hacer una integración o comparación de la imagen multiespectral con la información cartográfica y temática es necesario realizar una transformación geométrica (figura 1.4) para tener una validez de los datos de la imagen con la información cartográfica y temática. Después de esto la imagen transformada puede ser combinada con otro tipo de información, llevando los resultados a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

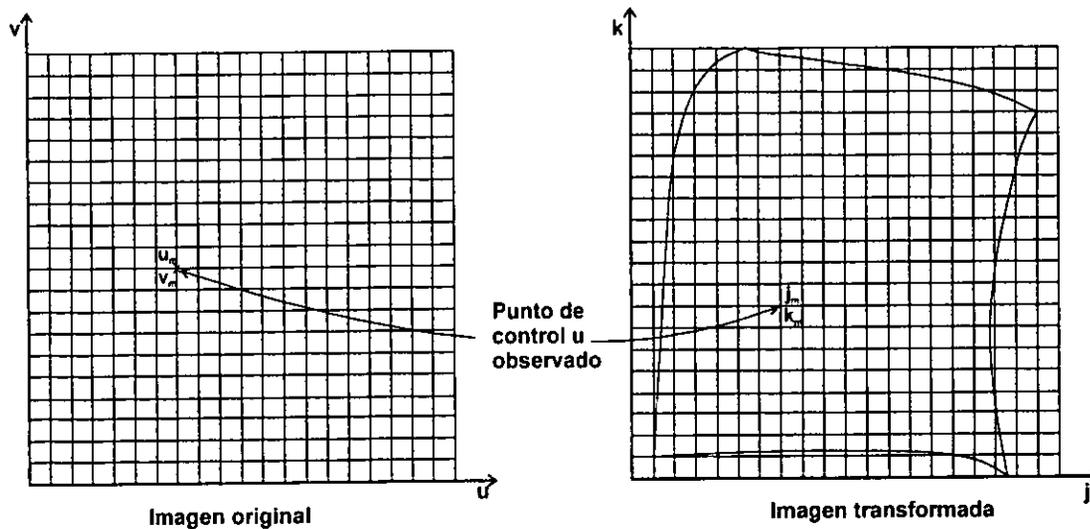


Figura 1.4.- Transformación geométrica de una imagen por medio de puntos de control.

La georreferenciación de la imagen se hizo utilizando como referencia las cuatro

cartas topográficas (figura 1.6) hechas por el INEGI E13-3, E13-6-9, E14-1 y E14-4, a escala 1:250,000 y el recorte de la imagen multiespectral (figura 1.5) del estado de Michoacán para este trabajo. Se identificaron puntos de control como se muestran en las figuras 1.5 y 1.6, tanto en las cartas topográficas y en la imagen multiespectral, esto es escoger rasgos que se vean tanto en la imagen a georreferenciar como en el mapa topográfico, los cuales fueron identificables en ambos; como cruces de ríos, carreteras, lagunas y poblados. Esto con la finalidad de crear un conjunto de puntos de control (rasgos) muy bien identificados tanto en la imagen como en las cartas topográficas.

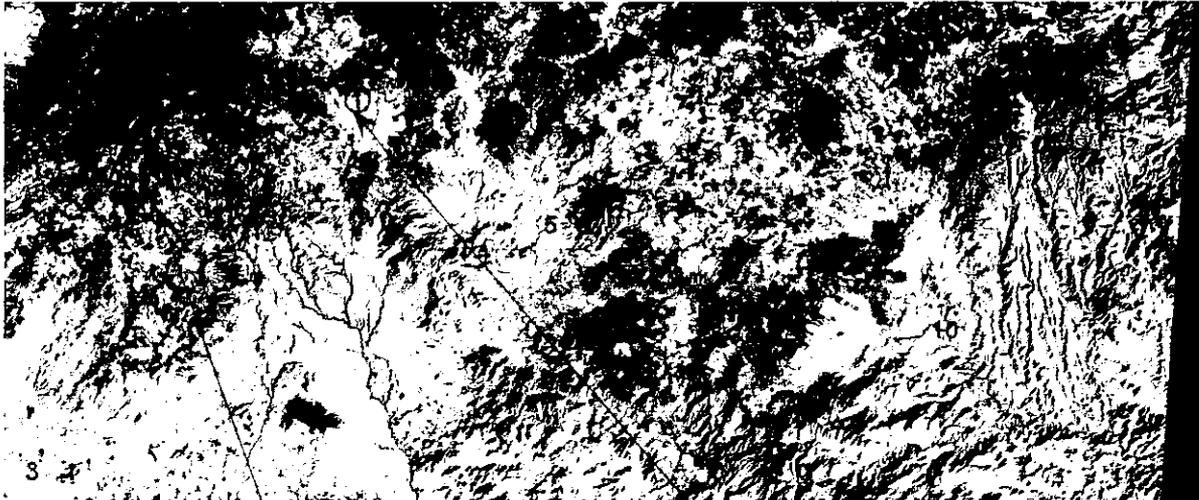


Figura 1.5.- Imagen original Micho con puntos de control

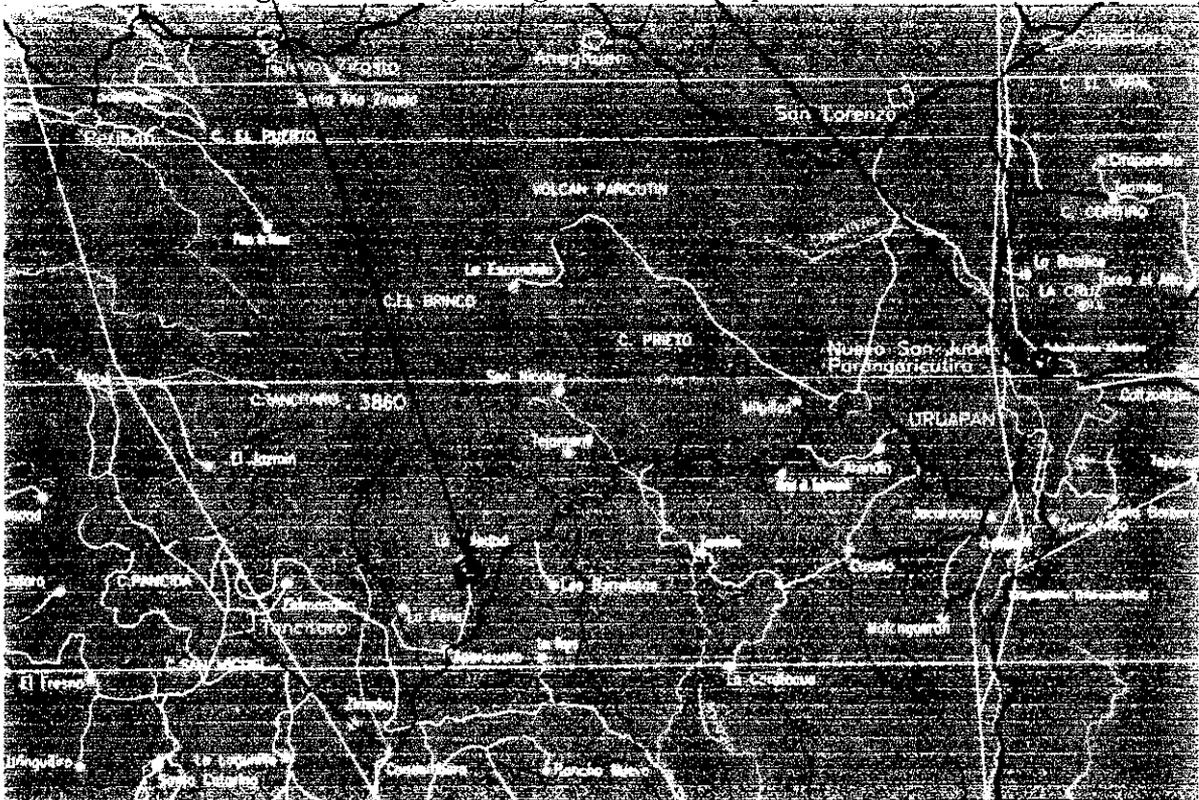


Figura 1.6.- Carta Topográfica 1:250,000

Primero se identifican los puntos en el mapa y en la imagen se localizan los píxeles que están definidos en un sistema de coordenadas diferente (Richards, 1999).

Al terminar el proceso de georreferenciación, comprobamos (figura 1.7) que cada una de las bandas se registró adecuadamente. Se georreferenció la primera banda y con el kernel de esta transformación se corrigió el resto de las bandas de la imagen multiespectral.

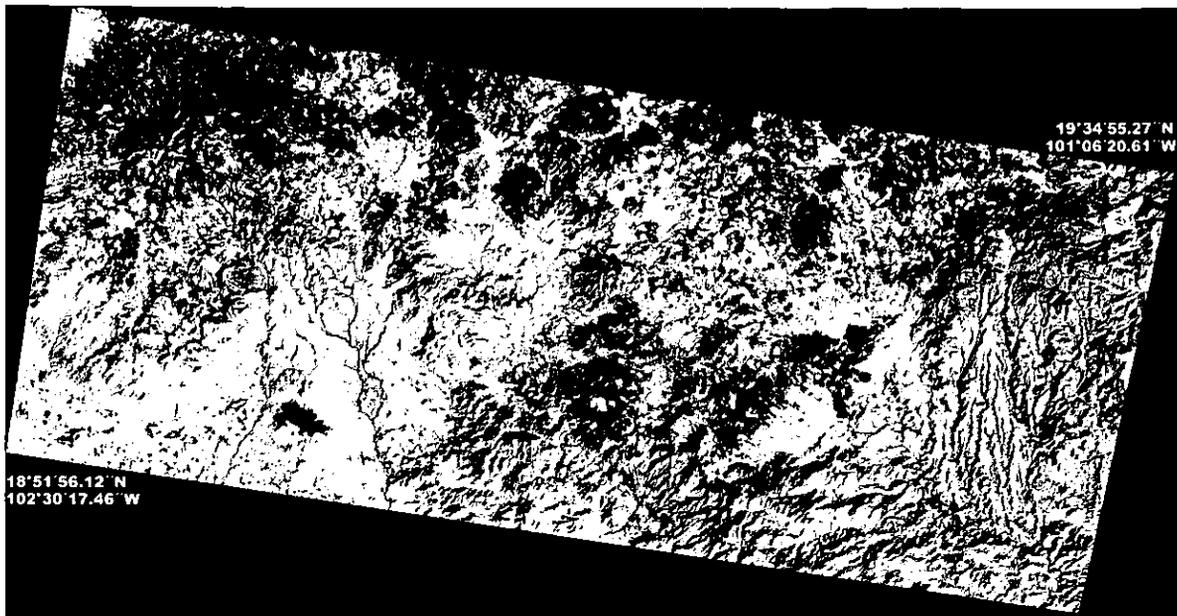


Figura 1.7.- Primera componente georreferenciada.

1.7 Geología.

Los principales factores geológicos que han dado lugar al paisaje característico en el Sistema Volcánico Transversal han sido el vulcanismo, son comunes los basaltos, andesitas, riolitas y sus respectivas tobas y brechas. Son abundantes las rocas volcánicas del Cenozoico y del Pleistoceno.

El Sistema Volcánico está constituido por rocas ígneas extrusivas, acumuladas a lo largo de sucesivos episodios volcánicos iniciados desde fines del Terciario. Se caracteriza por grandes sierras volcánicas y coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, calderas, amplios volcanes-escudo de basalto y depósitos de arena y cenizas, además de otras formaciones que se encuentran dispersas entre extensas planicies. Dentro de la provincia existen numerosos valles exorreicos y cuencas endorreicas, (Bocco, 1996).

Las características geológicas de esta zona son la actividad volcánica ocurrida en el período Cuaternario, son fácilmente identificados y visibles los abundantes conos volcánicos, la gran mayoría cineríticos de una sola fase eruptiva. La más reciente actividad volcánica ocurrió en el año de 1943, cuyo cono es llamado el Parícutín. El vulcanismo y derrames lávicos bloquearon los drenajes naturales dando lugar a cuencas endorreicas y la consecuente formación de lagos, entre ellos los de Pátzcuaro y Zirahuén, (Escobar et al., 1996). Los materiales geológicos, resultado de esta actividad volcánica son: basaltos, tobas, andesitas y dacitas.

Las estructuras rocosas presentes en la zona de estudio están compuesta por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, rocas sedimentarias y volcanosedimentarias.

Mediante la percepción remota y con las técnicas de detección es posible obtener información de rasgos de carácter estructural y litológico, ya que nos permiten realizar estudios de mapas geológicos teniendo la pendiente y la dirección de las formaciones.

Las imágenes Landsat son de gran utilidad para realizar levantamientos de planos geológicos, debido a su cobertura regional con imágenes que abarcan áreas de 185 km de lado, a su reducido ángulo de iluminación solar y a la información repetitiva que del mismo objeto puede obtenerse cada 16 días.

El reducido ángulo de iluminación del Sol se consigue haciendo que el satélite cruce el ecuador hacia las 9:30 a 10:00 horas de la mañana, hora local, en cada pasada. Con reducidos ángulos de iluminación se obtienen imágenes en las sombras proyectadas por las estructuras geológicas que hacen resaltar el relieve topográfico (Erickson, 1992).

1.8 Clima.

El clima es el estado de la atmósfera más frecuente en un lugar determinado; los distintos tipos de clima varían por tres factores importantes según Daubenmire (1990) y son: el relieve, la latitud y la distancia de la influencia de las grandes extensiones de agua. Las extensiones de agua son estabilizadoras de la temperatura con respecto a las masas contiguas de tierra (Daubenmire, 1990).

Los dos elementos para el clima son la temperatura y la precipitación, aunque hay otros componentes que también son importantes como la nubosidad, la insolación, la humedad atmosférica, la presión atmosférica y el viento entre otros; estos conllevan a que exista una relación entre factores y elementos del clima, dándose así las clasificaciones climáticas y permitiendo definir los patrones de vegetación dominantes. El calor y la humedad son medios para evaluar con las variables de temperatura y precipitación los patrones de vegetación dominantes, también la alineación y la ubicación de las serranías influye en la distribución de la humedad y la temperatura.

La altitud, es un factor que determina la temperatura, la humedad atmosférica, y la precipitación, ya que a mayor altura la temperatura disminuye y la precipitación aumenta. Los tipos de clima varían debido a la grandes diferencias altitudinales y al grado de humedad que se presenta tanto en la ladera de barlovento como en la de sotavento.

Es por eso que, las relaciones entre clima y vegetación son debido a la topografía del lugar, pero también se deben a la combinación del clima con el suelo; pero el indicador más relevante es la vegetación.

Köppen delimita los distintos tipos de clima en forma cuantitativa basado en temperaturas y precipitaciones, medias anuales y medias mensuales extremas. La cantidad de precipitación necesaria para soportar un tipo de vegetación depende de la temperatura de la región y su distribución anual.

Utilizando la clasificación climática de Köppen y modificado por García, en Correa, 1974 (Bocco, 1996), se determinaron los siguientes climas predominantes en la zona de estudio:

El tipo de clima que predomina es el C(w₂)(w), templado subhúmedo con lluvias en verano, el más húmedo en cuanto a humedad (Escobar et al., 1996).

Cwag. Templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media del mes más caliente mayor de 22°C. Se presenta en la Sierra Madre del Sur y zonas de transición entre el Sistema Volcánico Transversal y la Depresión del Balsas.

Cwbg. Templado subhúmedo, con lluvias en verano, la temperatura media del mes

más cálido es inferior a 22°C. Se extiende en la mayor parte del Sistema Volcánico Transversal y serranías aisladas de la porción norte.

Cwf. Templado con lluvias todo el año y una época más seca en el invierno. Propio de las Sierras de Tancítaro, Paracho y Patamban en el oeste; así como en las Sierras de Acuitzio, Nahuatzen y Pátzcuaro, en la porción central de Michoacán.

Los climas de tipo C predominan en el Sistema Volcánico Transversal y las porciones elevadas de la Sierra Madre del Sur.

1.9 Tipos de vegetación.

Las condiciones físico geográficas comprendidas en la zona de estudio influyen en la distribución de las masas forestales, teniendo como factores principales: la topografía, el clima y el suelo.

Los tipos de vegetación que se presentan son: bosque de pinos, bosque de encinos (*Quercus*), bosque de oyameles (*Abies*), bosque de pino-encino, pastizal y bosque o matorral de juniperus.

A continuación se describen las principales características de la vegetación presente en el área de estudio de acuerdo a Rzedowski (1981).

Bosque de Pino:

Los bosques de pino se extienden desde los 1,200 m hasta más de los 3,500 m de altitud principalmente sobre las sierras.

Su morfología es foliar (hojas delgadas y flexibles), sus comunidades son siempre verdes y con altura variable de 8 a 30 m o incluso mayor, es típico de lugares montañosos.

Las características del suelo o sustrato rocoso están en áreas cubiertas por rocas ígneas, en suelos de pH ácido (5 a 7). El color, textura y contenido de nutrientes presenta variaciones considerables de un lugar a otro; son frecuentes las tierras rojas, más o menos arcillosas derivadas de basaltos; los suelos negros o muy oscuros son también frecuentes.

El clima característico es Cw templado subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual comprendida entre 10 y 20°C, afectada por heladas.

Bosque de Encino (Quercus):

Son comunidades vegetales muy características de las zonas montañosas de México, junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo.

Los bosques de quercus tienen una relación con los bosques de pino, bosques de abies y con el mesófilo de montaña, así como con los pastizales.

Se hallan en altitudes entre 1,200 y 2,800 m; la mayoría son formaciones densas o al menos cerradas, aunque hay encinares con árboles separados con amplios espacios cubiertos por arbustos y herbáceas. Su altura varía entre 2 y 30 m, alcanzando en ocasiones hasta 50 m. La fisonomía de estos bosques está notablemente influida por el tamaño de las hojas de las especies que lo forman, que usualmente son de menor tamaño y textura coriácea en áreas secas y de hojas grandes.

Se han encontrado sobre diversas clases de roca madre, como ígneas, sedimentarias y metamórficas, así como en suelos profundos de terrenos aluviales planos, y en suelos rocosos e inclinados o pedregosos. El tipo de suelo varía su textura de arcilla a arena, y su coloración puede ser variada como rojiza, amarilla, negra, café o gris.

Bosque de Oyamel (Abies):

Forma asociaciones dentro de los bosques de coníferas, el oyamel se desarrolla por lo general en laderas llegando a crecer hasta una altura de 20 a 40 metros (Correa, 1974), aunque pueden alcanzar hasta 50 m.

Es una comunidad densa de árboles con hojas angostas y cortas, las copas de los árboles comunmente presentan una forma cónica y follaje verde oscuro. Comunmente se presenta en suelos profundos, bien drenados, pero húmedos todo el año, no se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados. Se encuentra en altitudes que van de los 2,000 a 3,000 msnm; pero generalmente arriba de los 2,500 m. Los bosques de oyamel están confinados a laderas de cerros, a menudo protegidos de la acción de vientos fuertes y de insolación intensa. Los sustratos geológicos en el cual se desarrollan son por lo regular en el Sistema Volcánico Transversal de origen volcánico, sobre todo andesitas y basaltos. El clima es Cw templado subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual entre 7 y 15°C con mínimas extremas de -12 °C.

Bosque de Pino – Encino:

Se sitúa en la zona de transición de los bosques de pino a los bosques de encino, se caracteriza una mezcla de ambos tipos que da la formación de un bosque mixto de pino-encino. Se encuentra comúnmente en faldas de los cerros en altitudes que varían de 1,000 a 2,600 msnm, en regiones de clima templado lluvioso en verano, así como en la zona de transición de los climas templados a los cálidos, (Bocco, 1996).

En estos bosques mixtos con frecuencia se encuentra mezclado con pastizales, y a su mayor altura el pino acaba por ser dominante sobre el encino. Los pinos llegan a alcanzar hasta 25 ó 30 m de altura y los encinos hasta 20 ó más metros, (García et al., 1969).

Pastizal:

Integra a toda aquella vegetación de carácter herbáceo no leñoso considerada dominante en términos de porcentaje de ocupación de la superficie de la tierra, con relación a otros estratos vegetales, (Bocco, 1996).

Comprende las comunidades denominadas pastizales o zacatonales, la altura media es de 20 a 70 cm, aunque se mantienen casi siempre mucho más bajos a causa del pastoreo. La cobertura frecuentemente es menor del 50% y rara vez supera el 80%.

Los zacatonales se desarrollan de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea, en altitudes de entre 1,100 y 2,500 m. Los suelos son de texturas que varían de migajón arcilloso a migajón arenoso; sobre suelos rocosos o someros, en terrenos poco inclinados, o bien en suelos profundos de lugares planos, de coloración rojiza a café o de color grisáceo, frecuentemente con un horizonte de concentración calichosa. Se erosionan con facilidad cuando se encuentran en declive y carecen de suficiente protección por parte de la vegetación.

Las temperaturas medias anuales varían en la mayor parte de su extensión de 12 a 20°C. El clima en el cual se desarrollan los pastizales es el BS y el BW.

También se encuentran los pastizales antropógenos a consecuencia del pastoreo intenso o de los fuegos periódicos, o bien ambos factores juntos, el zacatal permanece como tal mientras perdura la actividad humana que lo mantiene; pero también se establece y perdura por efecto de un constante y prolongado disturbio, ejercido a través de tala, incendios, pastoreo y muchas veces con la ayuda de algún factor del medio natural, como

por ejemplo, la tendencia a producirse cambios en el suelo que favorecen el mantenimiento del zacatal.

Los pastizales que prosperan una vez destruidos los bosques de Pinus y de Quercus, característicos de las zonas montañosas, en altitudes superiores a 2,800 m las comunidades secundarias frecuentemente son similares al zacatonal alpino.

Por debajo de 3,000 m de altitud los pastizales secundarios derivados de los bosques de Quercus y Pinus son mucho más variados en su fisonomía, muchas veces son análogos en su aspecto a los pastizales clímax de las regiones semiáridas, pudiendo variar de bajos a bastante altos, a menudo en función del clima.

Bosque o Matorral de Juniperus:

Este tipo de vegetación se le encuentra preferentemente en una estrecha franja transicional entre el bosque de Quercus (encinos) y de Pinus.

Prosperan sobre una gran variedad de rocas madres y suelos, incluyendo los alcanlinos, así como los de contenido moderadamente elevado en sales solubles y de yeso, con drenaje deficiente. Muchas veces se le observa en suelos poco profundos y más bien pedregosos de laderas de cerros. Los climas en que se desarrollan los bosques o matorrales de Juniperus varía desde el templado y semihúmedo Cw y Cs hasta el semiárido Bs.

Se ven muy perturbados por el pastoreo y por la tala. Fisonómicamente este tipo de vegetación es siempre verde y puede variar desde matorrales de 50 cm de alto hasta bosques de 15 m, aunque las alturas más frecuentes oscilan entre 2 y 6 m.

Se trata de comunidades bastante abiertas en que los árboles o arbustos dejan amplios espacios entre sí.

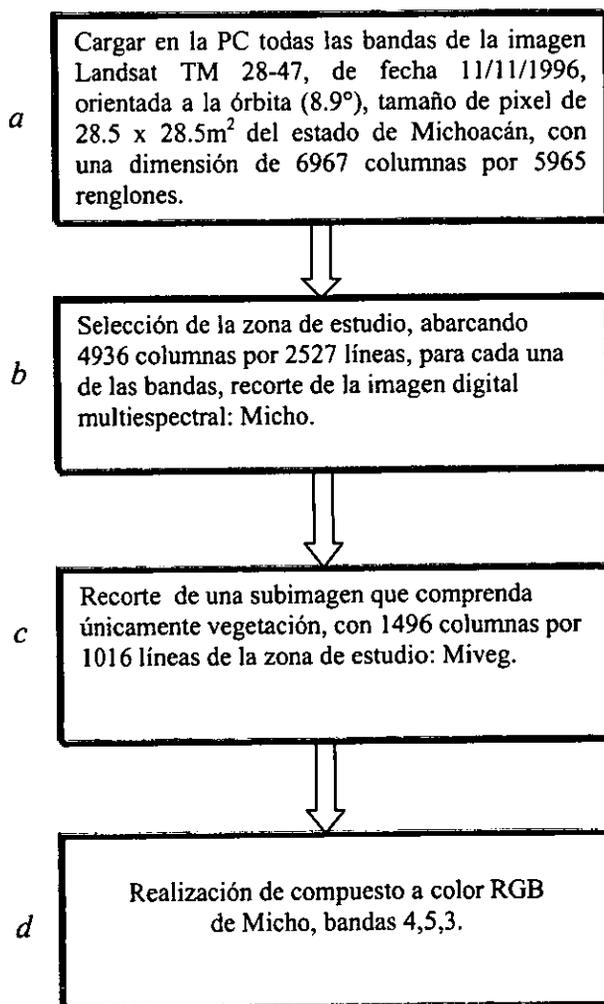
CAPÍTULO II

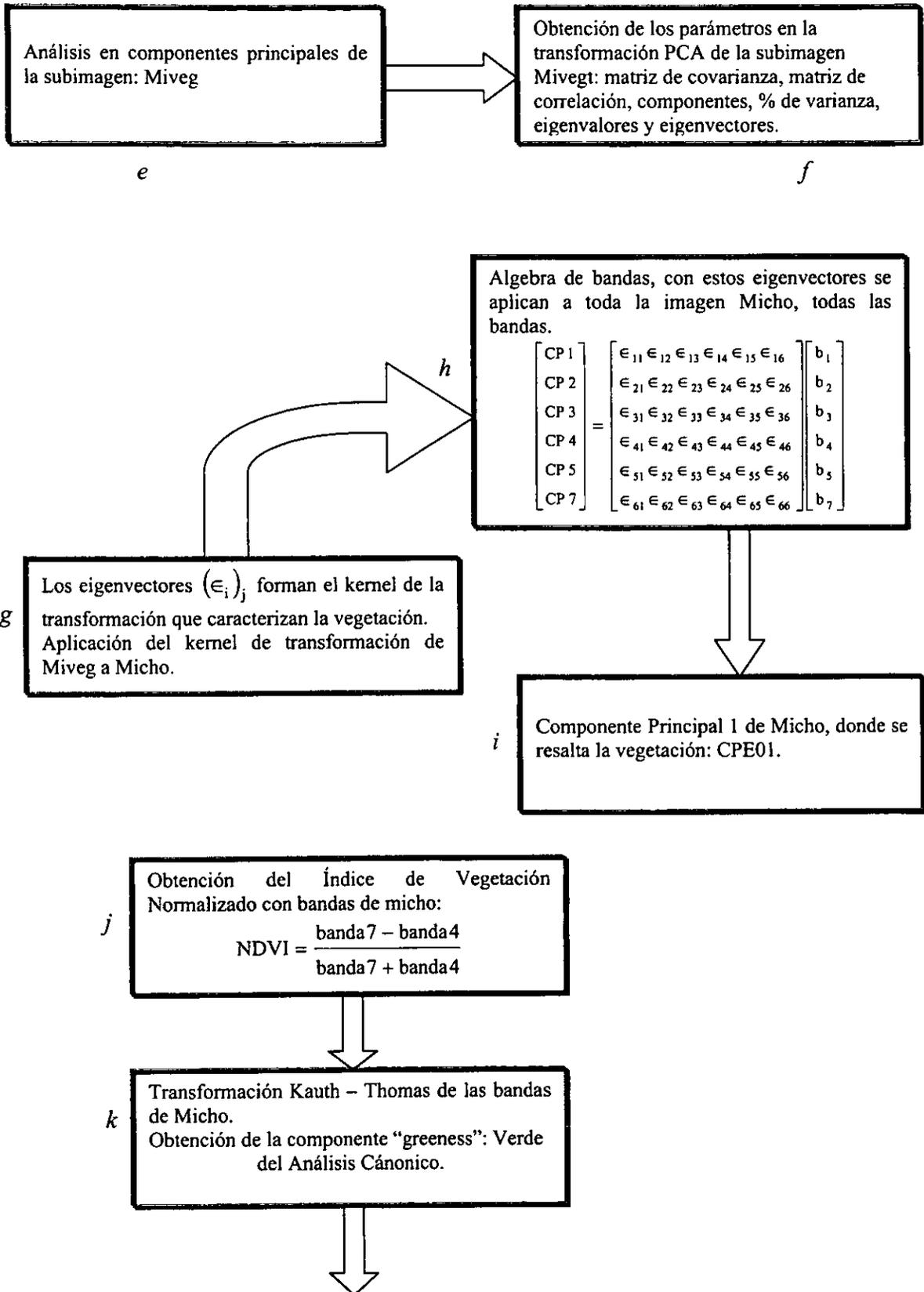
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

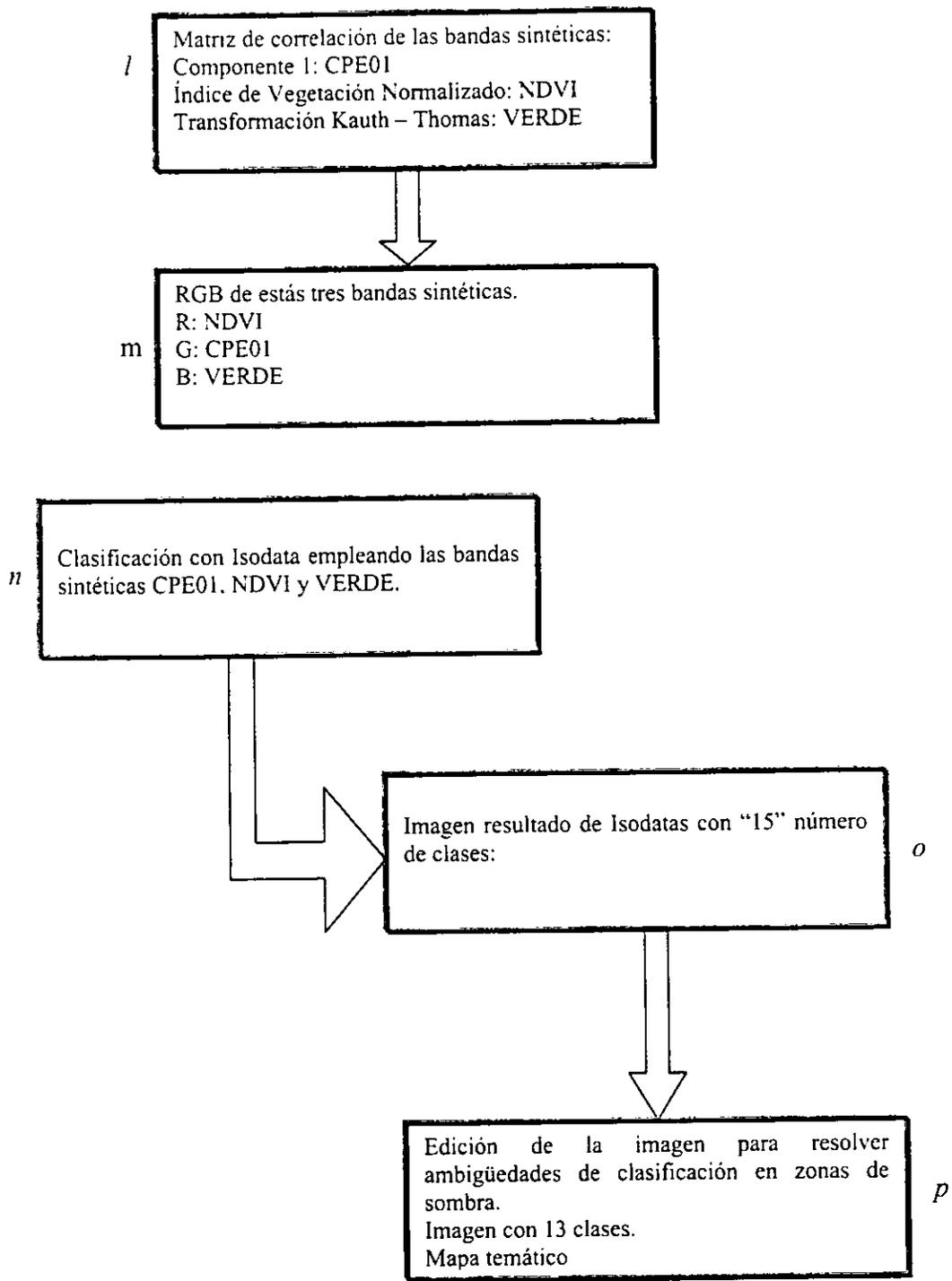
2.1 Diagrama de bloques para el análisis de la imagen multiespectral digital Landsat TM 28-47, del año 1996, del estado de Michoacán.

Las bases para el desarrollo de esta tesis son: el análisis de una imagen multiespectral digital e información temática de la zona centro del estado de Michoacán, analizando la correlación que existe con la caracterización de la vegetación para integrar toda esta información espacial.

Mediante el diagrama de bloques que se escribe abajo se enlistan cada una de las etapas y el proceso digital para generar un grupo de bandas sintéticas que caracterizan la vegetación en la zona de estudio.







A continuación se describen con detalle cada una de las etapas de los diagramas de bloque.

Etapas a

2.1.1 Cargar todas las bandas del estado de Michoacán contenidas en un CD-ROM a la PC.

Para hacer el recorte de la zona de estudio primero se cargaron todas las bandas de la imagen Landsat TM 28-47, de fecha 11/11/1996, orientada a la órbita (8.9°) y tamaño de pixel de 28.5 x 28.5 m², contenidas en un CD-ROM, cubriendo una porción del estado de Michoacán, teniendo una dimensión de 6967 columnas por 5965 renglones, para posteriormente ser bajada la información a la PC (figura 2.1).

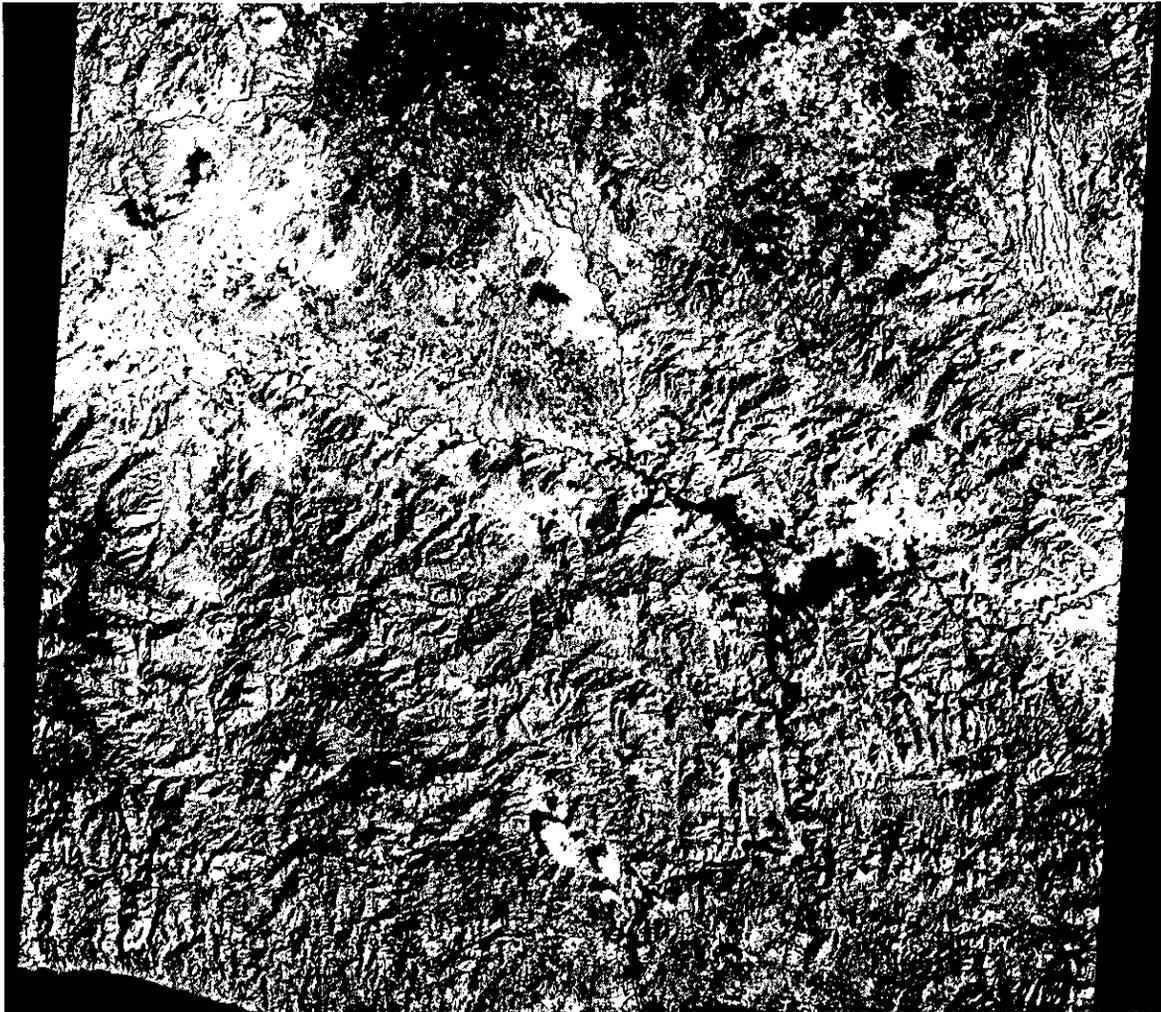


Figura 2.1.- Imagen Landsat 28-47 Michoacán, Banda 5.

Etapa b

2.1.2 Recorte de la zona de estudio, imagen multiespectral digital: Micho.

Se realizó el recorte de la zona centro del estado de Michoacán en la PC, la cual forma parte del sistema volcánico transversal y de la subprovincia neovolcánica tarasca, empleando el paquete denominado *Paint Shop Pro*, dicho recorte se hizo desde el pixel columna 2,000 con renglón 00 hasta el pixel columna 6,967 y renglón 2080, teniendo así un tamaño de la imagen con 4936 columnas por 2527 renglones para cada una de las bandas 1,2,3,4,5,7, llamándose entonces al recorte de la imagen digital multiespectral: Micho (figura 2.2). La banda 6 del infrarrojo térmico no se cargó por tener un tamaño de pixel diferente al resto de las bandas.

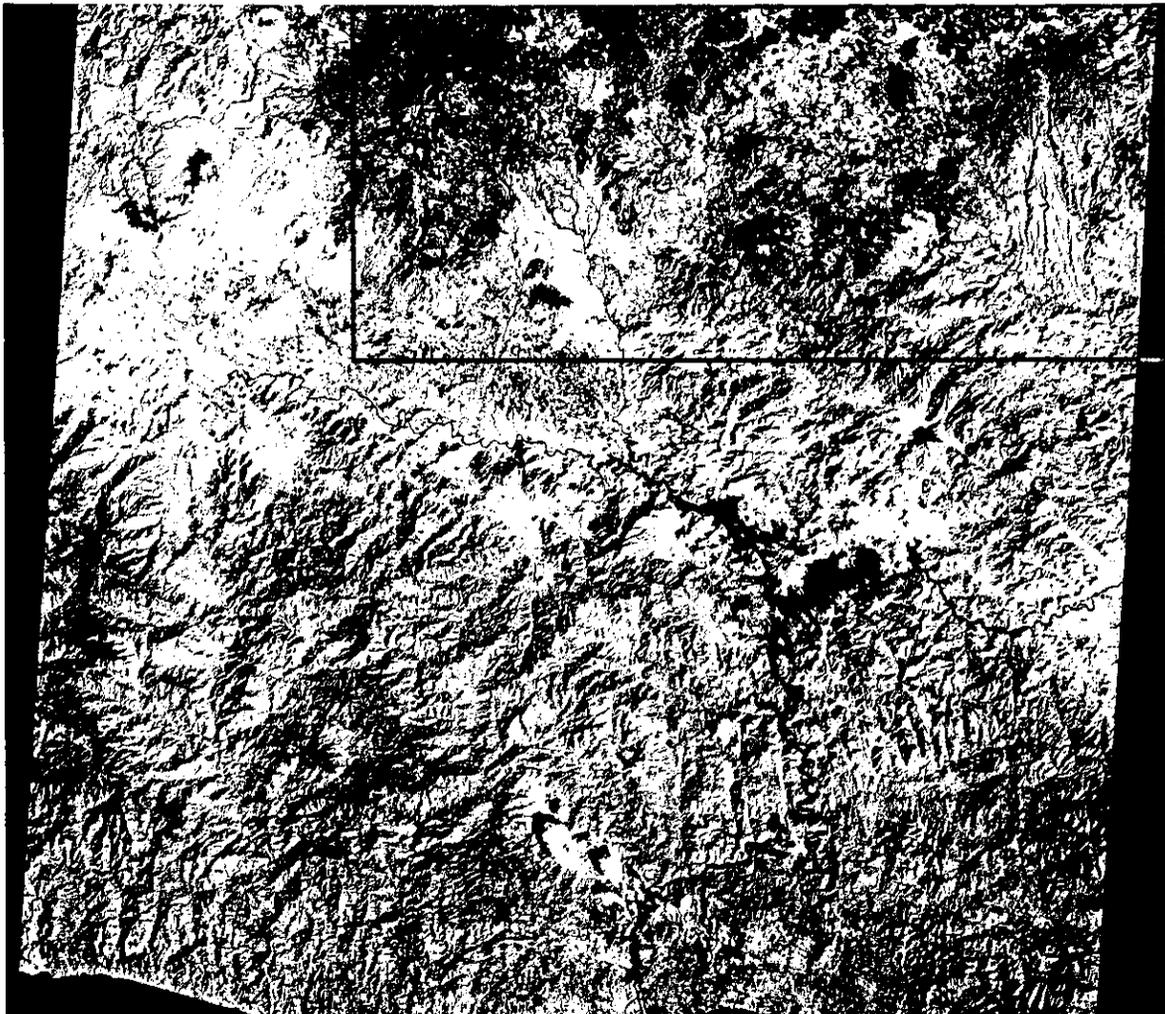


Figura 2.2.- Recorte de la imagen multiespectral Micho, para cada una de las bandas.

Se procedió a definir y delimitar el cuadrángulo de la zona de estudio cuyos vértices tienen las siguientes coordenadas (figura 2.3):

Longitud: 102° 30' 17.46'' y 101° 06' 20.61''

Latitud: 18° 51' 56.12'' y 19° 34' 55.27''

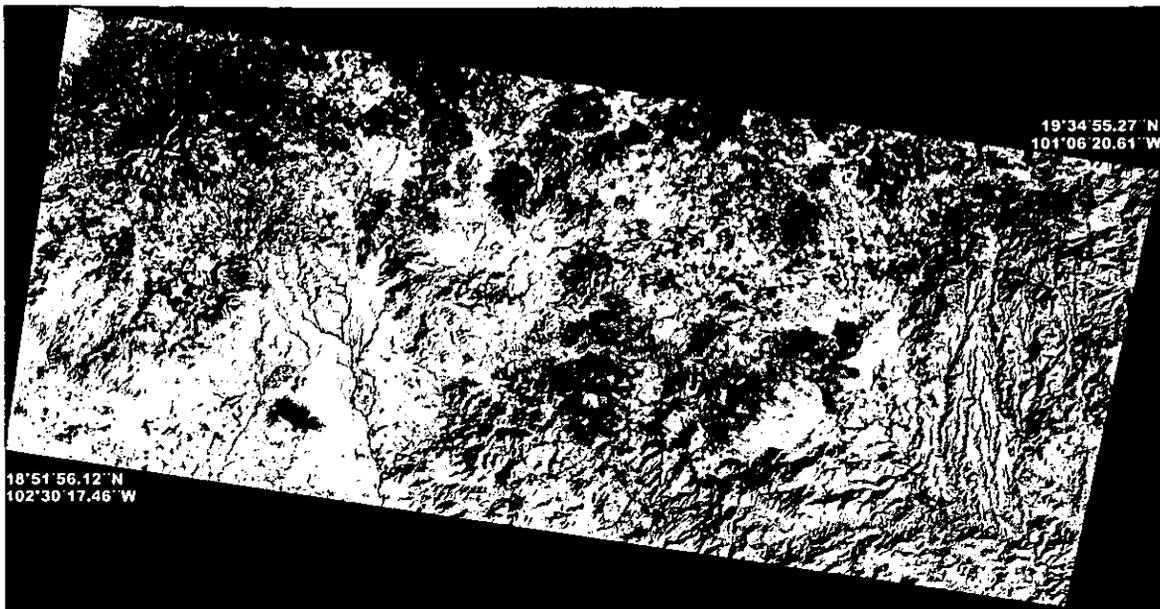


Figura 2.3.- Recorte de la zona de estudio con georreferencia, imagen multiespectral digital: Micho.

La imagen Micho, es por tanto multiespectral con 6 bandas: 1,2,3,4,5 y 7 (figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9). El tamaño de pixel de la banda 6 es de 120 x 120 m², es por eso que no se carga esta banda para el trabajo afin.

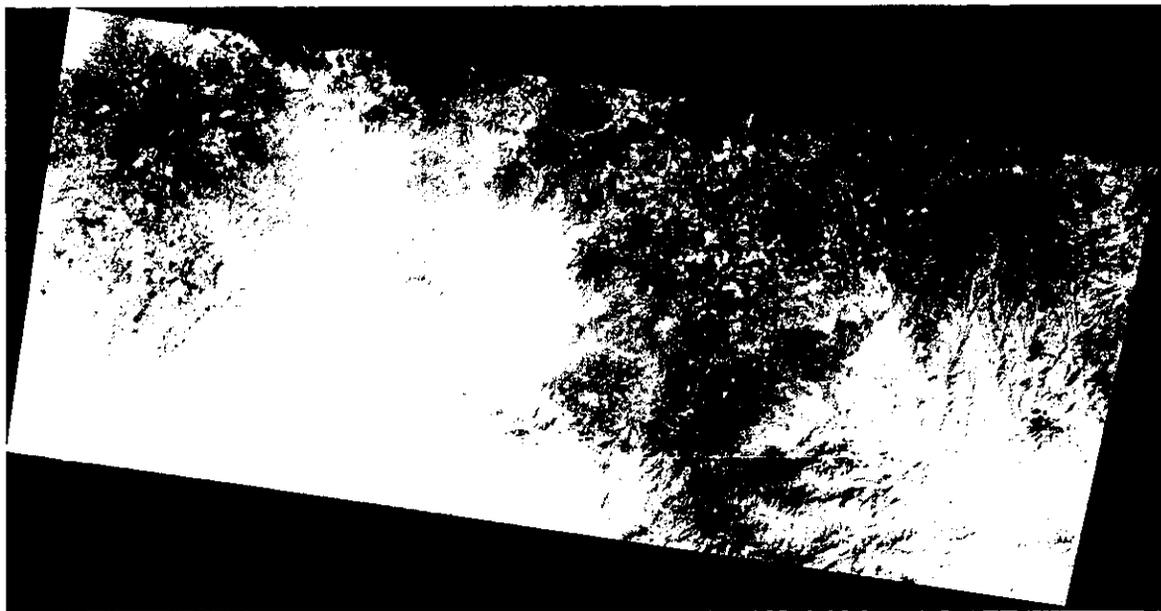


Figura 2.4.- Imagen Micho, Banda 1.

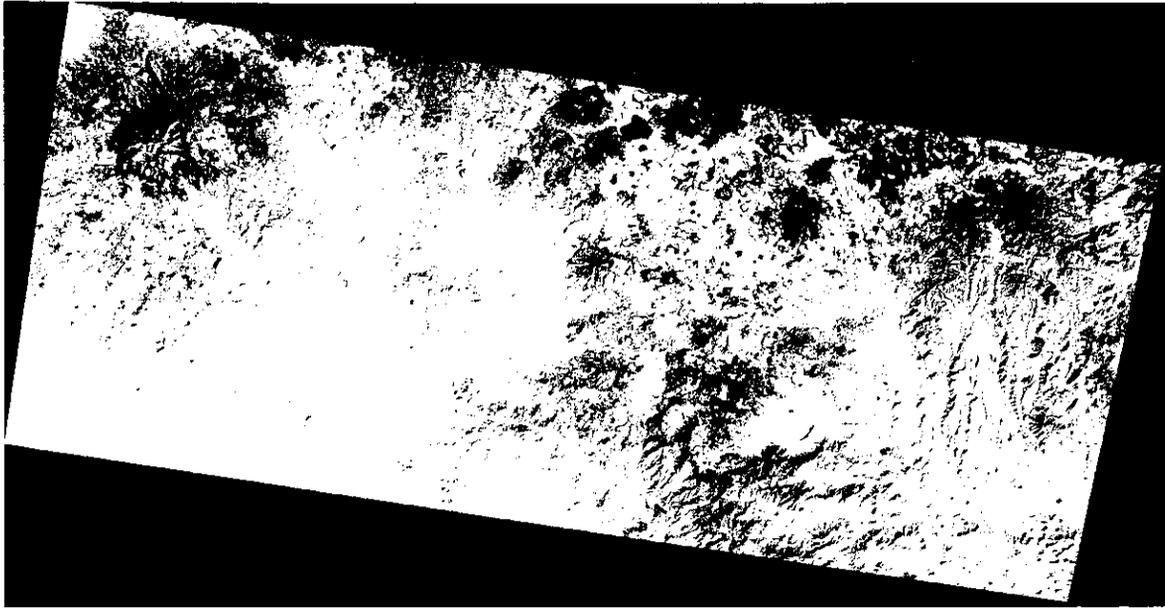


Figura 2.5.- Imagen Micho, Banda 2.

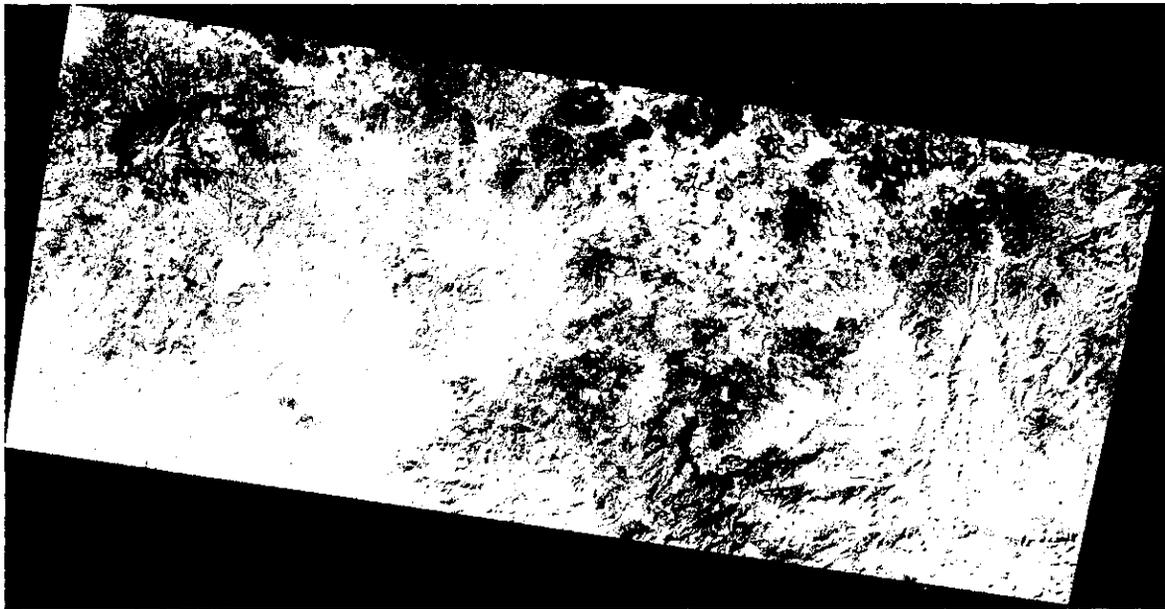


Figura 2.6.- Imagen Micho, Banda 3.

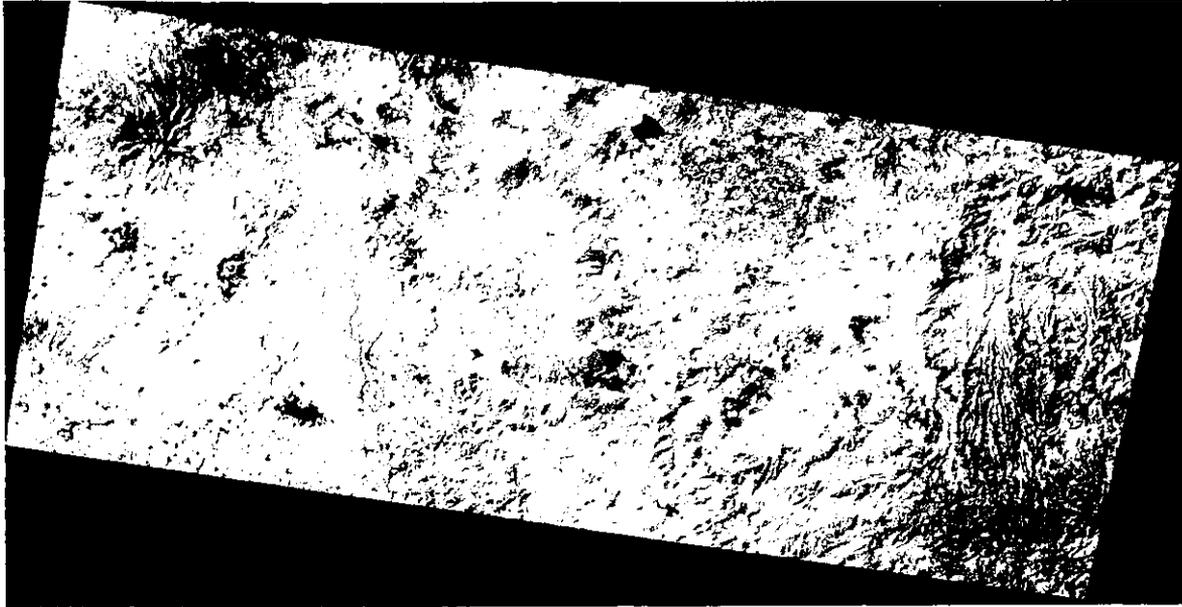


Figura 2.7.- Imagen Micho, Banda 4.

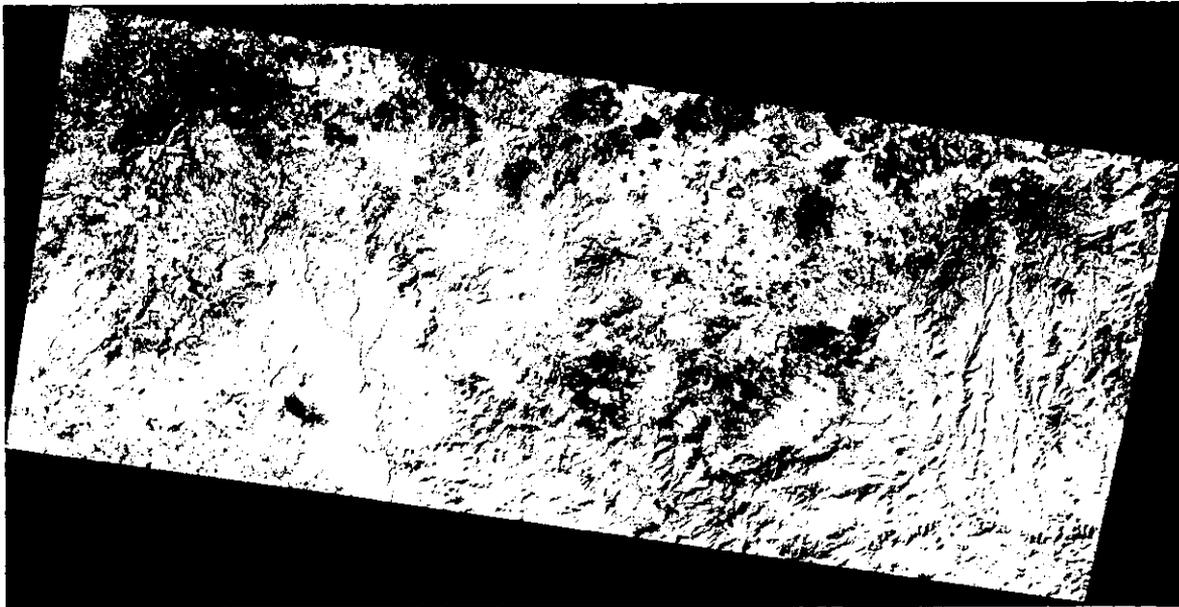


Figura 2.8.- Imagen Micho, Banda 5.

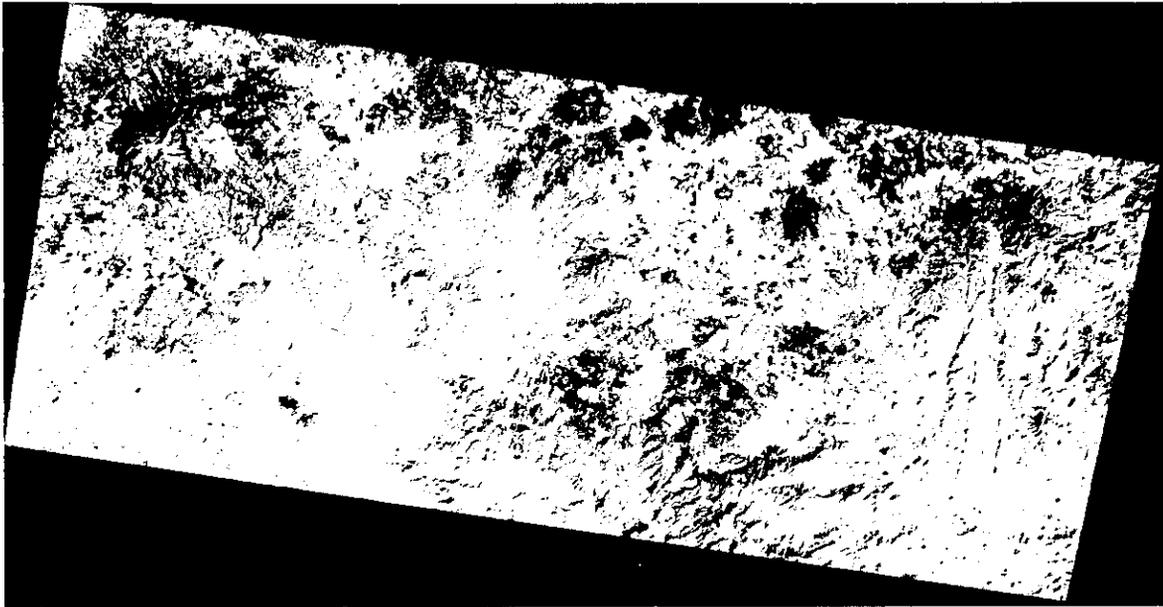


Figura 2.9.- Imagen Micho, Banda 7.

Etapa c

2.1.3 Recorte de una subimagen con vegetación únicamente de la zona de estudio para el análisis canónico: Miveg

Con el objeto de aplicar un análisis canónico a la vegetación de la zona de estudio se realizó un recorte a la imagen digital multispectral Micho: sacando una subimagen comprendiendo vegetación únicamente, el recorte se hizo desde el pixel columna 4712 y renglón 00 hasta el pixel columna 6208 con renglón 1016 teniendo una dimensión la subimagen de: 1496 columnas por 1016 renglones y ejecutado sobre las bandas arriba mencionadas, con nombre del recorte de la imagen digital multispectral: Miveg (figura 2.10).

La subimagen Miveg es por tanto multispectral con 6 bandas (figuras 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16).

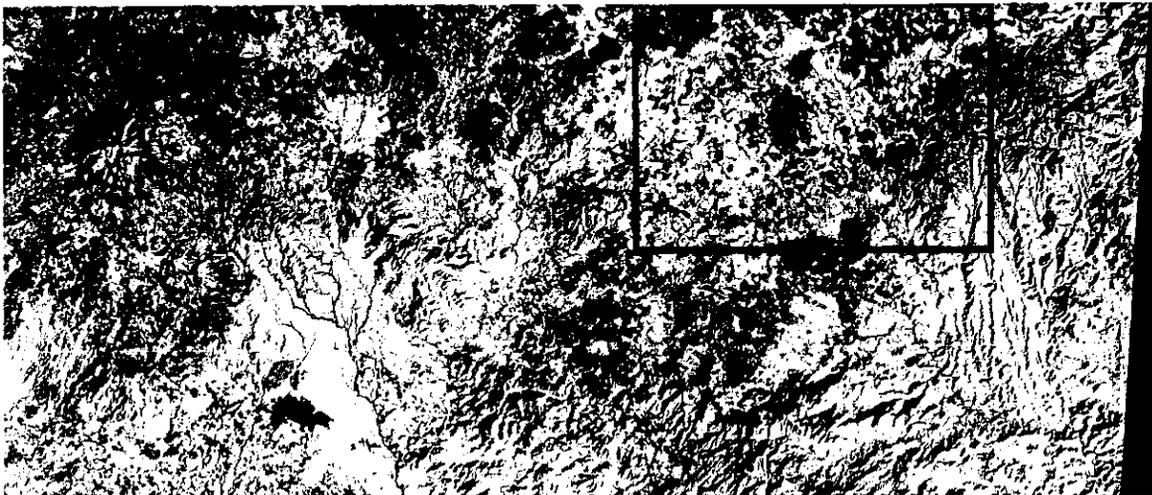


Figura 2.10.- Recorte de la subimagen, para el análisis canónico: Miveg

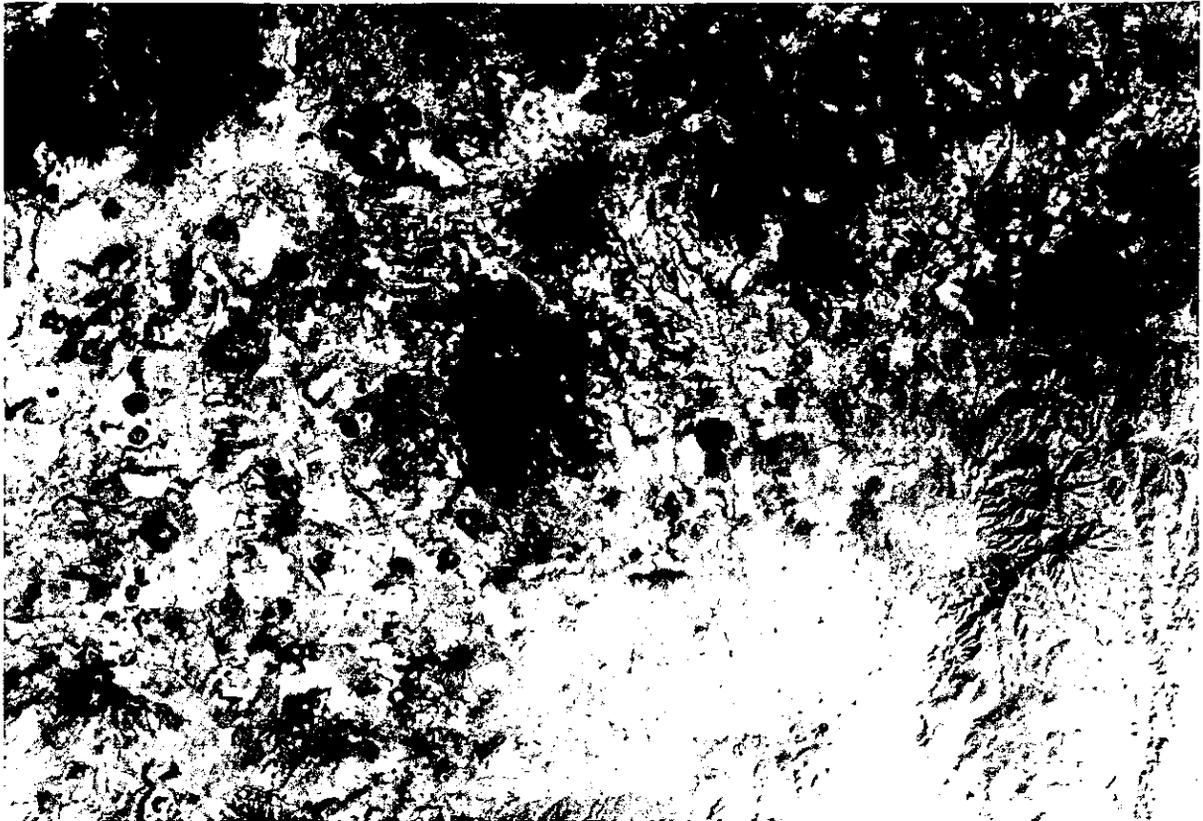


Figura 2.11.- Imagen Miveg, Banda 1.

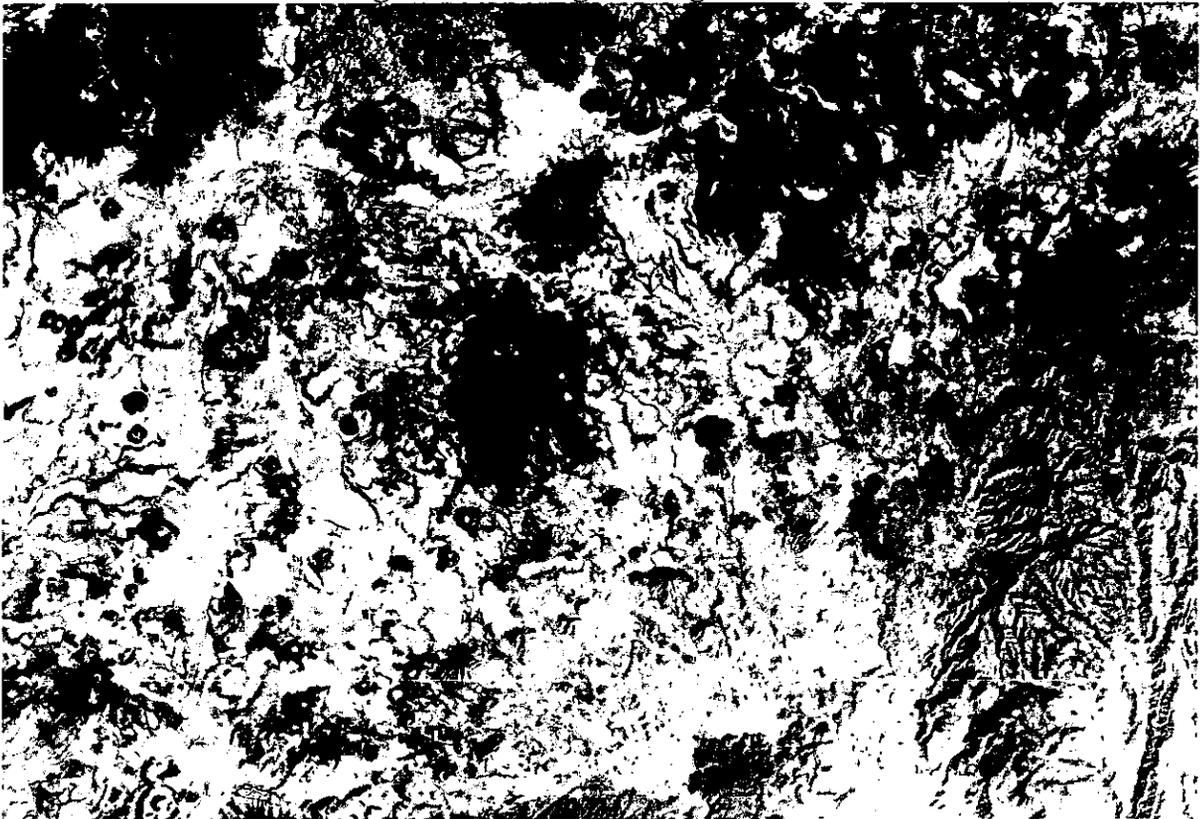


Figura 2.12.- Imagen Miveg, Banda 2.

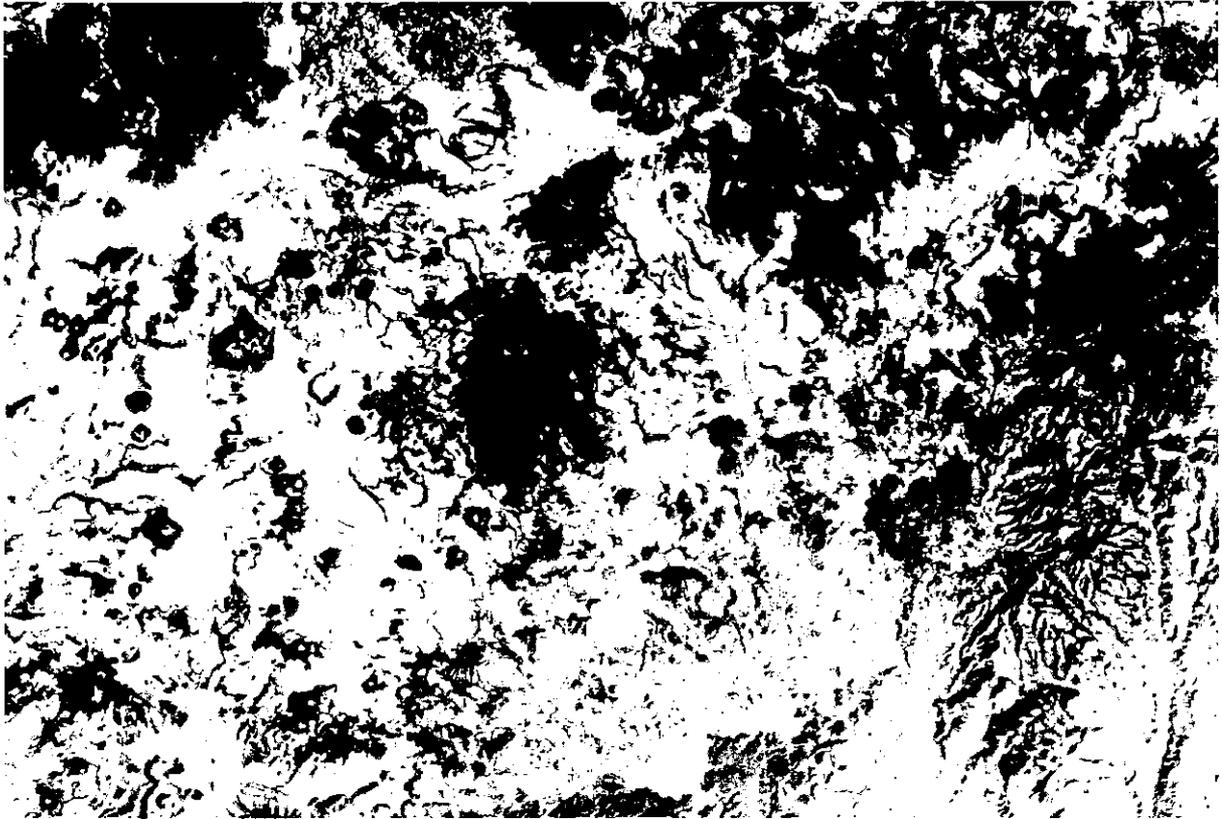


Figura 2.13.- Imagen Miveg, Banda 3.

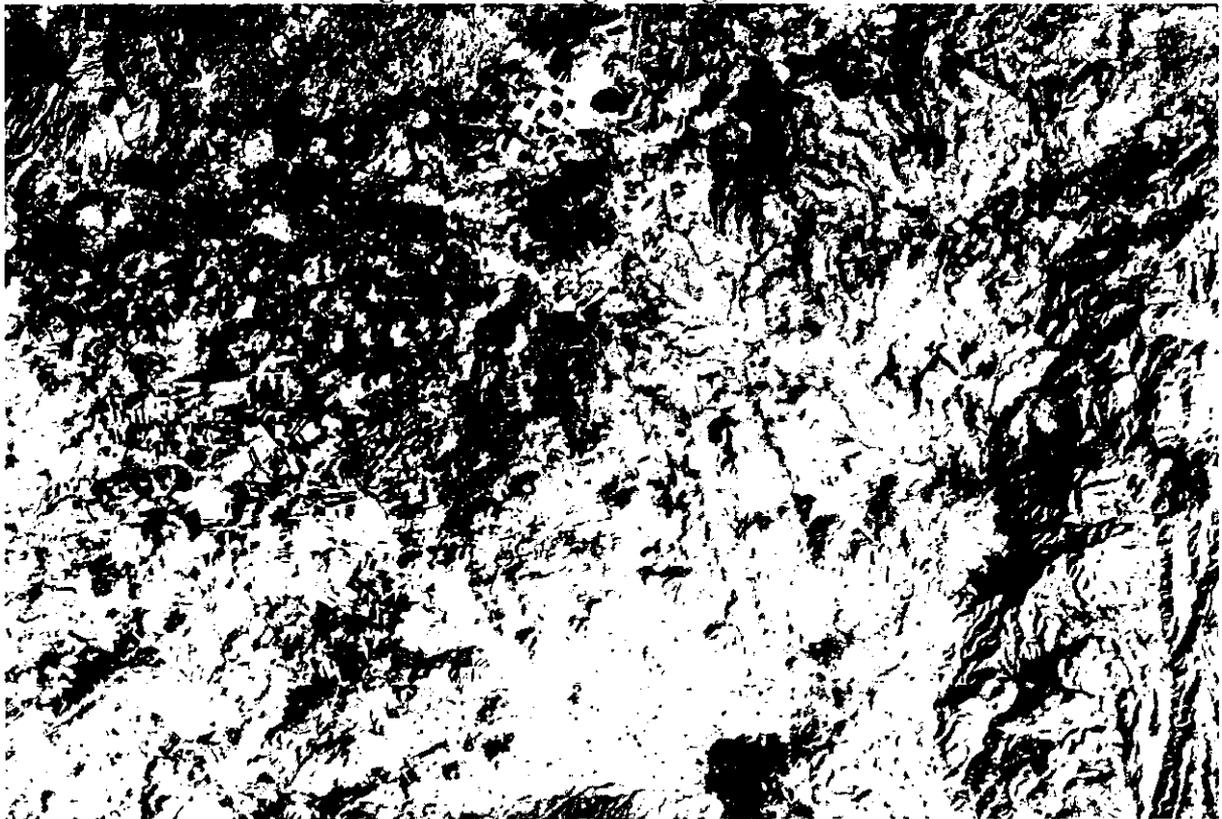


Figura 2.14.- Imagen Miveg, Banda 4.

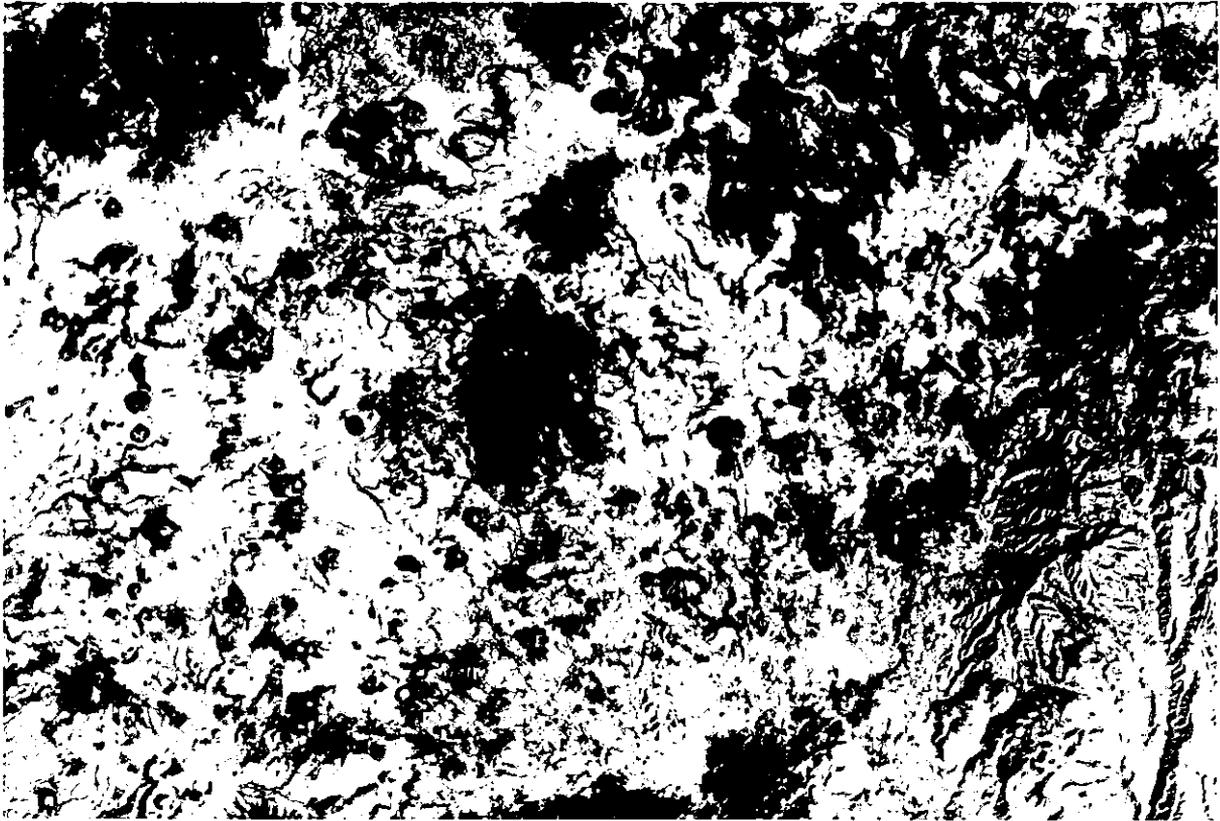


Figura 2.15.- Imagen Miveg, Banda 5.

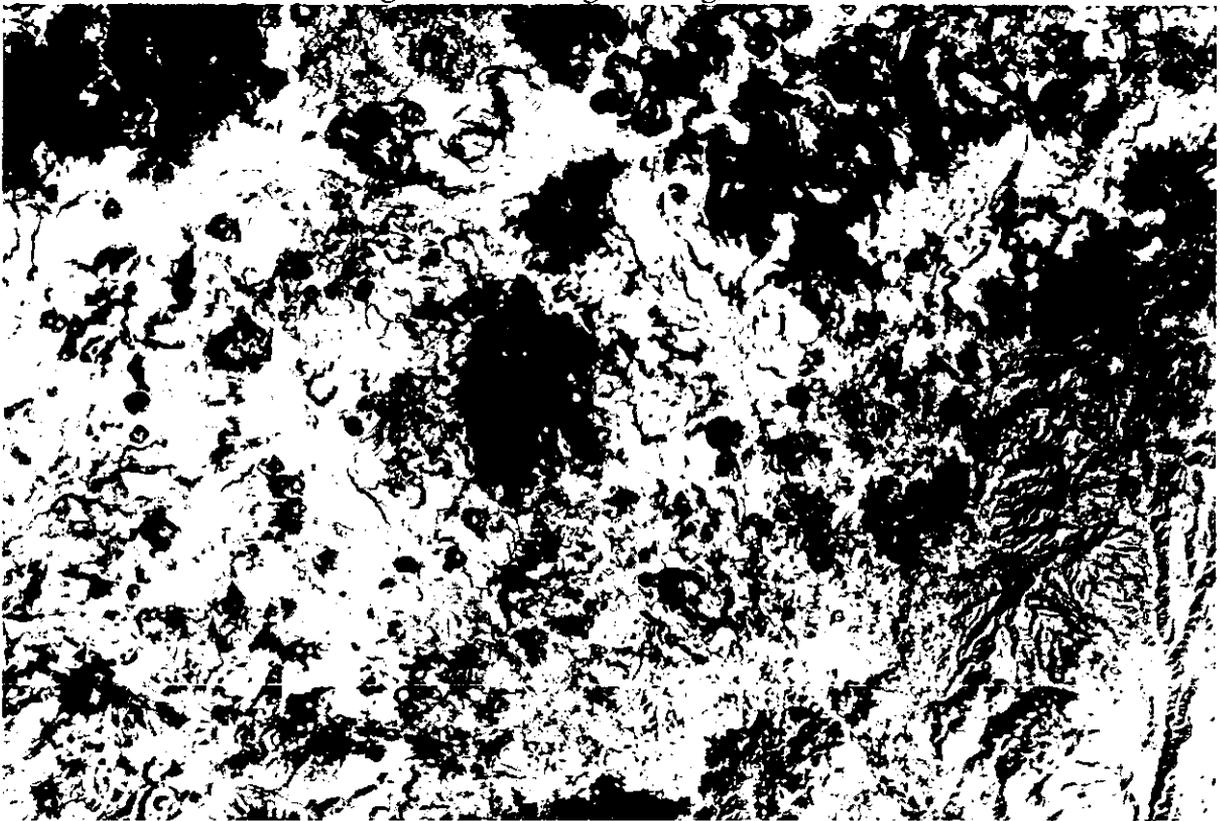


Figura 2.16.- Imagen Miveg, Banda 7.

Etapa d

2.1.4 Compuesto a color, histogramas y contraste.

Un compuesto a color es la superposición de 3 bandas empleando funciones de color para resaltar y analizar los elementos que están presentes en una imagen digital multiespectral.

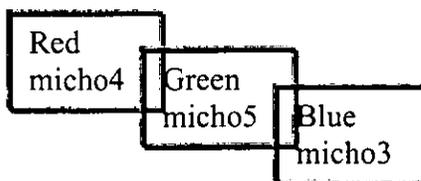
Entonces en una representación visual donde se despliegan tres bandas asignando a cada una de ellas los tonos de los colores rojo, verde y azul, generan una composición falso color de tres bandas de la imagen multiespectral.

El proceso permite visualizar distintas regiones del espectro en la imagen digital multiespectral, lo que facilita la delimitación visual de algunas coberturas del terreno.

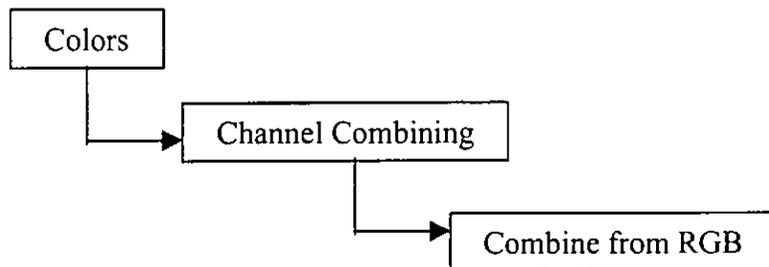
En las composiciones a color que se hicieron con la imagen digital multiespectral llamada Micho se identificaron visualmente los elementos de: cultivos, bosques, zonas urbanas, cuerpos de agua y las diferentes morfologías del relieve.

Utilizando la composición RGB a color con la terna de archivos siguiente:

Red	micho4
Green	micho5
Blue	micho3



La combinación de colores se hizo en Paint Shop Pro, siguiendo el siguiente árbol:



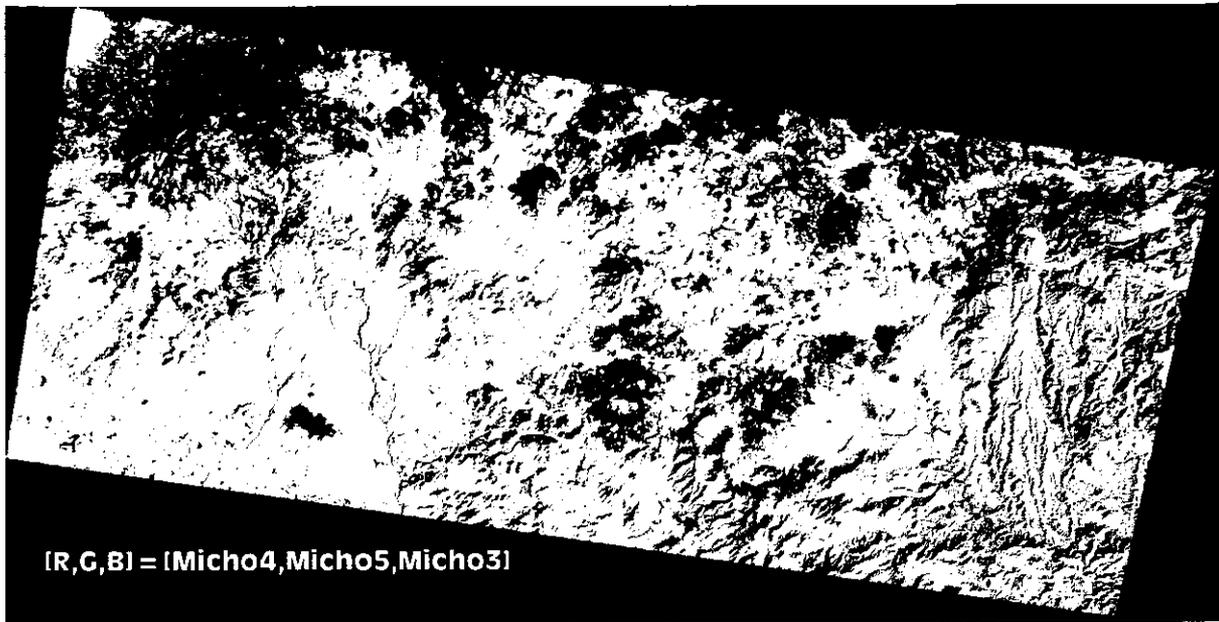


Figura 2.17.- Composición a color RGB de las bandas Micho4, 5 y 3.

Como se muestra en la figura 2.17 se ha seleccionado la banda 4 que se encuentra en el infrarrojo cercano (IRC), la banda 5 que está en el infrarrojo medio (IRM) y la 3 en el visible-rojo (R). Se produjo la imagen llamada: 453 mich (figura 2.17).

Para efectos de despliegue y para un mejoramiento en el contraste de las imágenes de salida es conveniente hacer un reescalamiento al histograma, para ello en seguida se escribe acerca de los histogramas.

Histogramas

Un histograma es una distribución gráfica de los valores de brillantez que se encuentran en la imagen, entonces sirve como una herramienta objetiva que nos permite evaluar la calidad tonal o radiométrica de una imagen (Pastrana, 1996).

Para un mejoramiento en la apreciación visual de despliegue en cada una de las imágenes digitales que se procesaron para la presente tesis; se recurrió a hacer una ecualización al histograma, para esto, ahora pasaremos a definir uno de los factores importantes de la calidad de la imagen que se llama contraste.

Contraste: el contraste es una propiedad local de la imagen por lo que se define aquí como la relación de valor que tiene uno o varios pixels con los vecinos próximos, (Lira, 1995).

Esto es que, el contraste se refiere siempre a la relación de brillantez de un objeto con su entorno (Lira, 1998), que se relaciona el valor de un pixel o una clase de pixels con los próximos vecinos.

Entonces el realce del contraste tiene por objetivo mejorar las cualidades de las imágenes para ser visualizadas por el ojo humano.

A continuación se muestra un ejemplo de la banda 7 de Micho (figura 2.18) con su respectivo histograma (figura 2.19), sin haber sido ecualizada la imagen y después esta misma con ecualización. Aquí podremos apreciar como el contraste entre una y otra imagen se ve un mejoramiento de la calidad de la imagen.

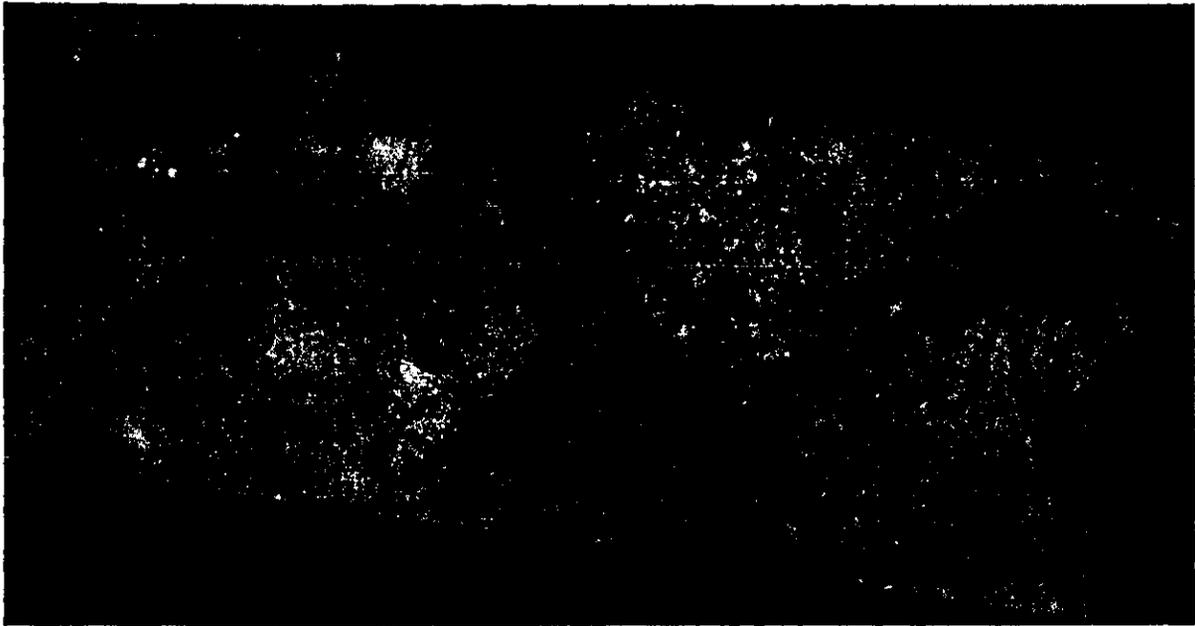


Figura 2.18.- Banda 7 Micho sin ecualización.

En el histograma (figura 2.19) de la imagen Micho 7 (figura 2.18) sin ecualización, podemos apreciar en el eje de las abscisas se encuentran los tonos de grises, y en el eje de las ordenadas es la frecuencia de los pixels.

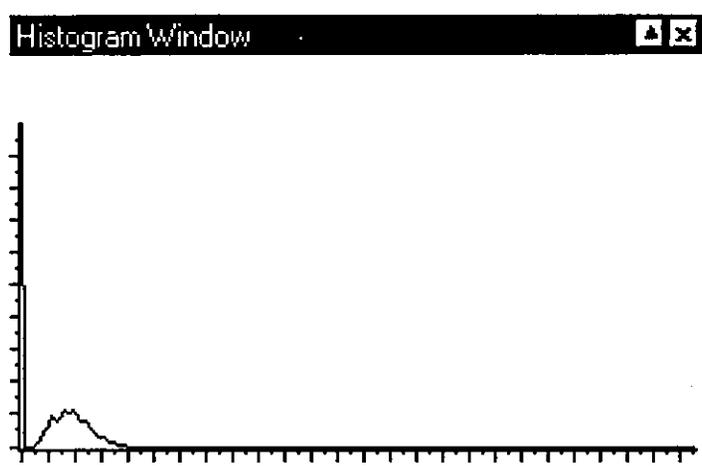


Figura 2.19.- Histograma de la Banda 7 Micho sin ecualización.

Se muestra a continuación la banda 7 Micho (figura 2.20), con ecualización a su histograma (figura 2.21) para un mejoramiento de la imagen.

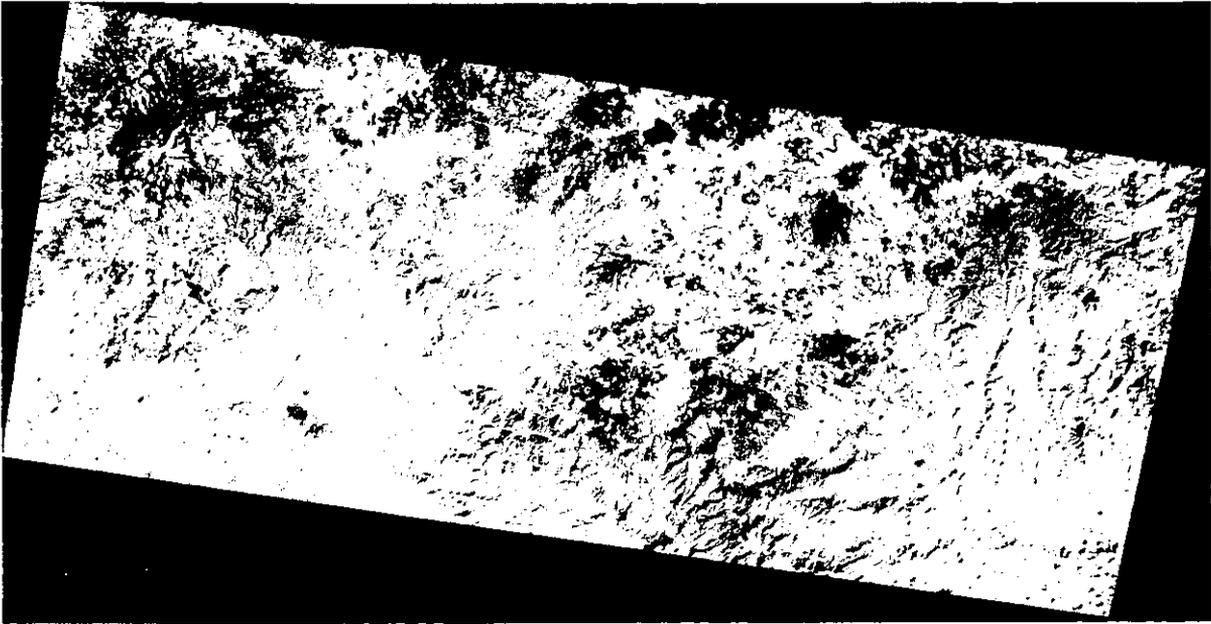


Figura 2.20.- Banda 7 Micho con ecualización.

En este histograma (figura 2.21) de la imagen Micho 7 (figura 2.20) con ecualización, apreciamos los tonos de grises en el eje de las abscisas, y su frecuencia de pixels en el eje de las ordenadas.

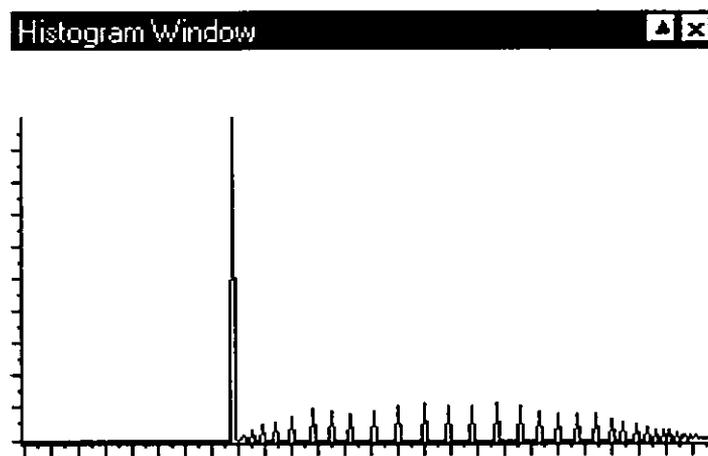
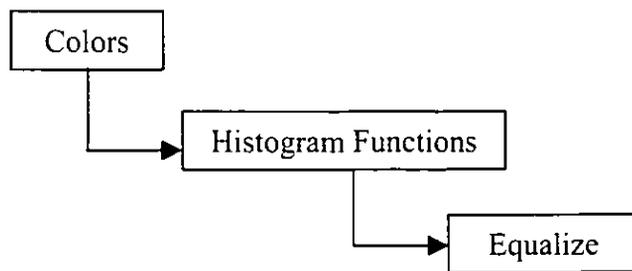


Figura 2.21.- Histograma de la Banda 7 Micho con ecualización.

Para dar el mejor contraste a las imágenes que se produjeron en cada una de las etapas del proceso digital y generar un grupo de bandas sintéticas en la realización del presente trabajo y tener un mejor despliegue, se hizo una normalización al histograma de cada imagen de salida.

Los histogramas que se aprecian a continuación se ecualizaron en *Paint Shop Pro*, mediante la siguiente estructura, para después importar las imágenes a *Idrisi*.



Los histogramas que pueden apreciarse en las figuras: 2.22, 2.23, 2.24, 2.25 y 2.26 corresponden a las imágenes:

RGB de las bandas: [453mich] (figura 2.22).

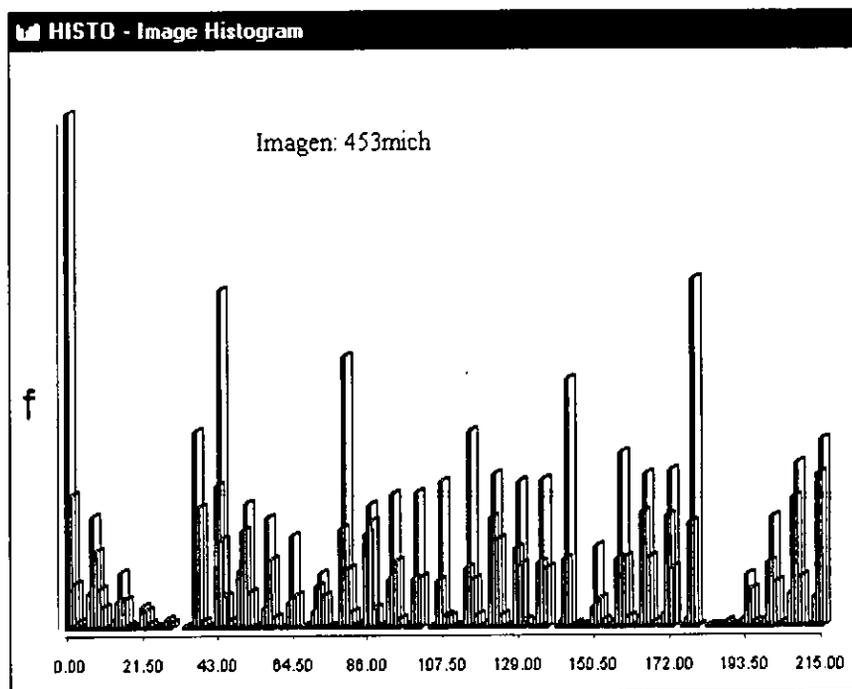
Componente Principal 1: [cpe01] (figura 2.23).

Componente *Greeness* del análisis canónico: [verde] (figura 2.24).

Índice de Vegetación Normalizado: [ndvi] (figura 2.25).

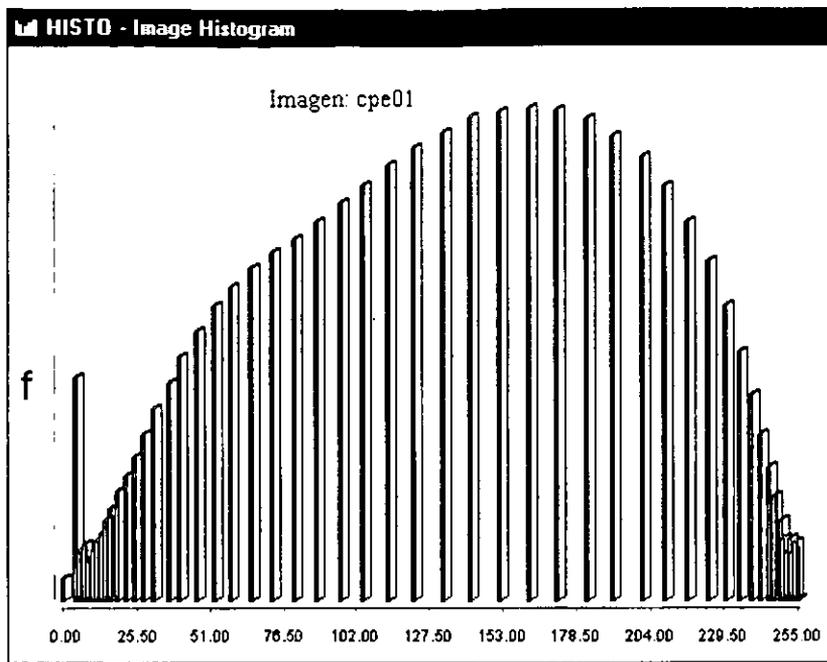
RGB de las tres bandas sintéticas [ndvi], [cpe01] y [verde]: rgbveg (figura 2.26).

Se muestra a continuación los histogramas de las imágenes (a) compuesto a color RGB (figura 2.22) de las bandas [453 mich] y (b) componente principal 1 [cpe01] (figura 2.23).



(a)

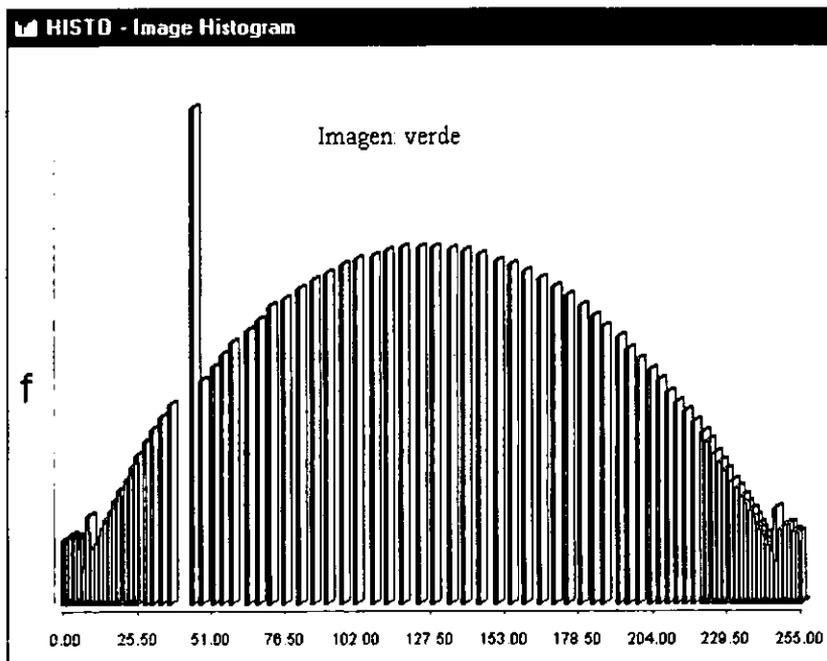
Figura 2.22 Histograma normalizado del compuesto a color RGB de las bandas 4, 5 y 3 [453mich].



(b)

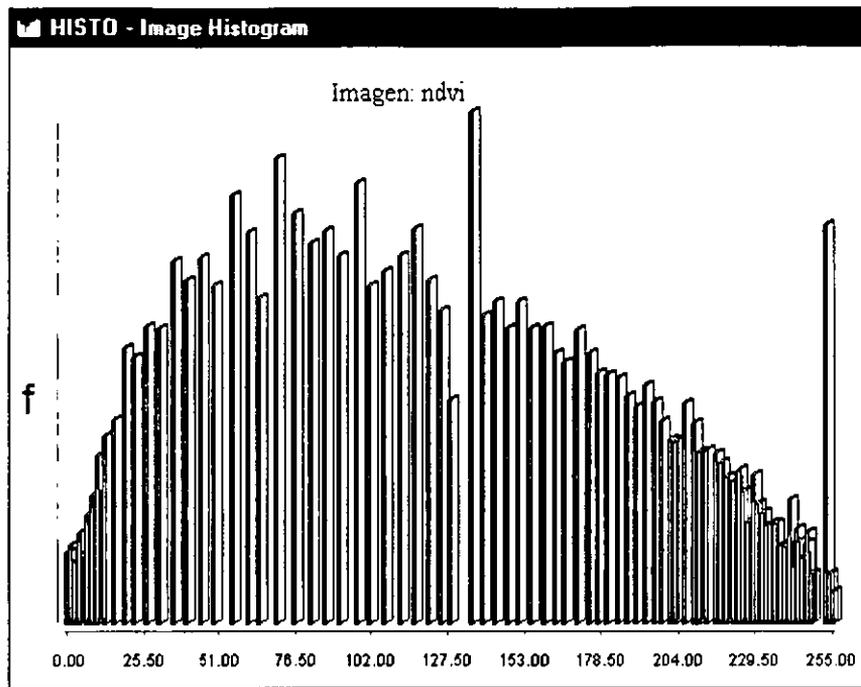
Figura 2.23.- Histograma normalizado de la componente 1 [cpe01].

En seguida estan los histogramas de las imágenes; (c) la segunda componente de la Transformación *Kauth – Thomas* llamada *greeness* (figura 2.24) y (d) el índice de vegetación normalizado.



(c)

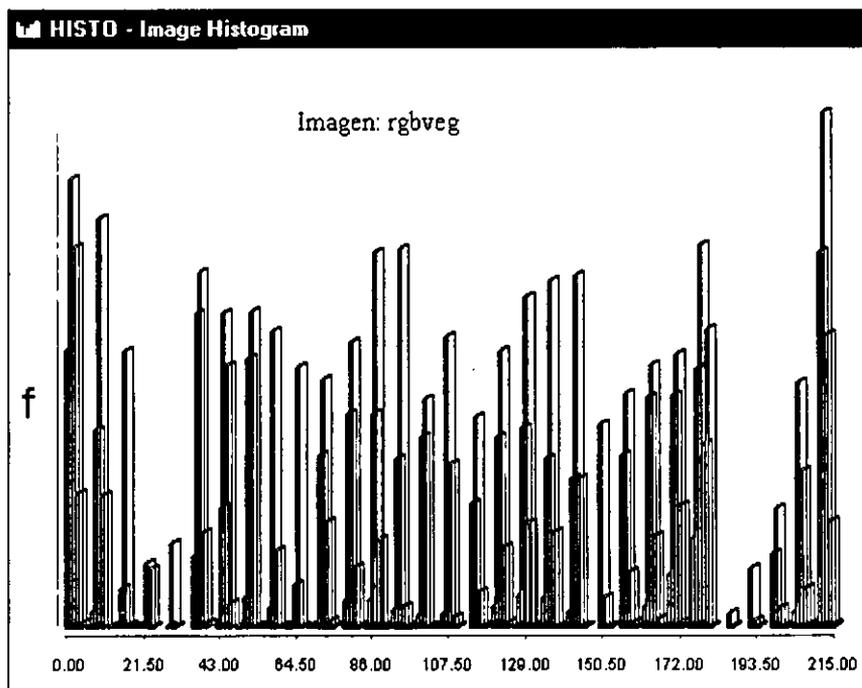
Figura 2.24.- Histograma normalizado de la componente *greeness* del análisis canónico [verde].



(d)

Figura 2.25.- Histograma normalizado del Índice de Vegetación Normalizado [ndvi].

Y por último tenemos el histograma de la imagen (e), compuesto a color RGB de las tres componentes para el análisis canónico de la vegetación.



(e)

Figura 2.26.- Histograma normalizado del compuesto a color RGB de las tres bandas sintéticas: cpe01, ndvi y verde [rgbveg].

De lo anterior, en cada uno de los histogramas que han sido ecualizados, para un mejoramiento en la imagen, se expanden los niveles de gris a lo largo de todo el intervalo del eje de las abscisas.

Etapa e

2.1.5 Análisis en Componentes Principales (PCA) transformación *Karhunen-Loeve (KL)* de la subimagen: Miveg.

Se realizó el análisis en componentes principales empleando la subimagen: Miveg.

El análisis en componentes principales se define de la siguiente manera:

“La descomposición en componentes principales es una transformación al conjunto de datos que se aplica simultáneamente a todas las bandas que componen la imagen, obteniéndose como resultado una imagen multispectral con bandas decorrelacionadas.

Esta transformación es denominada por algunos autores como *Karhunen-Loeve (KL)*, *Hotelling* o *Transformación de Eigenvector*” (Lira, 1998).

El análisis en componentes principales es una manera de evaluar la importancia de un conjunto de variables que están dadas en las bandas de la imagen y de esta manera saber su comportamiento a través de la diagonalización de la matriz de covarianza de la imagen respectiva.

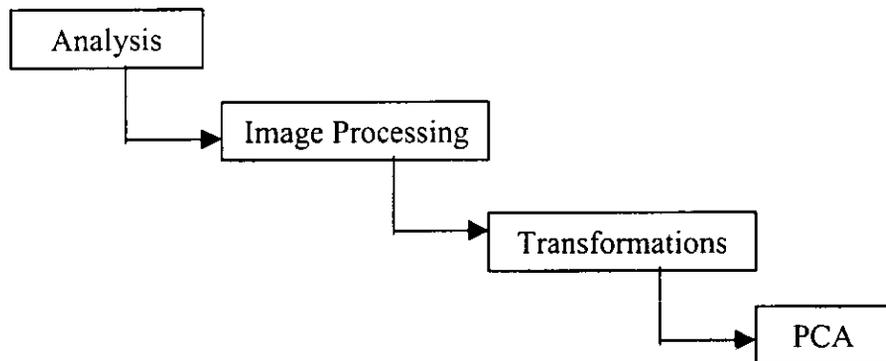
En otras palabras, el análisis en componentes principales, lo que hace es que genera un nuevo conjunto de imágenes cuyas bandas individuales presentan información no disponible en las bandas originales.

Esta transformación es derivada de la matriz de covarianza entre las bandas originales y genera un nuevo conjunto de imágenes donde cada valor de pixel es una combinación lineal de los valores originales. El número de componentes principales es igual al número de bandas utilizadas.

La primera componente principal tiene la mayor varianza (mayor contraste) y la última menor varianza (menor contraste).

Se procedió a utilizar el software de *Idrisi para Windows 95*, mediante el cual se procesaron cada una de las bandas de la subimagen con los nombres de: *miveg1*, *miveg2*, *miveg3*, *miveg4*, *miveg5* y *miveg7* respectivamente, quedando en formato *Idrisi* para su posterior análisis.

El acceso del módulo PCA de *Idrisi* se realiza de acuerdo al siguiente árbol:



El menú de selecciones de la figura 2.27 del módulo Análisis en Componentes Principales (PCA) con los parámetros seleccionados se muestra a continuación:

Figura 2.27.- Módulo de Idrisi de Análisis en Componentes Principales.

Ejecutando las rutinas de análisis, procesamiento de imágenes, transformación y análisis en componentes principales se obtuvo la transformación PCA de la subimagen Miveg.

Etapa f

2.1.6 Obtención de los parámetros en la transformación PCA de la subimagen Miveg.

A continuación se escribe la matriz de covarianza de la subimagen miveg:

Tabla 1.- *Matriz de covarianza de miveg.*

VAR/COVAR	miveg1	miveg2	miveg3	miveg4	miveg5	miveg7
miveg1	21.80	14.41	22.31	28.30	66.07	31.71
miveg2	14.41	11.91	18.25	24.38	55.80	26.52
miveg3	22.31	18.25	32.15	23.36	93.44	48.35
miveg4	28.30	24.38	23.36	175.17	112.96	27.90
miveg5	66.07	55.80	93.44	112.96	337.39	157.78
miveg7	31.71	26.52	48.35	27.90	157.78	84.58

La matriz de covarianza cuantifica la variación global de los valores de una banda con respecto a otra en un espacio multispectral, el cual está descrito por vectores, cuyos componentes son las respuestas espectrales individuales en cada banda, (Richards, 1986).

La matriz de covarianza es utilizada para generar los componentes principales ya que a partir de su diagonalización se obtienen los eigenvectores que determinan las direcciones de las componentes mencionadas.

Matriz de correlación

La matriz de correlación se obtiene a partir de la matriz de covarianza y representa la correlación global de una banda con respecto a otra. La matriz de correlación permite visualizar el parecido, en porcentaje, de una banda en relación con otra.

Tabla 2.- *Matriz de correlación de miveg.*

COR MATRX	miveg1	miveg2	miveg3	miveg4	miveg5	miveg7
miveg1	1.000000	0.894077	0.842831	0.457939	0.770356	0.738482
miveg2	0.894077	1.000000	0.932372	0.533598	0.880043	0.835503
miveg3	0.842831	0.932372	1.000000	0.311205	0.897091	0.927125
miveg4	0.457939	0.533598	0.311205	1.000000	0.464666	0.229256
miveg5	0.770356	0.880043	0.897091	0.464666	1.000000	0.933992
miveg7	0.738482	0.835503	0.927125	0.229256	0.933992	1.000000

Como se aprecia de la tabla 2, la matriz de correlación es simétrica y los elementos diagonales son siempre igual a uno ya que una banda es igual a si misma.

De la tabla anterior se deduce que globalmente el comportamiento de la vegetación presenta una correlación alta entre las primeras tres bandas, así entonces:

89% entre la banda 1 y la 2

84% entre la banda 1 y la 3

93% entre la banda 2 y la 3

Esta correlación se confirma examinando la curva (fig. 2.28) de la firma espectral⁺ de la vegetación.

Donde las propiedades espectrales de la vegetación están divididas en tres categorías; (fig. 2.28) abarcando desde la región espectral 0.4 μm a 2.6 μm .

En el visible se encuentra la absorción de la clorofila que va de 0.4 μm a 0.63 μm , ahí están los pigmentos de la hoja.

En el infrarrojo cercano 0.76 μm a 1.23 μm se encuentra la estructura de la célula.

En el infrarrojo medio está la absorción de agua que va de 1.25 μm a 2.6 μm y ahí está el contenido de agua.

⁺ Firma espectral: representa la respuesta característica de un objeto a determinada longitud de onda. Para la vegetación: son los pigmentos, la estructura del tejido vegetal y el contenido de agua de las hojas los que influyen principalmente en la respuesta espectral.

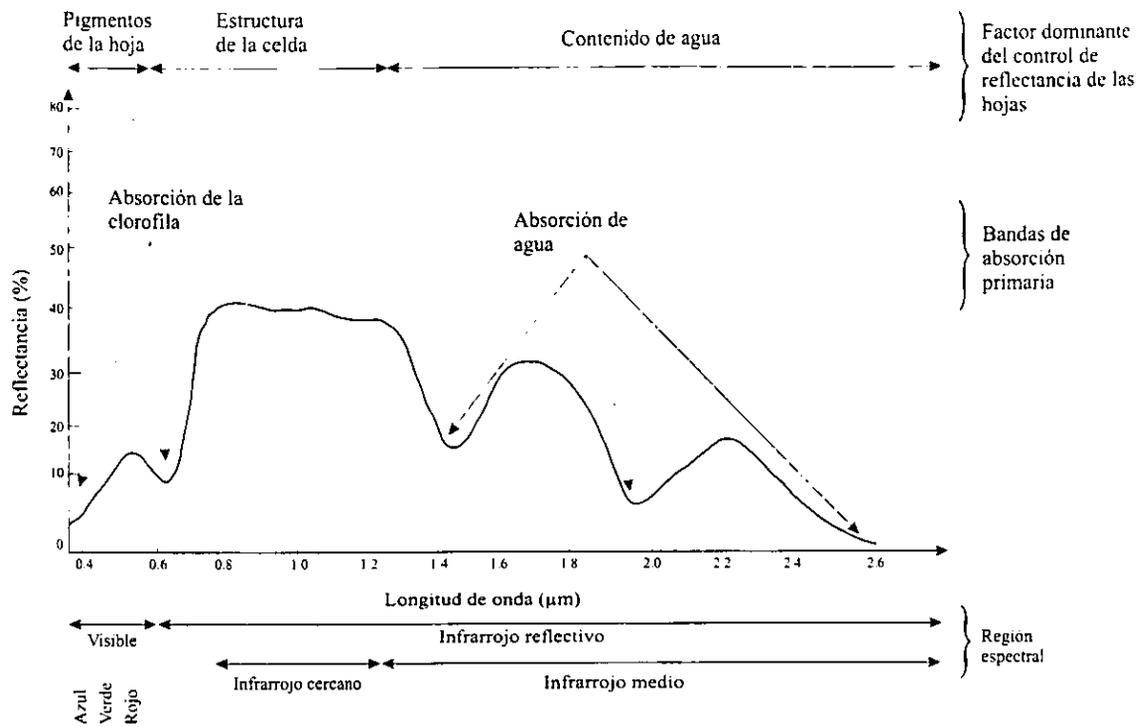


Figura 2.28.- Respuesta espectral de las características de la vegetación.

Debido al comportamiento de la vegetación (fig. 2.28) la correlación de las bandas del visible con la banda 4 es siempre baja y se incrementa con las bandas del infrarrojo medio: bandas 5 y 7. Este hecho se comprueba examinando la tabla 2.

Componentes Principales

Para obtener las componentes principales (eigenvectores) es necesario primero (Richards, 1986) calcular los eigenvalores de la matriz de covarianza (tabla 1), normalizados en porcentaje los eigenvalores son:

Tabla 3.- Porcentaje de cada eigenvalor de la matriz de covarianza de miveg.

COMPONENT	C1	C2	C3	C4	C5	C6
%var.	76.62	20.47	1.84	0.67	0.32	0.08

El primer eigenvector produce el primer componente principal, el segundo eigenvector da origen al segundo componente y así sucesivamente.

Para obtener el porcentaje de varianza tomamos cada eigenvalor lo dividimos entre la suma de todos los eigenvalores y obtenemos el porcentaje de información asociado a cada componente principal.

Como podemos observar en la tabla 3, la primera componente principal (figura 2.29) posee la mayor parte del porcentaje de varianza del total de los datos, concentrando así un 76.62% de información en cada una de las imágenes del recorte de miveg.

En la segunda componente principal (figura 2.30) se presenta menos contraste en la imagen y menor porcentaje de la información. En las componentes principales 3,4 y 5 (figuras 2.31, 2.32 y 2.33) contienen mucho menor información que en las dos primeras. Y en la última componente representa básicamente todo el ruido existente de los datos originales (figura 2.34).

De está manera se analizan los parámetros estadísticos resultantes que cada uno de los componentes principales que se muestran en las bandas seleccionadas.

Debido a que el primer eigenvalor concentra el mayor porcentaje de información (tabla 3) de la vegetación, se generó una banda de salida correspondiente al primer eigenvector (figura 2.29), es decir la primera componente principal. Esta primera componente representa el albedo de la vegetación.

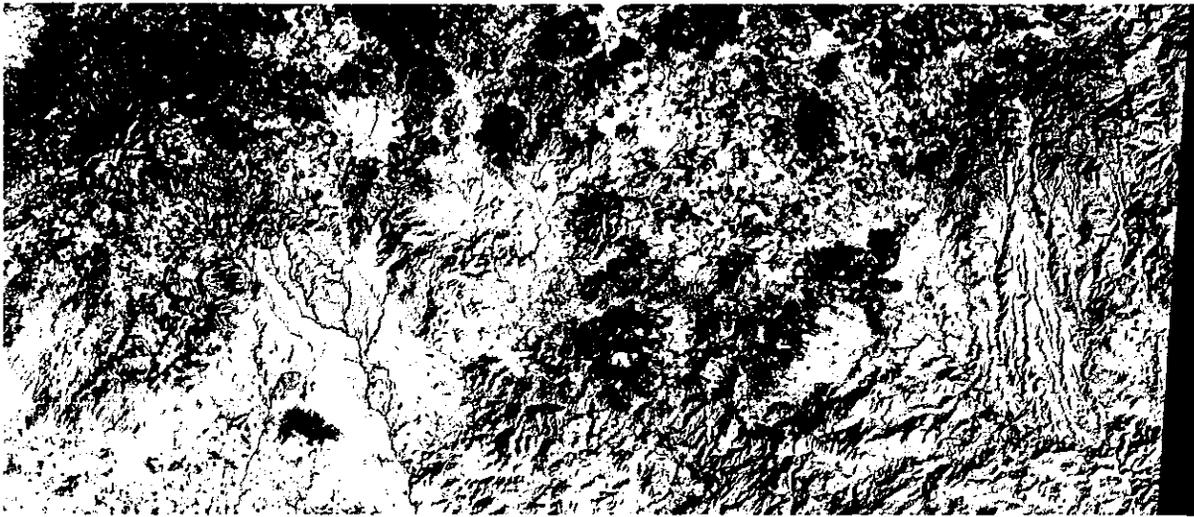


Figura 2.29.- Componente Principal No.1.

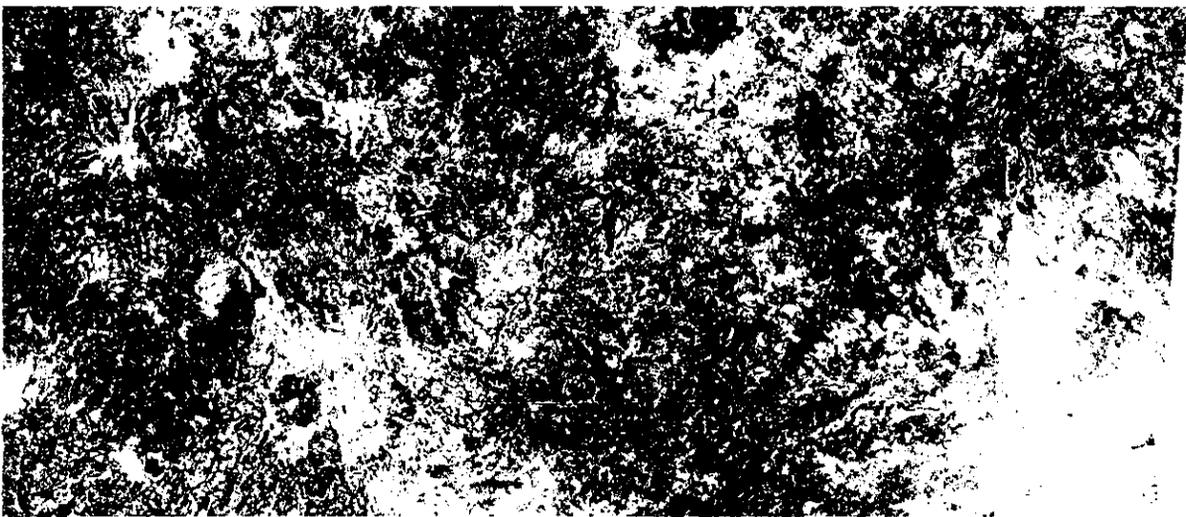


Figura 2.30.- Componente Principal No. 2.

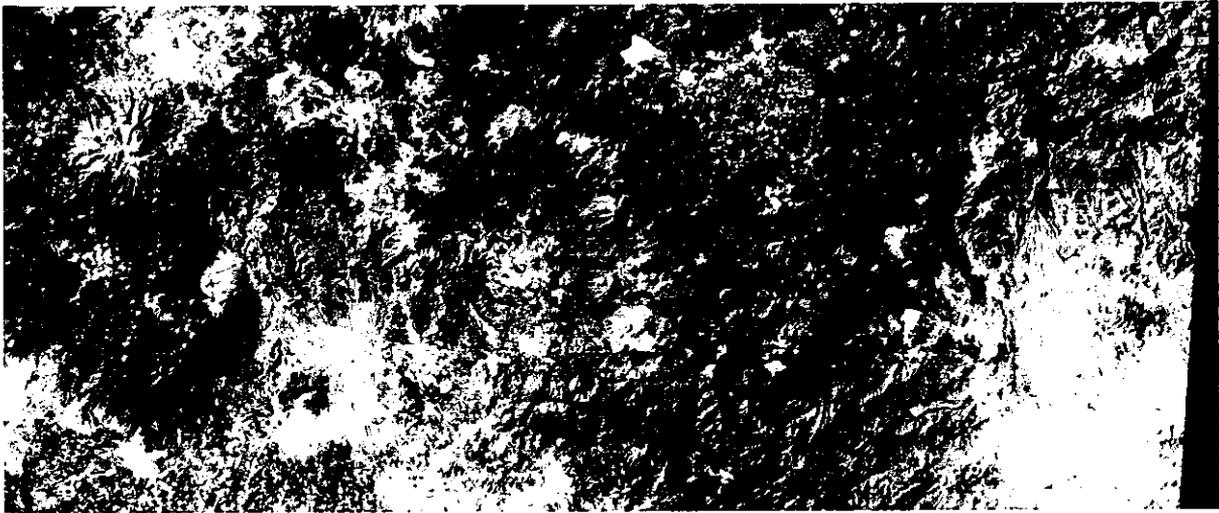


Figura 2.31.- Componente Principal No. 3.

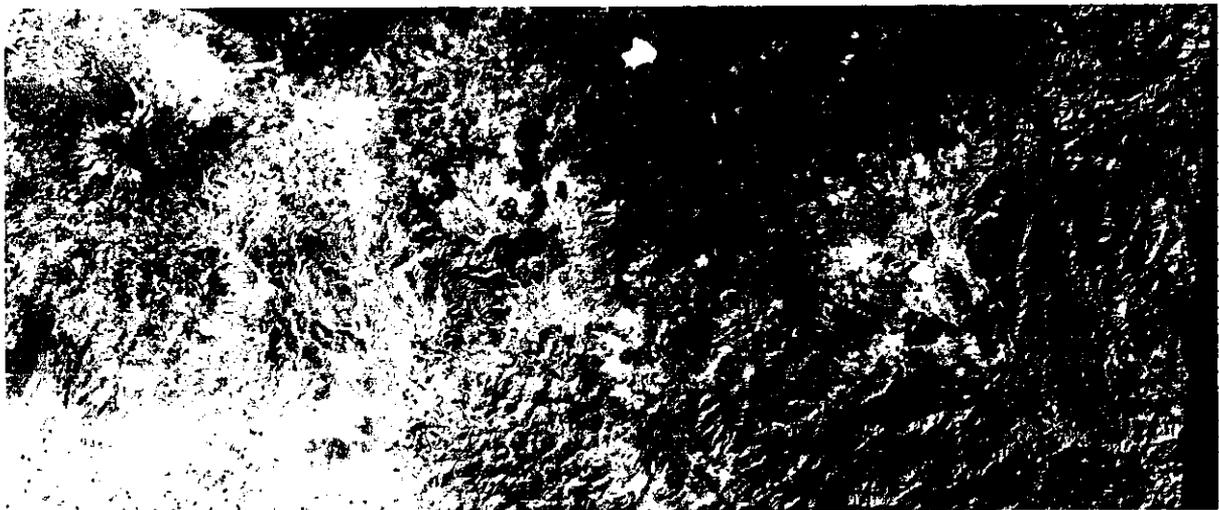


Figura 2.32.- Componente Principal No. 4.



Figura 2.33.- Componente Principal No. 5.

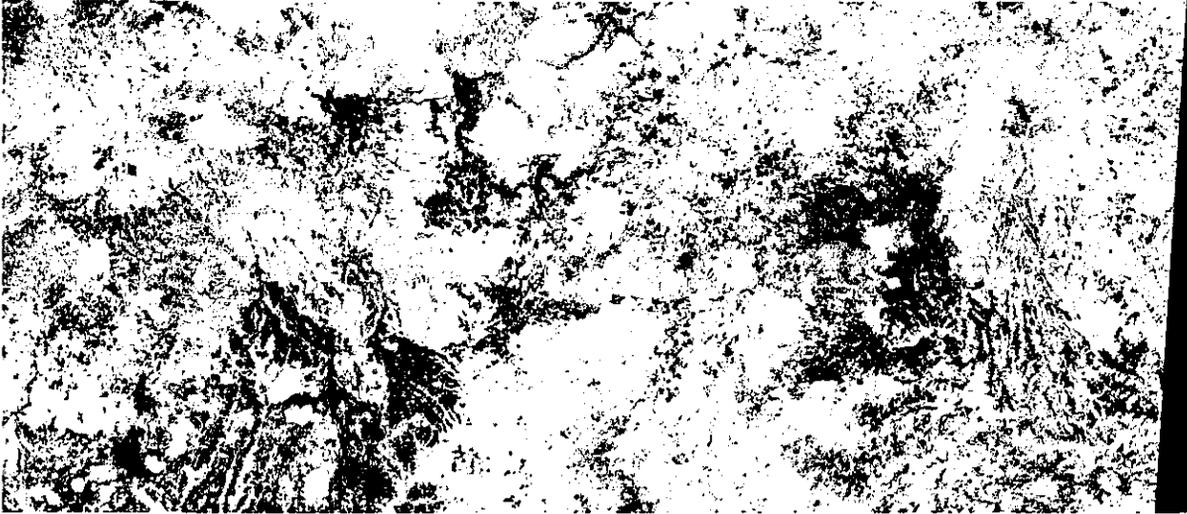


Figura 2.34.- Componente Principal No. 6.

Eigenvalores y Eigenvectores

Los eigenvectores representan las direcciones de los ejes de las componentes principales.

Tabla 4.- *Eigenvectores de la matriz de covarianza de miveg.*

eigenvalor	507.99	135.75	12.17	4.46	2.13	0.51
eigenvector 1	0.167811	-0.007022	0.687475	0.500120	0.483452	-0.123780
eigenvector 2	0.140428	-0.000997	0.321654	-0.014416	-0.261028	0.899152
eigenvector 3	0.225445	-0.130763	0.483151	-0.161328	-0.706812	-0.415969
eigenvector 4	0.344194	0.919702	0.023585	-0.176625	0.028816	-0.055639
eigenvector 5	0.804002	-0.218017	-0.411356	0.362959	-0.071094	0.006525
eigenvector 6	0.369332	-0.299111	0.143918	-0.748805	0.438942	0.005925

Para ejecutar la transformación de componentes principales es necesario calcular los eigenvectores.

El eigenvalor proporciona el grado de información presente en las nuevas bandas producidas por la descomposición en componentes principales. A los eigenvectores se les llama componentes principales y como los eigenvalores están arreglados de manera decreciente, entonces el contenido de información de la imagen es redistribuido entre estas componentes (o direcciones principales), de manera que la mayor información está concentrada en las primeras componentes o bandas de la imagen de salida, mientras que en las restantes se tiene muy poca información y prácticamente todo el ruido.

Etapa g

2.1.7 Kernel de la transformación que caracteriza la vegetación.

Los eigenvectores $(\epsilon_i)_j$ forman el kernel de la transformación que caracteriza la vegetación.

Aplicando el kernel de transformación de Miveg a Micho se obtiene una imagen donde la vegetación ha sido resaltada. El primer eigenvector se lista a continuación:

Tabla 5.- *Eigenvector 1 del kernel de la transformación que caracteriza a la vegetación.*

eigenvector 1	0.167811	-0.007022	0.687475	0.500120	0.483452	-0.123780
---------------	----------	-----------	----------	----------	----------	-----------

La primera componente principal se obtiene realizando una combinación lineal de las bandas de Micho, empleando como factores de peso los elementos de este primer eigenvector.

Etapa h

2.1.8 Algebra de bandas

Con los eigenvectores arriba mencionados se hace un algebra de bandas que se aplica a toda la imagen, simbólicamente es:

$$\begin{bmatrix} CP_1 \\ CP_2 \\ CP_3 \\ CP_4 \\ CP_5 \\ CP_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} & \epsilon_{14} & \epsilon_{15} & \epsilon_{16} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} & \epsilon_{24} & \epsilon_{25} & \epsilon_{26} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} & \epsilon_{34} & \epsilon_{35} & \epsilon_{36} \\ \epsilon_{41} & \epsilon_{42} & \epsilon_{43} & \epsilon_{44} & \epsilon_{45} & \epsilon_{46} \\ \epsilon_{51} & \epsilon_{52} & \epsilon_{53} & \epsilon_{54} & \epsilon_{55} & \epsilon_{56} \\ \epsilon_{61} & \epsilon_{62} & \epsilon_{63} & \epsilon_{64} & \epsilon_{65} & \epsilon_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_7 \end{bmatrix}$$

donde:

CP_i es la componente principal, $(\epsilon_i)_j$ es el eigenvector, i del renglón y j de la columna, b_i es la banda de la imagen digital multiespectral.

Aplicando la rutina de *Image Calculator de Idrisi* se realiza el algebra de bandas.

A continuación se muestra el menú (figura 2.35) de opciones del módulo *Image Calculator de Idrisi*:

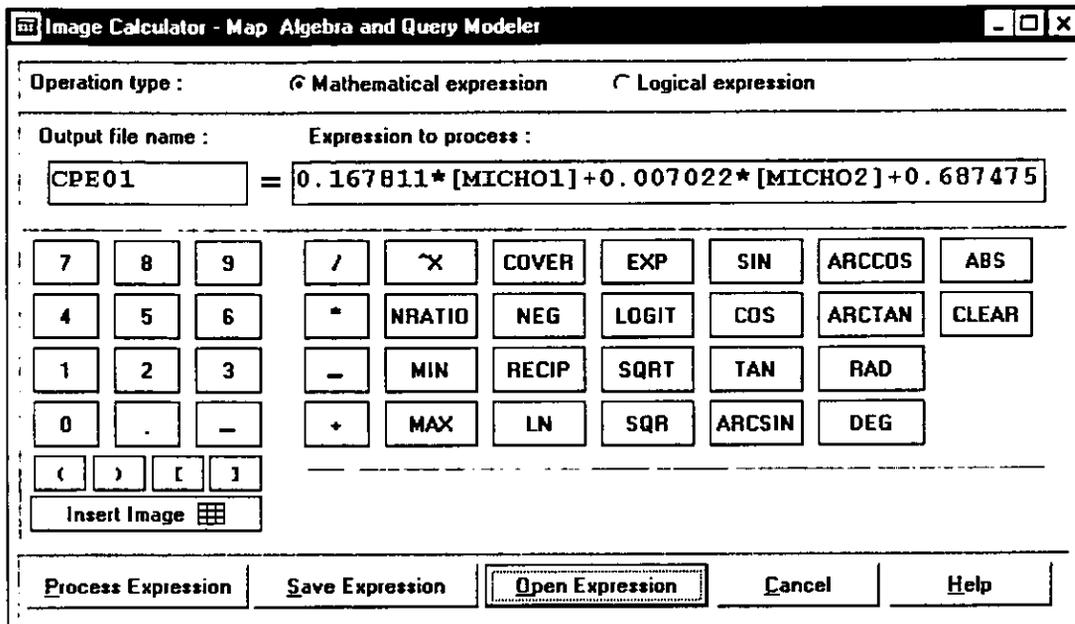


Figura 2.35.- Módulo de Idrisi, Algebra de bandas (Image Calculator).

Al aplicar la relación algebraica arriba escrita (figura 2.35) se obtiene la primera componente principal donde la vegetación ha sido resaltada, representando el albedo de ésta.

El proceso anterior constituye por tanto un ejemplo del análisis canónico aplicado a la vegetación. Es decir la vegetación ha sido separada espectralmente del resto de los patrones espectrales de la imagen.

Etapa i

2.1.9 Componente Principal 1

De acuerdo a lo arriba explicado, el primer eigenvector produce la primera componente principal de Micho, donde se resalta la vegetación.

En la primera componente se tiene un 76% de la información de las bandas, ya que por el efecto del albedo* se tiene la mayor parte de los datos contenidos entre las primeras tres componentes.

El kernel de transformación de la subimagen con vegetación únicamente, fue aplicado a la imagen entera, generándose solamente la primera componente principal de ésta, así entonces:

$$CP_1 = \epsilon_{11} b_1 + \epsilon_{12} b_2 + \epsilon_{13} b_3 + \epsilon_{14} b_4 + \epsilon_{15} b_5 + \epsilon_{16} b_7$$

donde:

la CP_1 es la componente mencionada (figura 2.36)

* El albedo es la relación de la energía electromagnética incidente con respecto a la reflejada por el terreno.

$(\epsilon_i)_j$ son los elementos de los eigenvectores que forman el kernel de la subimagen y b_i son las bandas de la imagen de la zona de estudio.

De esta manera la componente CP_1 (figura 2.36) tiene información resaltada de la vegetación.

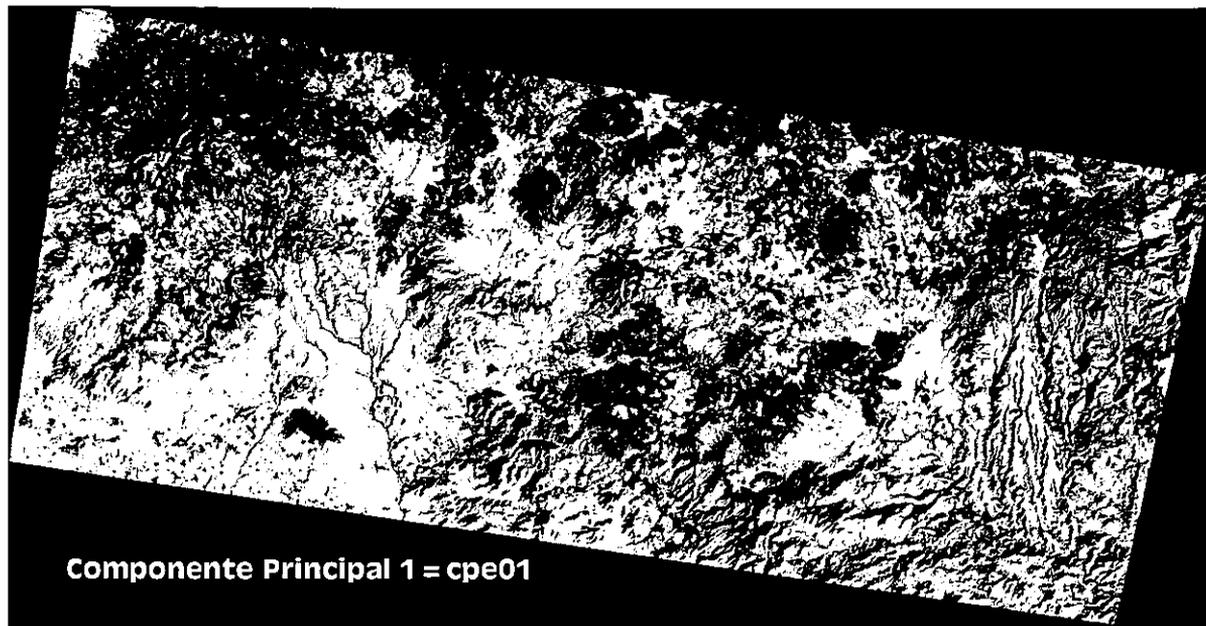


Figura 2.36.- Componente Principal No. 1.

Etapas j

2.2.1 Índice de Vegetación Normalizado

Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales, cuya función es realzar la contribución de la vegetación en función de la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc.

El índice de vegetación es un cociente y efectúa una división pixel a pixel entre los niveles digitales en dos bandas de la misma imagen (Chuvieco, 1990), con esto nos permite diferenciar o discriminar entre suelos y vegetación.

Un índice de vegetación presenta la sensibilidad de los cambios en la cobertura vegetal, basándose en la diferencia de reflectancia que la vegetación muestra:

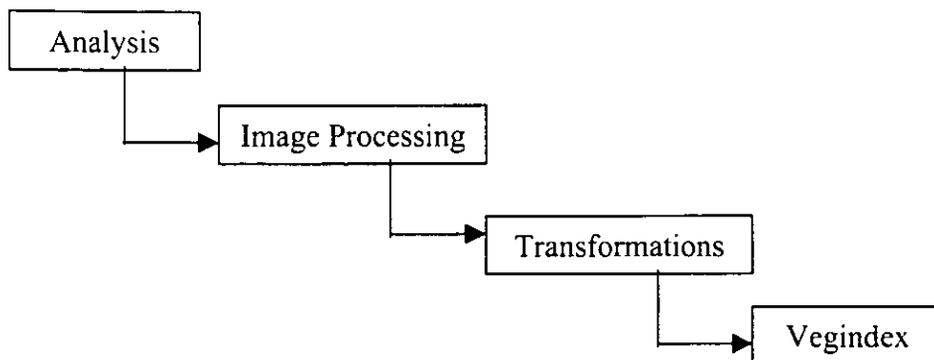
$$NDVI = \frac{\text{banda}_j - \text{banda}_i}{\text{banda}_j + \text{banda}_i}$$

El índice de vegetación empleado en el presente trabajo (figura 2.37) se define de acuerdo a la relación:

$$NDVI = \frac{\text{banda7} - \text{banda4}}{\text{banda7} + \text{banda4}}$$

Es decir $j = 7, i = 4$.

El procedimiento que se siguió para obtener el índice de vegetación normalizado empleando el módulo de *Idrisi* fue:



El menú (figura 2.37) para seleccionar el NDVI es el siguiente:

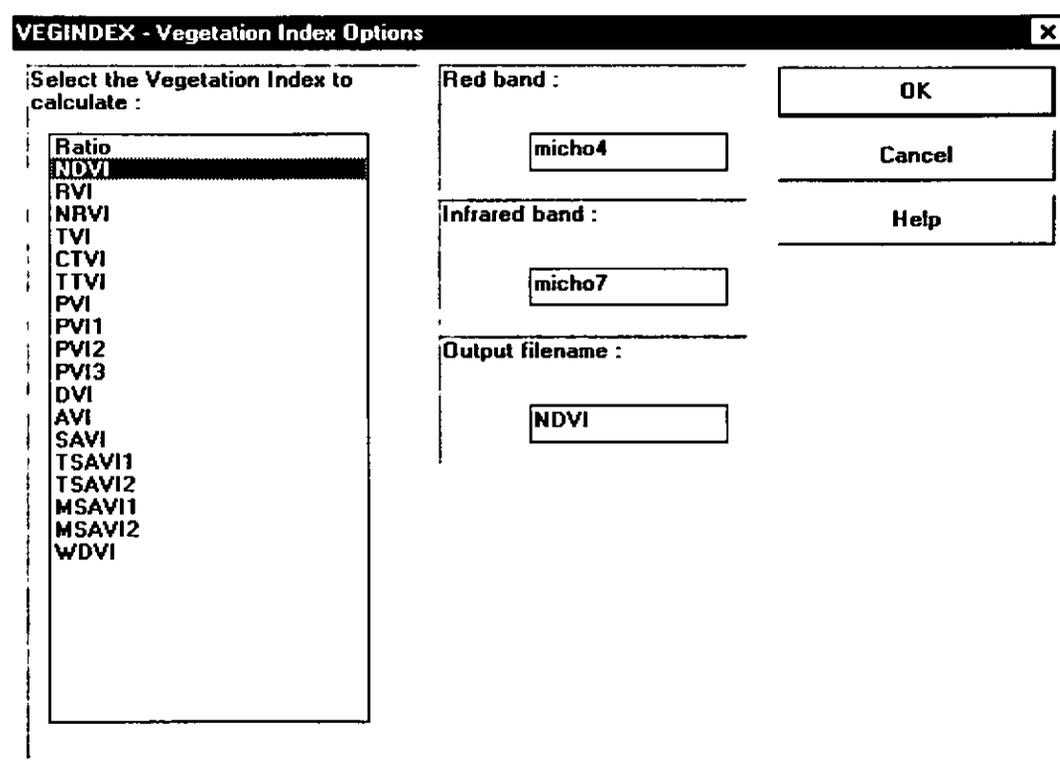


Figura 2.37.- Módulo de Idrisi Índice de Vegetación Normalizado.

Se utilizó la banda micho4 que se encuentra en el infrarrojo cercano (IRC), la banda micho7 que está en el infrarrojo medio (IRM) y se produjo la imagen llamada: ndvi.bmp, ver figura 2.38.

El índice de vegetación normalizado NDVI (figura 2.38) tiene la ventaja de reducir el efecto de sombras presente en la caracterización espectral de la imagen de estudio.

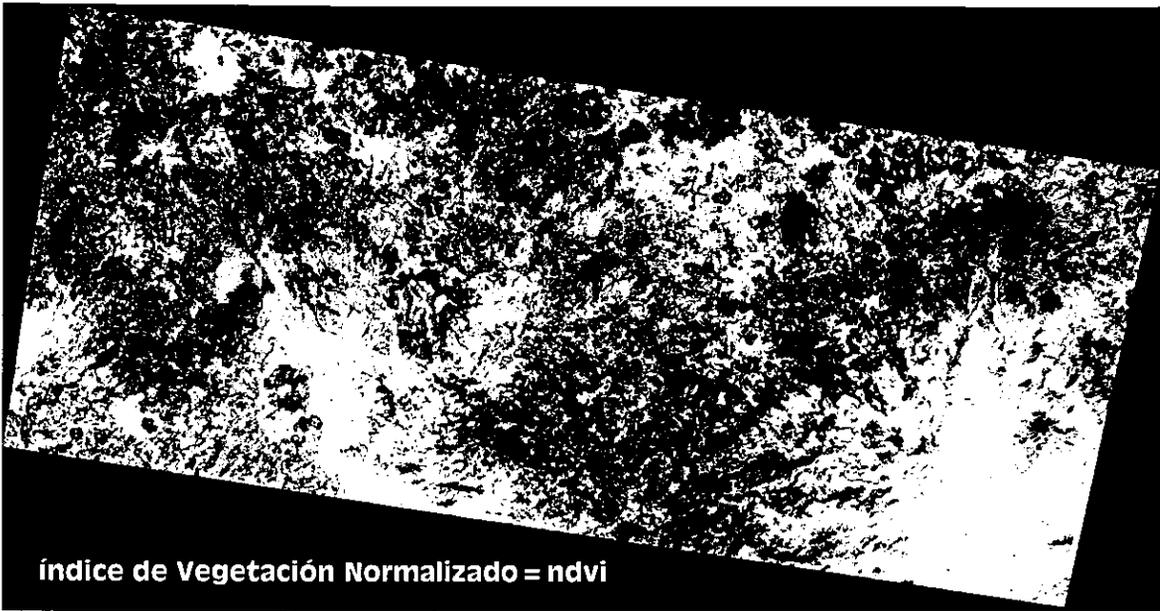


Figura 2.38.- Índice de Vegetación Normalizado (ndvi).

Etapa k

2.2.2 Análisis Canónico y la Transformación Kauth - Thomas

En la realización del presente trabajo primero se hizo un recorte de cada una de las bandas de la imagen Landsat TM 28-47 y para obtener la imagen llamada: micho, que es por tanto multiespectral con 6 bandas: 1,2,3,4,5 y 7; para después hacer otro recorte con una subregión que comprende vegetación únicamente y se le llamó: miveg y por tanto es multiespectral con 6 bandas, con el objeto de aplicar un análisis canónico a la vegetación de la zona de estudio.

Ahora pasaremos a definir qué es el análisis canónico y su implementación por medio de la transformación *Kauth – Thomas*.

Análisis Canónico

“El análisis canónico es una variante de la transformación Karhunen-Loeve (KL), pero con un carácter más específico, pues incluye información acerca del comportamiento estadístico de las clases de patrones de la imagen multiespectral y por lo mismo se requiere de información a priori acerca de la misma” (Lira, 1998).

En esta transformación se pretende obtener una máxima separación entre clases espectrales predefinidas, y si se quiere separar una sola clase del resto, se utiliza la transformación *Kauth – Thomas*, realizada en esta tesis: separar la vegetación del resto de las clases.

El objetivo principal del análisis canónico es:

- Que las clases espectrales definidas estén lo más compactas posibles, es decir con la dispersión espectral mínima.
- Y una máxima separación espectral entre ellas, es decir una máxima desviación estándar entre clases.

Entonces si se pretende la dispersión mínima de clases, tendrán que tener una compacidad máxima de los datos de las clases. Y la desviación estándar que será la máxima separación entre ellas, será la distancia máxima u óptima que existe entre los datos de cada clase.

Para que se cumplan estas dos condiciones es necesario calcular:

- Las matrices de covarianza de cada clase y
- La matriz de covarianza de entre las clases como un todo.

En la figura 2.39 se tiene una representación gráfica de este proceso, donde para obtener una separación máxima entre las clases A, B, y C, éstas tienen que ser proyectadas sobre un nuevo eje coordenado: b'_1

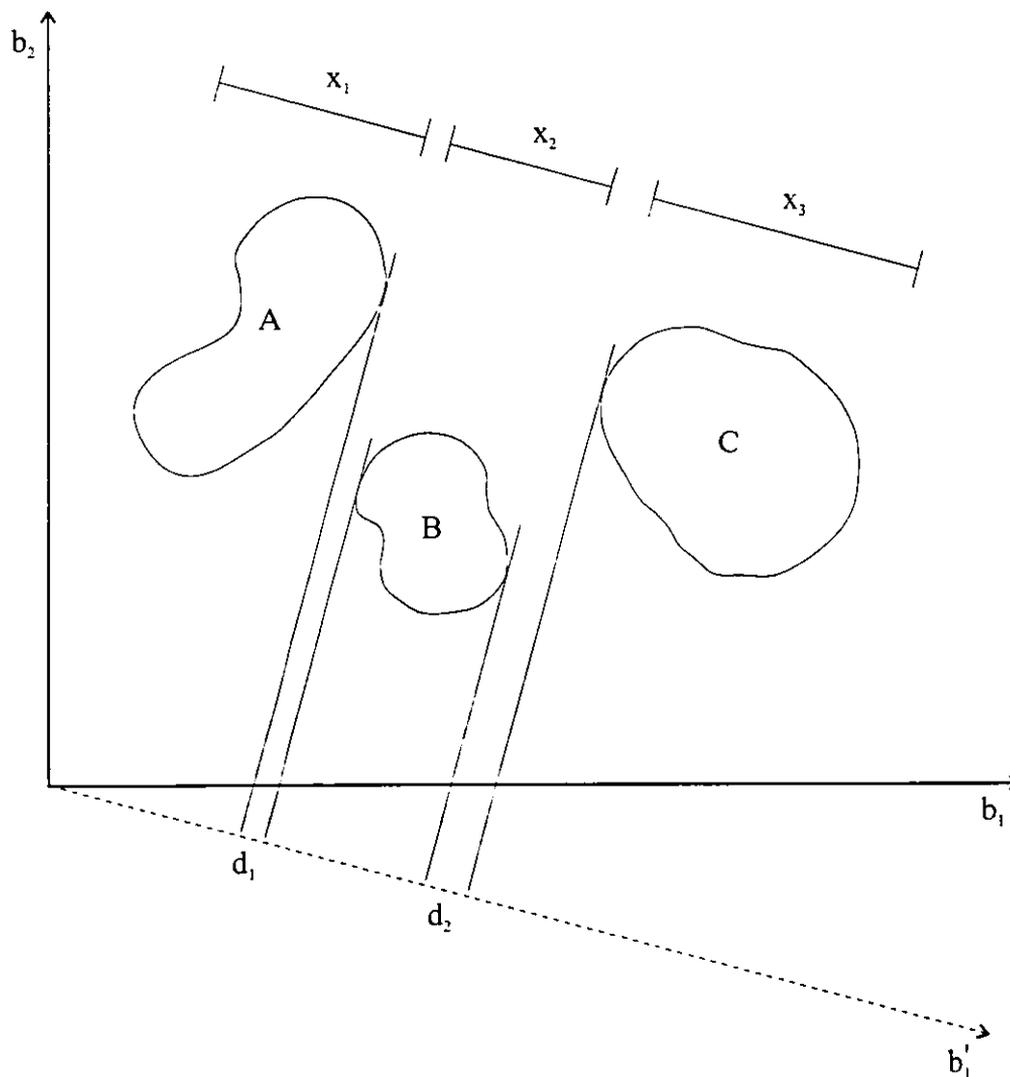


Figura 2.39.- Nube de datos de una imagen de dos bandas mostrando tres clases separables completamente en el eje b'_1 .

En esta transformación se genera un nuevo espacio coordinado donde las clases A, B y C, de la figura 2.39 de las cuales se proporciona información, tienen máxima separabilidad y mínima dispersión.

El análisis canónico en percepción remota es la reducción y la selección de características espectrales, así como el resultado de las clases frecuentemente distribuidas en la dirección de la información máxima esparcida. Esto es particularmente para tipos de cobertura espectralmente similares (Richards, 1986).

La aplicación de un análisis canónico puede emplearse para separar una clase dada en este caso (vegetación) del resto de la imagen, que a su vez se ve como la clase restante (Lira, 1998).

Transformación Kauth-Thomas

Ahora pasaremos con la transformación *Kauth-Thomas* que tiene una aplicación del análisis canónico para estudiar coberturas vegetales.

La transformación *Kauth – Thomas* (KT), fue diseñada por estos investigadores Kauth y Thomas en 1976, para los primeros satélites Landsat y extendida después al TM de los últimos satélites de esta serie (Crist, 1984), (Lira, 1998).

Esta transformación nos demuestra que teniendo una subregión de una cobertura vegetal está puede ser evaluada en relación con la evolución y tipo de cultivos presentes en la imagen multiespectral.

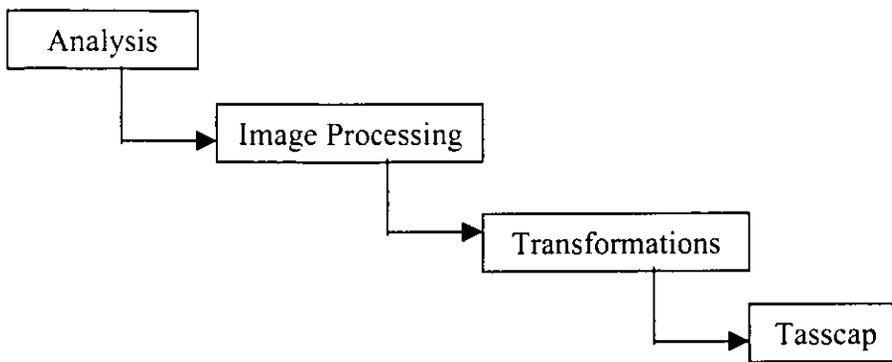
En la evolución de las plantas, los factores suelo y sombras van cambiando según estén creciendo estas, y la respuesta espectral de la cobertura vegetal, conforme crece y se desarrolla va dominando y mezclándose con la del suelo y sombras.

También es importante mencionar que hay aspectos externos que intervienen en la evaluación de la cobertura vegetal, y son: condiciones atmosféricas y geometría de iluminación. “Los componentes como neblina, bruma, aerosoles, nubes, vapor de agua y la distribución del albedo en la zona de interés, afectan sensiblemente la medida de radiancia hecha por el sensor satelitario y en consecuencia la respuesta espectral observada no corresponde directamente a los objetos sensados y además puede variar de lugar a lugar y de un tiempo a otro. Las sombras que proyectan las plantas en su etapa de crecimiento y maduración, ejercen una influencia en la variación de la respuesta espectral observada.

Además de esto, a medida que cambian los ángulos de vista e iluminación, la cantidad de sombra que proyecta el cultivo cambia también, de aquí que la reflectancia total pueda ser más clara u oscura de lo que en realidad es.” (Lira, 1998).

En resumidas cuentas: la transformación *Kauth – Thomas* es un proceso de análisis canónico diseñado especialmente para estudiar la evolución de la cobertura vegetal presente en una imagen multiespectral. La información que esta transformación presenta, es complementaria a la derivada por la descomposición en componentes principales y por la generada a través del índice de vegetación. Esto quedará demostrado más adelante.

Para la realización de la transformación *Kauth – Thomas* de las bandas de Micho, se sigue el siguiente árbol en *Idrisi*:



En la siguiente figura 2.40 se muestra el módulo de *Tassled Cap Transformation* en el cual se llenaron los parámetros requeridos:

Figura 2.40.- Modulo de Idrisi, Tassled Cap Transformation.

Cada una de las bandas de micho son utilizadas como imágenes de entrada para llevar a cabo la transformación *Kauth – Thomas* (KT), al correr esta rutina (fig. 2.40) se obtienen a la salida 3 imágenes, que son: la primer imagen es brillo (*brightness*), la segunda es el verdor (*greenness*), y la tercera es la amarillez (*yellowness*), para este trabajo utilizaremos la segunda componente para el análisis canónico.

En la siguiente figura (figura 2.41) mostramos la imagen *Kauth – Thomas* (KT), que es la segunda componente del análisis canónico.

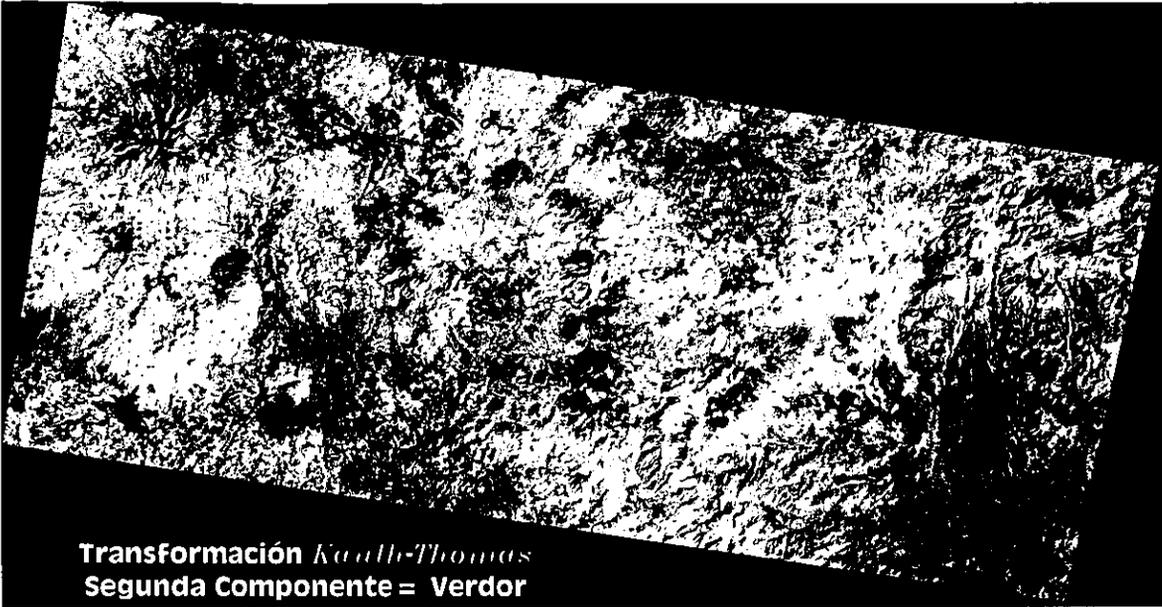


Figura 2.41.- Transformación Kauth-Thomas, segunda componente del análisis canónico.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA IMAGEN

Siguiendo con la continuidad del diagrama de bloques presentado en el capítulo II se desarrollan las siguientes etapas y el proceso digital para el grupo de bandas sintéticas que caracterizan la vegetación en la zona de estudio.

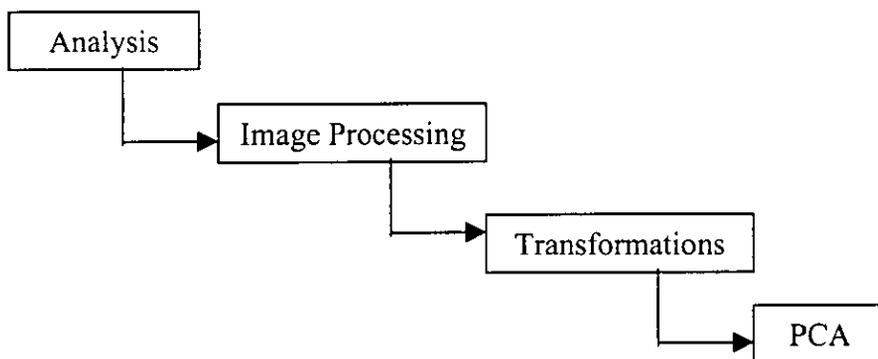
Etapas I

3.1 Matriz de correlación de las bandas sintéticas:

Componente 1: cpe01, Índice de Vegetación Normalizado: ndvi y Transformación Kauth-Thomas: verde

Para demostrar que la información, en cuanto a vegetación, que arrojan las imágenes de componentes principales, índice de vegetación y la transformación *Kauth-Thomas*, es complementaria, en esta etapa se hace el análisis en componentes principales PCA de las tres bandas sintéticas obtenidas anteriormente, que son llamadas: componente principal 1 [cpe01], índice de vegetación normalizado [ndvi] y la transformación *Kauth-Thomas* [verde] que es la segunda componente del análisis canónico aplicado a la vegetación.

Se utiliza la rutina de PCA, que es el análisis en componentes principales de *Idrisi*, para su procedimiento se siguen los siguientes pasos:



En esta ventana se llena el menú para ejecutar el análisis en componentes principales de las tres bandas: cpe01, ndvi y verde.

Figura 3.1.- Menú para calcular el Análisis en Componentes Principales.

En este menú (figura 3.1) nos pide primero el número de bandas de entrada, después el número de componentes que deseamos obtener y por último un prefijo de tres letras que procederá a los nombres de las imágenes de salida de los componentes. Entonces, el resultado será la transformación en componentes principales PCA de las tres bandas sintéticas.

Teniendo la matriz de covarianza, la matriz de correlación, las componentes, el porcentaje de varianza, los eigenvalores y los eigenvectores.

A continuación se escribe la matriz de covarianza de las bandas sintéticas: cpe01, verde y ndvi.

3.1.1 Matriz de covarianza

Tabla 6.- *Matriz de covarianza de las bandas sintéticas: cpe01, verde y ndvi.*

VAR/COVAR	cpe01	verde	ndvi
cpe01	5477.31	2366.15	1954.83
verde	2366.15	5394.90	-2716.47
ndvi	1954.83	-2716.47	5366.89

A partir de la matriz de covarianza de estas tres bandas sintéticas, se generan los componentes principales, por medio de su diagonalización se obtendrán los eigenvectores que determinan las direcciones de las componentes principales de tales bandas sintéticas.

3.1.2 Matriz de correlación

La matriz de correlación es obtenida apartir de la matriz de covarianza arriba mencionada.

Como se puede observar en la tabla 7 los elementos de la matriz de correlación son relativamente pequeños, mostrando una complementariedad de información, entre estas tres bandas sintéticas.

Tabla 7.- *Matriz de correlación de las bandas sintéticas: cpe01, verde y ndvi.*

COR MATRX	cpe01	Verde	ndvi
cpe01	1.000000	0.435279	0.360549
verde	0.435279	1.000000	-0.504838
ndvi	0.360549	-0.504838	1.000000

Los resultados de éstas tres bandas sintéticas son de gran ayuda complementaria, ya que si se requieren hacer estudios de discriminación en cubiertas vegetales únicamente, es mucho mejor y más óptimo el resultado, que si se hace utilizando la componente principal 1, ó el índice de vegetación normalizado ó la segunda componente del análisis canónico.

Porque si se hace con sólo una de las bandas sintéticas antes mencionadas, los resultados no son satisfactorios.

Por está razón las tres bandas sintéticas hacen la función de separar la vegetación, y con esto, no es que se haga una redundancia con la información obtenida, sino una complementariedad entre sí mismas, de tal manera que las propiedades de la vegetación son separadas espectralmente del resto de los patrones espectrales de la imagen.

En otras palabras la información en cuanto a vegetación que aportan las tres bandas sintéticas, cpe01, verde y ndvi, no es redundante sino complementaria.

Estas tres bandas sintéticas son variables decorrelacionadas, donde la componente principal 1 [cpe01], representa el albedo del terreno incluyendo a la vegetación, la intensidad en el verdor es la transformación *Kauth – Thomas* [verde], y el contenido de humedad representado por el índice de vegetación normalizado [ndvi].

3.1.3 Componentes, Eigenvalores y Eigenvectores

Como dato complementario a la matriz de correlación que se muestra en la tabla 8, puede apreciarse que la primera componente tiene un porcentaje del 50% de la información con respecto a las otras dos, la segunda componente tiene un 45% y la tercera componente tiene un porcentaje de varianza relativamente bajo.

Eigenvalores y Eigenvectores

Tabla 8.- *Eigenvectores de la matriz de covarianza de las bandas sintéticas: cpe01, verde y ndvi.*

COMPONENT	C1	C2	C3
%var.	50.40	45.26	4.34
eigenvalor	8185.06	7349.47	704.57
eigenvector.1	0.277270	0.796281	-0.537641
eigenvector.2	0.781940	0.138141	0.607855
eigenvector.3	-0.558294	0.588943	0.584341

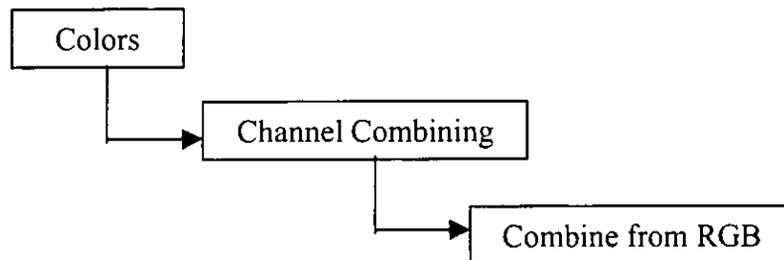
En la descomposición de componentes principales se tienen que calcular los eigenvectores, que se les llama componentes principales; y el contenido de información de los eigenvalores estas distribuido de manera decreciente, así que la mayor información se encuentra en la primera componente arriba mencionada, y en las restantes se tiene menor información. Sin embargo, la información de las tres componentes principales de las bandas sintéticas es considerable. Ninguna componente puede ser descartada como lo muestra la matriz de correlación y la tabla 8.

Etapas m

3.1.4 Compuesto a color RGB de las bandas sintéticas: cpe01, ndvi y verde

La representación visual del compuesto a color RGB (figura 3.2) de las bandas sintéticas cpe01, ndvi y verde es la superposición de éstas tres bandas, utilizando las funciones de color para resaltar y analizar los elementos que se encuentren presentes en la imagen digital multibanda compuesta por estas bandas sintéticas.

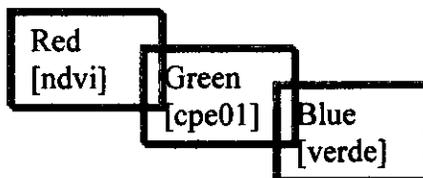
La combinación de colores se hizo siguiendo la siguiente trayectoria en *Paint Shop Pro*:



Asignando para el color rojo la banda sintética del índice de vegetación normalizado [ndvi], para el color verde la componente principal 1[cpe01] y para el azul la segunda componente del análisis canónico llamada [verde].

Entonces queda de la siguiente manera la composición RGB a color:

Red	ndvi
Green	cpe01
Blue	verde



La imagen de salida (figura 3.2) se llama: rgbveg.bmp

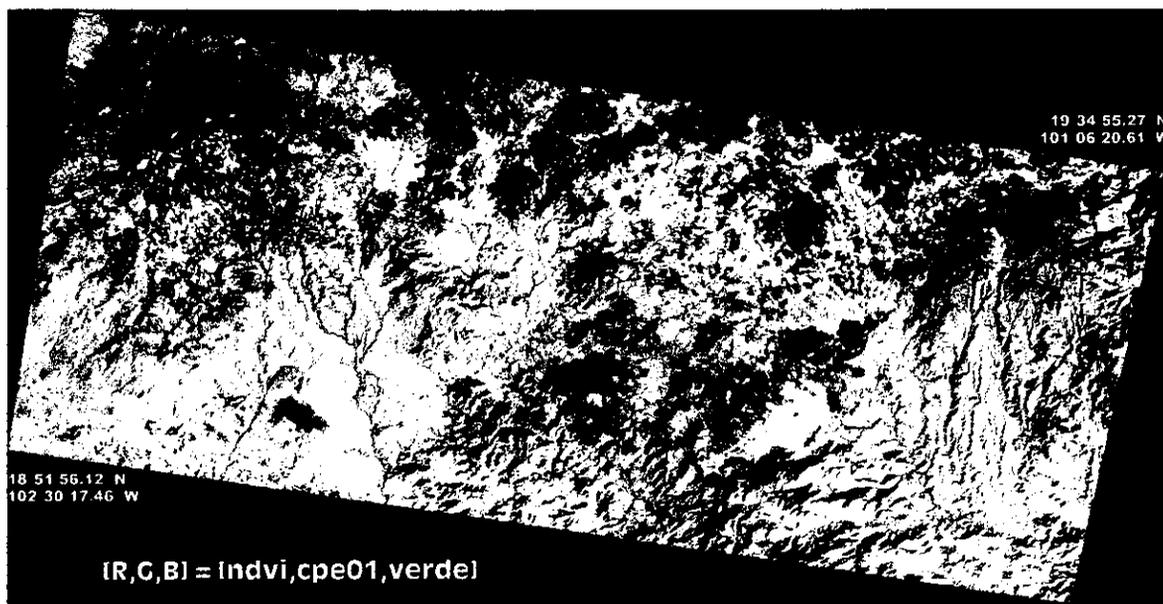


Figura 3.2.- Compuesto a color RGB, de las bandas sintéticas ndvi, cpe01 y verde.

Etapa n

3.1.5 Clasificación con Isodata empleando las bandas sintéticas: cpe01, ndvi y verde

Una clasificación es la asignación o agrupación de los datos espectrales (pixels) contenidos en la imagen, a una de las clases espectrales definidas.

Primero definiremos un análisis de cúmulos que también se le conoce con el nombre de clasificación espectral no supervisada.

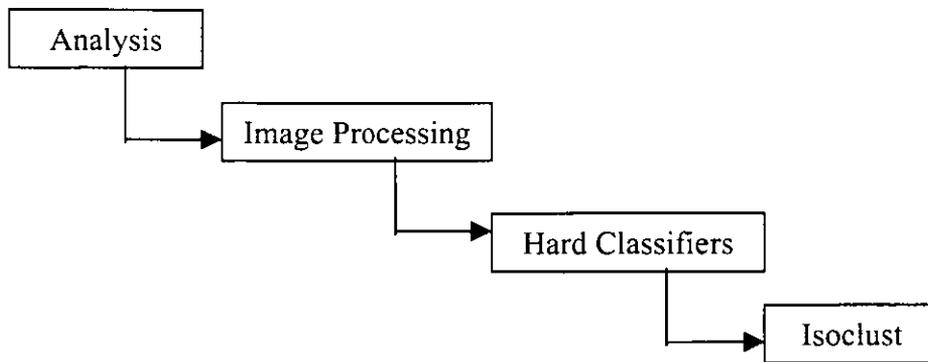
El análisis de cúmulos está basado en la identificación de grupos de pixels con valores similares (Lira, 1995).

El análisis de cúmulos es un método de segmentación, es decir, que una imagen es segmentada en clases espectrales y seguida de una etiquetación (identificación) de cada cúmulo de acuerdo con los objetos de la imagen, por ello, recibe el nombre de clasificación no supervisada (Chavira, 1996).

En una clasificación no supervisada, la segmentación de los tipos de cobertura a ser especificadas como clases dentro de una escena no son conocidas a priori, generalmente, porque se carece de un trabajo de campo o los rasgos de la superficie en la imagen no están bien definidos (Sanvicente, 1996).

De lo anterior, para nuestro caso, la clasificación con el algoritmo de *Isodata* examina los datos y los agrupa en *clusters* (clases), y genera un mapa temático con diferentes clases segmentadas, esto es, que las características espectrales de las clases sean comunes entre sí, y permita integrarlas en una sola clase.

A partir de las bandas sintéticas que componen el índice de vegetación, la componente principal 1 y verde, que es la segunda componente del análisis canónico, se aplicó el módulo de *Isoclust de Idrisi* que a continuación se describe:



De esta manera se hace el llenado del menú de selecciones para ejecutar la clasificación con la rutina de *Isodata*: que usa un algoritmo basado en una distancia mínima espectral para asignar pixels por grupos (Mikkola, K 1996).

El módulo de *Isoclust* (figura 3.3) que es un algoritmo para clasificar nos pide primero el número de bandas que serán procesadas, las cuales son tres, después el compuesto a color que es el llamado *rgbveg* (que es el compuesto a color RGB de las bandas sintéticas), el nombre de la imagen de salida y los nombres de las bandas para ser procesadas, que son llamadas *cpe01* la componente principal 1, el índice de vegetación normalizado *ndvi* y la transformación *Kauth-Thomas* que es la segunda componente del análisis canónico aplicado a vegetación, llamada verde.

ISOCLUST - Iterative Self-Organizing Cluster Analysis [X]		
Number of bands (max = 7): <input type="text" value="3"/>	Bands to be processed:	Continue...
Name of composite image for seeding clusters: <input type="text" value="rgbveg"/>	Band 1: <input type="text" value="cpe01"/>	Cancel
Output image: <input type="text" value="iso"/>	Band 2: <input type="text" value="ndvi"/>	Help
	Band 3: <input type="text" value="verde"/>	

Figura 3.3.- Menú de selecciones del algoritmo *Isoclust*, para la clasificación no supervisada.

Con esta rutina de *Isoclust*, se utiliza un procedimiento conocido como el análisis de clases auto-organizadas, donde el usuario especifica el número de clases a procesar; y los pixels son entonces asignados a las clases que son próximas vecinas al primero.

Después, se nos pide el número de iteraciones para ser procesada y el número de clases deseadas, (figura 3.4).

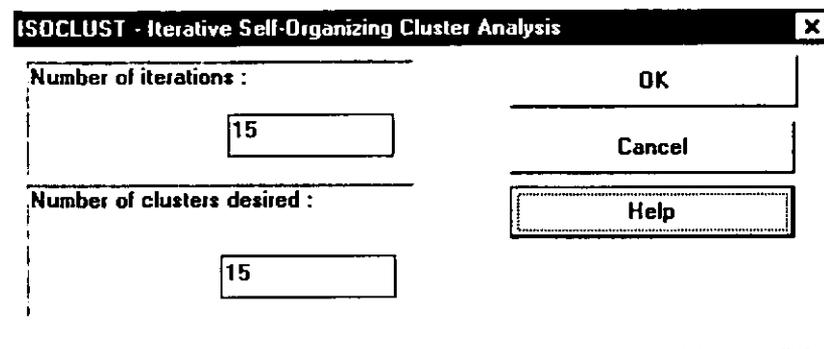


Figura 3.4.- Submenú del algoritmo de *Isoclust*, donde se asignan el número de iteraciones y el número de clases deseadas.

Donde este módulo realiza una agrupación de pixels en clases, lo que arrojará aquellos pixels cuyas características espectrales sean comunes entre sí y permitirá integrarlos en una sola clase. Esto nos dará como resultado una imagen clasificada con 15 clases (figura 3.4), las cuales serán editadas en *Paint Shop Pro*; y la razón de tal edición estriba en que debido a las geoformas del terreno, las sombras proyectadas por las elevaciones producen dos clases (en sombra y en iluminación) diferentes del mismo objeto espectral. Si bien en las bandas sintéticas, el efecto de sombra ha sido disminuido, pero el relieve es tan pronunciado que se generan ambigüedades en la clasificación. De aquí la necesidad de la edición mencionada.

Etapa O

3.1.6 Imagen con 15 número de clases

El resultado de la clasificación con la rutina *Isodata*, es un mapa temático con 15 clases (figura 3.5) el cual tiene el nombre de *iso.bmp*, dicha imagen tiene que ser editada, no porque no funcione la metodología utilizada, sino por que hay que resolver ambigüedades de las sombras proyectadas y que están presentes en el Sistema Volcánico Transversal; estas elevaciones producen dos clases diferentes (en sombra y en iluminación) en el caso de los diferentes tipos de bosques de pino, pino-encino, encino y oyamel, siendo así el mismo objeto espectral, también para el caso de la clase agua se confunden con las sombras arriba mencionadas.

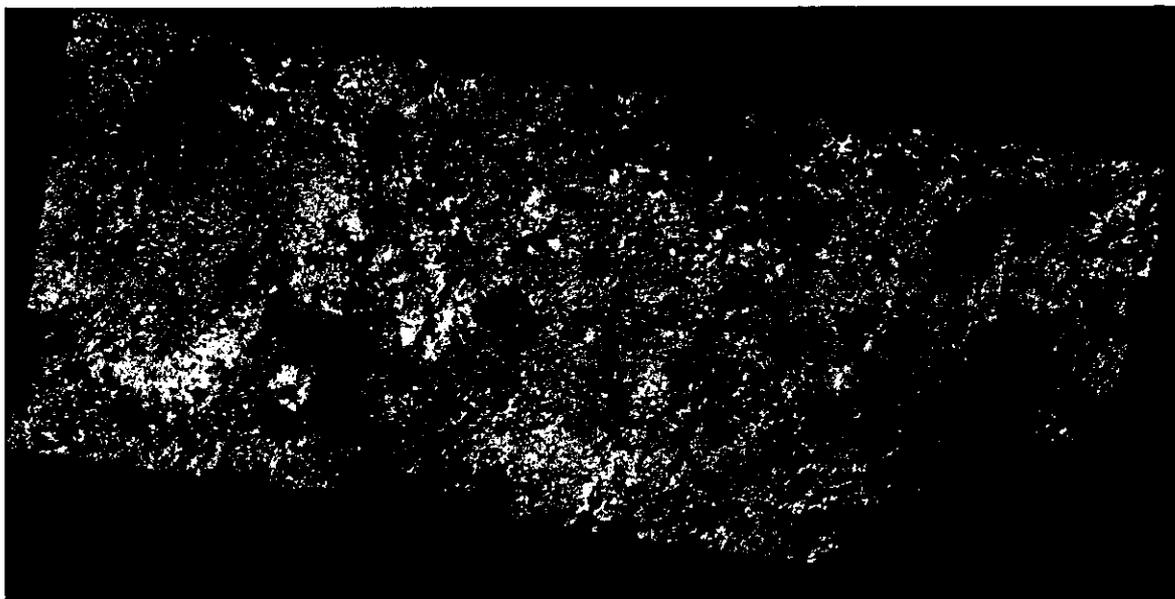


Figura 3.5 .- Imagen con 15 clases, resultado de utilizar el algoritmo de Isoclust de Idrisi.

El método utilizado para el presente trabajo que son los resultados de las bandas sintéticas, han disminuido el efecto de sombra, pero el relieve es tan pronunciado que se generan ambigüedades en la clasificación.

Etapa P

3.1.7 Edición de la imagen para resolver ambigüedades de sombra, mapa temático con 13 clases

La edición es realizada en *Paint Shop Pro*, donde se juntaron clases, en el caso de vegetación de los diferentes tipos de bosques de pino, pino-encino, encino y oyamel esto es, si está del lado de sombra en la ladera húmeda, que es en barlovento se juntaron en una sola clase con las que no están en sombra, es decir con la ladera iluminada de la montaña que es el sotavento donde se encuentra la parte seca; ya que ambas pertenecen a la misma clase; siendo así el mismo objeto espectral. Quedando identificadas 13 clases cada una con un distinto color (figura 3.6). También, se separaron las clases que no pertenecen a vegetación y hizo una sola clase.

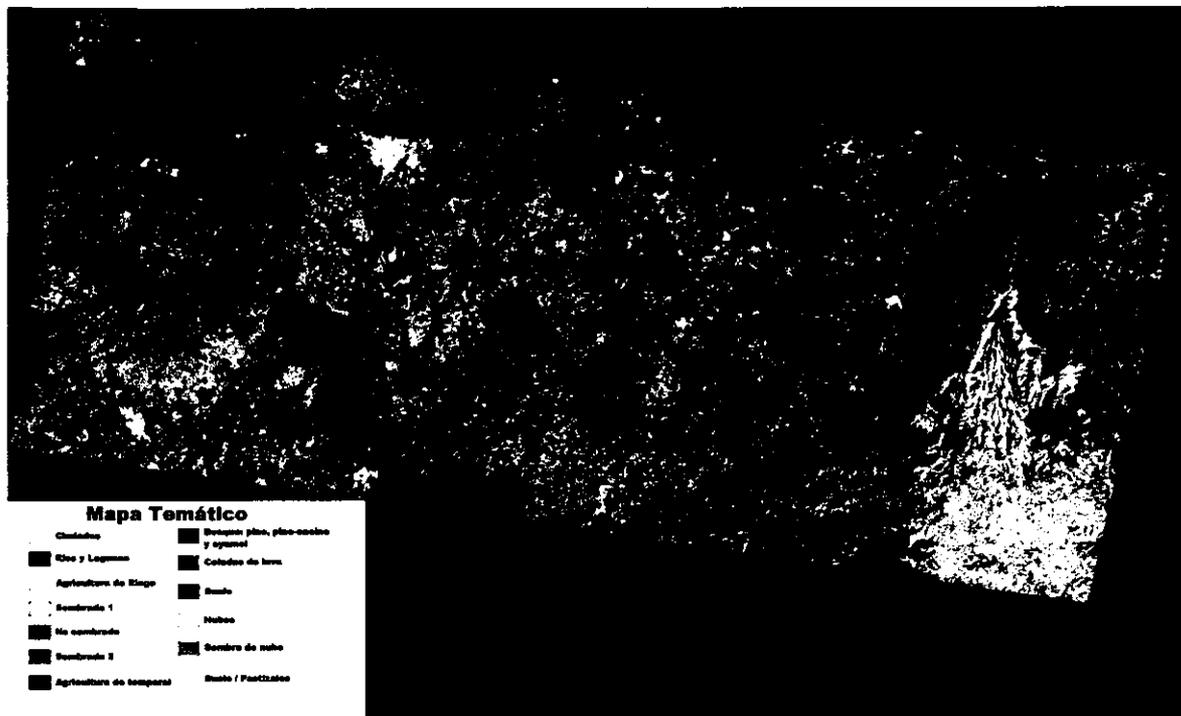


Figura 3.6.- Imagen editada, mapa temático con 13 clases.

El método consiste en separar una clase, en este caso vegetación, del resto de la imagen, para trabajar este problema particular, se requirió de los siguientes elementos: detección, cuantificación y caracterización de la vegetación.

En estas trece clases que se editaron quedaron de la siguiente manera: las ciudades de color violeta, los ríos y lagunas de azul, la agricultura de riego de color rosa claro, la clase de sembrado 1 de color anaranjado, la no sembrado color vino, la sembrado 2 de color rojo, la agricultura de temporal de azul claro, los diferentes tipos de bosques de pino, pino-encino, encino y oyamel de verde olivo, las coladas de lava de café, el suelo de verde, las nubes de color blanco, la sombra de nube de gris y por último el suelo/pastizales de color amarillo.

CAPÍTULO IV

INFORMACIÓN TEMÁTICA

4.1 Modelo Digital del Terreno

Se define un modelo digital del terreno (MDT) como una serie ordenada de números que representa la distribución espacial de las características del terreno. La distribución espacial está representada por un sistemas de coordenadas horizontales xy y por la característica del terreno que se registra como elevación del mismo z , (Doyle, 1987).

Un modelo digital del terreno, es una herramienta para la obtención de las formas topográficas del relieve, ver figura 4.1.

A continuación se abordan algunos aspectos conceptuales, características y utilización de un modelo digital del terreno, tomado de un tutorial hecho por Felicísimo(1997), de la Universidad de Oviedo, España.

El origen del término *Digital Terrain Model* (Modelo Digital del Terreno) se originó en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto Tecnológico de *Massachussetts* por el Prof. Charles L. Miller en la década de los años 50.

Un modelo numérico del terreno o modelo digital del terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De aquí que a este modelo se le llame también Modelo Digital de Elevaciones. Un modelo se construye para conocer o predecir propiedades del objeto real.

Aplicado entonces al terreno real puede describirse de forma genérica como una función:

$$z = \xi(x, y), \text{ donde:}$$

z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y

ξ es una función que relaciona la variable con su localización geográfica.

De forma general, la unidad básica de información en un MDT es un punto acotado, definido como una terna compuesta por un valor de altitud, z , al que acompañan los valores correspondientes de x y y .

La estructuración de un MDT esta dado según dos modelos:

- el modelo de datos vectorial está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.
- el modelo de datos raster está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie.

Los modelos digitales (figura 4.1) del terreno son utilizados para analizar y caracterizar el relieve, dado que los procesos geológicos externos dejan una huella morfológica sobre la superficie.

Se tomaron los modelos digitales del terreno de los siguientes grados: 19103, 19102, 19101, 18103, 18102, 18101 que abarcan 1° x 1°, teniendo una dimensión de 1201 columnas por 1201 renglones.

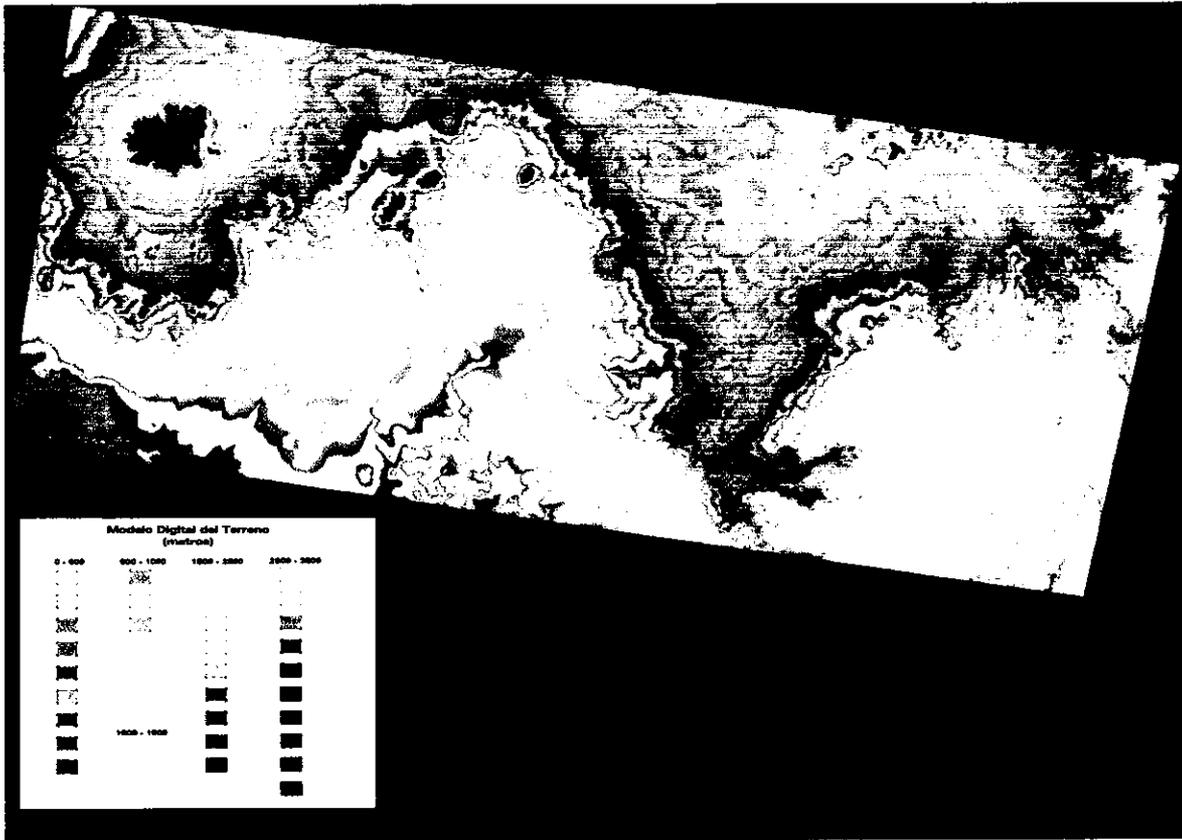


Figura 4.2.- Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio.

4.1.1 Geología

El tipo de geología que está presente en la zona de estudio es de carácter volcánico, la topografía es muy abrupta por los principales factores geológicos que hacen un paisaje característico del vulcanismo en el Sistema Volcánico Transversal. El vulcanismo del Sistema Volcánico Transversal está relacionado con la subducción de la placa de Cocos.

El terreno estructural del Sistema Volcánico Transversal está constituido por una cadena volcánica de edad pliocuaternaria. En esta fase pliocuaternaria es afectada por movimientos extensivos, ocasionados por la inestabilidad sísmica de la actual margen convergente pacífica (Damon et al., 1981).

Para representar estos eventos geológicos, se hizo el mapa temático (figura 4.3) que muestra el tipo de geología para la zona de estudio, se digitizaron las cuatro cartas geológicas hechas por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), y son E13-3, E13-6-9, E14-1 y E14-4, con una escala 1:250,000. La digitización de la información vectorial fue capturada en AutoCad14, para una posterior conversión a formato raster y después sacar el producto final, que es un mapa temático de la geología de la zona de estudio (figura 4.3).



Figura 4.3.- Mapa temático de la Geología de la zona de estudio.

Las diferentes estructuras geológicas presentes en el área seleccionada (figura 4.3), están descritas por nueve clases, que en seguida se describen. En estos párrafos se abordan algunas características de la geología del lugar, tomadas de la Monografía Geológico – Minera del Estado de Michoacán (1995), hecha por el Consejo de Recursos Minerales, México.

Primero comenzaremos con las rocas metamórficas que son, el marmol y esquisto, pertenecientes al período del Jurásico Superior Vulcanosedimentario Metamorfizado, teniendo un grado de metamorfismo que afecta a estas rocas estimado a partir de la presencia de clorita y cuarzo, están identificadas por el color verde.

Las rocas ígneas intrusivas, son del período Cretácico Intrusivo, por lo general tienen una composición granodiorítica; y esta identificadas en el mapa temático de color violeta.

La siguiente estructura geológica son las rocas sedimentarias y volcanosedimentarias, con existencia de conglomerados, datan del período Terciario Superior Continental, y están representadas por el color amarillo en el mapa temático.

Las rocas ígneas extrusivas que conforman esta unidad, presentan una litología de areniscas, conglomerados rojos y limolitas; y es correspondiente al color rojo.

Esta zona que corresponde al color amarillo claro, es del período Cuaternario, formado por depósitos detríticos que son de origen aluvial, se derivan en su gran mayoría de la erosión de las rocas volcánicas, de ahí tenemos el suelo aluvial. Por lo regular estos suelos aluviales se encuentran formando planicies en medio de cuencas endorreicas, formadas por el vulcanismo propio de la zona.

El siguiente conjunto de rocas ígneas extrusivas es el más joven, es del período Cuaternario Volcánico, está constituido por tobas básicas, mesetas de basaltos recientes,

brecha volcánica, coladas andesíticas y dacíticas, domos riolíticos y dacíticos, derrames basálticos asociados con conos de escoria. Fisiográficamente, se le observa como lomeríos de mediana intensidad y conos volcánicos de forma regular. La actividad volcánica más joven se registra por el Paricutín (1943-1952). Esta identificada esta clase por el color café claro.

La siguiente clase de color café oscuro son las rocas ígneas extrusivas, del Terciario Volcánico, presentando una litología de brecha volcánica intermedia, traquita, dacita, andesitas y toba intermedia.

En la siguiente estructura de rocas que son de período Cretácico Superior Volcánico Continental, ha sido descrita como una secuencia de capas rojas compuestas de potentes estratos de andesita y diversos volcanoclásticos, tiene identificado el color rosa en el mapa temático.

Las rocas que conforman el color verde claro de esta unidad, tienen una edad que se estima a principios del Terciario, dentro de los cuerpos intrusivos es posible observar diques dioríticos y dacíticos.

4.1.2 Tipos de clima

Cabe mencionar que algunos de los elementos del clima son: la temperatura, la precipitación, el viento, la presión atmosférica entre otros; estos conllevan a que exista una relación entre factores y elementos del clima, dándose así las clasificaciones climáticas y permitiendo definir los patrones de vegetación dominantes.

Existe una correlación entre los factores climáticos y la vegetación, porque se hace una relación entre las distribuciones de la temperatura y la humedad. Los tipos de clima varían debido a la grandes diferencias altitudinales y al grado de humedad que se presenta tanto en la ladera de barlovento como en la de sotavento.

En invierno la precipitación es muy escasa. También la lluvia aumenta al ascender la altitud de las sierras, de manera que la porción más lluviosa con precipitaciones anuales superiores a 1,200 mm se tiene en el Sistema Volcánico Transversal (García, et al., 1969).

“En lo alto de las montañas, el efecto de la exposición de las laderas puede ser tan extremo que la temperatura mínima del suelo en las laderas al sur puede ser mayor que el máximo de las que se localizan al norte.

La insolación de las laderas, hace que las plantas adaptadas a zonas bajas secas, de clima templado se extienden más arriba en las montañas en aquellas laderas y colinas orientadas de manera que absorben la máxima insolación, y las plantas adaptadas a un medio ambiente húmedo y frío de las altas altitudes alcanzan sus límites inferiores en las cañadas protegidas.” (Daubenmire, 1990).

“La temperatura del aire disminuye cuanto mayor sea la altura sobre el nivel de la superficie terrestre. Debido a este gradiente, o tasa de descenso, las laderas de las montañas que se elevan diagonalmente van atravesando progresivamente los estratos de aire cada vez más fríos”.

En las zonas de topografía montañosas, el fenómeno de inversión de la temperatura aumenta por el hecho de que durante la noche el aire frío de las partes altas de las laderas, al tener mayor densidad que el aire caliente, desciende por las cañadas y las laderas.

En cuanto al tipo de clima que predomina para esta región es el C(w₂)(w), templado subhúmedo con lluvias en verano, el más húmedo en cuanto a humedad. La temperatura promedio anual es de 14.0 °C a 16.4°C y la precipitación pluvial media anual de 1,000 a 1,300 mm. El clima semicálido subhúmedo se localiza en las zonas transicionales (1,500 a 1,900 msnm), de este predomina el subtipo (A)C(w₂)(w), de los semicálidos el más húmedo, con temperatura media anual de 19°C y precipitación pluvial anual de 1,000 a 1,630 mm. La condición semicálida es favorable para la producción frutícola, principalmente del aguacate, aunque se encuentran establecidos también otros cultivos, tales como la caña de azúcar, plátano, café, chirimoya, zarzamora, durazno y varias especies más en huertos mixtos (Escobar et al., 1996).

4.1.3 Vegetación

La vegetación que es representada por pinos, encinos y oyameles ha sido modificada por razones antrópicas, para utilizar el terreno en la agricultura, para elaborar papel y celulosa, para zonas ganaderas, y en algunos casos para zonas habitacionales; y otras muchas áreas han sido taladas y posteriormente invadidas por vegetación secundaria (García, et al., 1969).

La vegetación de un lugar dado esta organizada por: el clima, la geología, el tipo de suelo, entre otros; en este trabajo destacaremos los dos primeros únicamente.

Primero hablaremos de la relación que existe entre clima-vegetación, que tienen sus dos principales componentes, y están dadas por la precipitación y la temperatura; estos a su vez se encuentran influenciados por los vientos y sus patrones generales de circulación.

De aquí deriva la influencia eólica, y se debe a los vientos alisios del noreste que penetran por el Golfo de México, donde se cargan de humedad, y recorren en una dirección NE-SO la República Mexicana. Estos vientos son en principio, muy húmedos, pero van depositando su humedad al chocar con las diferentes barreras orográficas, ya que se elevan, se enfrían y el agua que contiene se condensa, por lo que se precipita, (SEDUE), desarrollando así diferentes mosaicos de vegetación, tanto en la ladera húmeda que es el barlovento y en sotavento que es la ladera seca.

De acuerdo con Daubenmire 1990, la precipitación orográfica se debe a las corrientes de aire que se originan sobre una elevación. Las causas principales de la condensación en este tipo de precipitación: son el enfriamiento y la expansión.

En general la lluvia de este tipo aumenta ascendiendo por las laderas de las montañas sólo hasta una altitud de aproximadamente 3,000 metros más allá, existe una disminución progresiva hacia la cima.

Este fenómeno puede explicarse en parte por la proximidad al agotamiento del contenido de humedad del aire, o por el hecho de que cuanto más elevada sea la altitud, mayor oportunidad tendrán las masas de aire de cruzar las montañas a través de partes bajas sin tener que pasar sobre el punto más alto.

Otro tipo de precipitación es la precipitación convectiva, y se presenta durante el verano al calentarse la superficie de la tierra bajo la fuerte insolación y, por lo tanto, a su vez el estrato inferior se calienta considerablemente. A medida que el aire próximo a la tierra se calienta, su densidad es menor que la de la atmósfera superior, de tal forma que se origina un estado inestable, (Daubenmire, 1990).

En otras palabras, el aire caliente que se encuentra en la superficie de la tierra es más ligero y tiende a subir y el aire que está arriba es más frío pesado y tiende a bajar, por

tanto se encuentran y forman un proceso de circulación convectiva, esto es que se expulsa verticalmente aire caliente a altitudes donde se enfría hasta el punto de condensación originando las lluvias, que son un factor importante para el desarrollo de la vegetación.

De esta manera del otro lado de la sierra, se encuentra que el aire tiene muy poca humedad y que la precipitación es muy baja, lo que nos da un tipo de vegetación distinta en ambas laderas.

En las zonas de topografía montañosa, el fenómeno de inversión de la temperatura aumenta por el hecho de que durante la noche el aire frío de las partes altas de la laderas, al tener mayor densidad que el aire caliente, desciende por las cañadas y las laderas.

Por lo general se considera, que la vegetación de cualquier área es producto del clima de la misma, lo cual implica que los factores climatológicos, primordialmente la temperatura y la humedad, son los que regulan la distribución de la vegetación (Krebs, 1985).

El efecto de la inclinación de la pendiente es importante ya que los escurrimientos en las pendientes escarpadas representa un gran peligro desde el punto de vista de la erosión, por que entre más inclinada esté la ladera, el escurrimiento será mayor.

Es por eso recomendable que no se cultive o se pastoree ganado en pendientes inclinadas, porque aceleran el grado de erosión rápidamente. Lo ideal es que permanezca la vegetación del bosque, pero las condiciones y las necesidades son otras para los agricultores.

También otro factor importante es la estructura vertical o estratificación de la vegetación, debido a que esta disposición vertical en capas se vincula con la disminución en la cantidad de luz recibida. Es indudable que la competencia por la luz es un factor decisivo en la estratificación de los bosques.

La competencia por la luz tiene lugar siempre que una planta o una hoja dan sombra a otra planta u otra hoja, respectivamente, (Krebs, 1985).

La literatura consultada en percepción remota nos dice que la vegetación verde es altamente absorbente en la radiación incidente en el visible, debido a la absorción de los pigmentos de la planta y son altamente reflexivas en el infrarrojo cercano Sellers (1985) ha demostrado que la radiación en el visible y en el infrarrojo cercano son buenos indicadores de la capacidad fotosintética.

Mediante la percepción remota la vegetación en el espectro visible y en el infrarrojo cercano es utilizado para detectar la distribución, el estado y la productividad de las plantas (Buschmann, 1993).

Para la percepción remota el comportamiento de las características de la vegetación las definiremos conforme al comportamiento de la firma espectral de la vegetación (figura 2.28), aquí tenemos las propiedades espectrales de reflectancia de las hojas, donde en la región que comprende de $0.4\mu\text{m}$ a $2.6\mu\text{m}$ se encuentra la función de la respuesta espectral de las características de la vegetación, que son: los pigmentos de la hoja que se encuentran en la región del visible que va de 0.4 a $0.63\mu\text{m}$, la estructura de la celda abarca del infrarrojo cercano que está del 0.76 a $1.23\mu\text{m}$ y el contenido de agua en el infrarrojo medio de 1.4 a $2.6\mu\text{m}$.

Haciendo referencia a la figura 2.28 del capítulo dos, tenemos la respuesta espectral de las características de la vegetación, donde se nos muestra que en la región del visible la pigmentación domina la respuesta de plantas; la clorofila es especialmente importante, en la región del infrarrojo cercano, la reflectancia crece notablemente debido a que las hojas verdes absorben muy poca energía en ella. En la región media del infrarrojo, el agua

absorbe gran cantidad de energía en longitudes de onda particulares, y, debido a que las hojas verdes tienen un alto contenido de humedad, estas bandas de absorción dominan la respuesta espectral en esta región (Swain, 1978).

En función de la metodología utilizada para la presente tesis, se tiene que: con la componente principal 1 [cpe01], el índice de vegetación normalizado [ndvi] y la segunda componente del análisis canónico [verde], son producto de las transformaciones que se desarrollaron en el presente trabajo, ya que son complementarias entre sí. Esto es, debido a que si se requieren hacer estudios de discriminación en cubiertas vegetales únicamente, es mucho mejor y más óptimo el resultado obtenido con un análisis canónico, es decir, que la vegetación ha sido separada espectralmente del resto de los patrones espectrales de la imagen. Mientras que si sólo se utiliza un índice de vegetación normalizado, esto es, una división pixel a pixel entre los niveles digitales en dos bandas de la misma imagen (Chuvieco, 1990), el resultado de discriminación no es satisfactorio.

Por esta razón la metodología utilizada para separar espectralmente coberturas vegetales, es de gran ayuda para este tipo de trabajos.

Por otra parte cabe mencionar que los principales cultivos son el maíz y el aguacate, otros cultivos relevantes son el trigo y algunos forrajeros como la avena, alfalfa y janamargo. En las zonas semicálidas el cultivo de caña de azúcar es importante, así como también el del café.

La zona aguacatera es Uruapan, pero con la introducción del cultivo ha cambiado drásticamente el uso del suelo, al derribar varias hectáreas de bosque para poder establecerlo (Escobar et al., 1996).

La explotación forestal y la problemática forestal es muy compleja, inadecuada para algunas regiones y clandestina para la sobreexplotación del recurso bosque, y esto es debido por el desmonte que tiene la finalidad de ampliar las zonas agrícolas, ganaderas y en algunos casos habitacionales, así como los incendios forestales inducidos o por imprudencias que acaban con este recurso forestal.

Es impactante como en esta región, que es llamada la Sierra Purépecha, se han perdido 190,000 ha de bosque en los últimos veinte años (Escobar et al., 1996).

También es de vital relevancia que las tendencias socioeconómicas que juegan un papel importante en los recursos naturales dentro de los aspectos y problemáticas del país, y en este caso para la región. A continuación se enlistan algunos puntos de la temática forestal y de las actividades agropecuarias, con una problemática regional; y que son tomados de Escobar et al., 1996 de la Universidad Autónoma Chapingo.

-Agotamiento de los recursos naturales, principalmente del suelo y del bosque, con el consiguiente deterioro ecológico.

-Baja productividad agropecuaria y forestal, que repercute en bajos ingresos para los productores.

-Emigración temporal y/o definitiva de la población, debido a la falta de alternativas productivas agropecuarias y baja reutilización de las actuales.

-Ausencia de una agroindustria forestal de enfoque social y bien organizada, que genere empleos y permita la explotación racional de hoy cada vez más escaso recurso forestal.

-Insuficiencia de caminos y de otros servicios en varias comunidades.

Podemos decir de esto que, el manejo forestal y las actividades agrícolas que atañen a esta región van más allá de una buena administración racional del recurso, más bien las políticas implementadas hasta el momento no han sido las adecuadas y esto es por no estar bien respaldadas por métodos científicos; y solo se dan largas a los campesinos y se hace

4.1.4 Unidades del Paisaje Geomorfológico

En las unidades del paisaje geomorfológico el objetivo inmediato es clasificar a los paisajes por las características que presentan mediante unidades homogéneas por su litología o estado dinámico (Bolós, et al. 1992).

La relación que existe entre las unidades geomorfológicas y la cobertura (vegetación y usos actuales) permite segmentar el paisaje (Bocco, et, al. 1996), para representar de esta manera su distribución espacial, la zonificación del relieve o paisaje geomorfológico y formas del relieve, partiendo de las características que posee.

A continuación se detallan las ocho unidades del paisaje geomorfológico (figura 4.4), utilizando la clasificación y el mapa de Regionalización Ecología de Michoacán de Ocampo, hecho por Bocco y colaboradores.

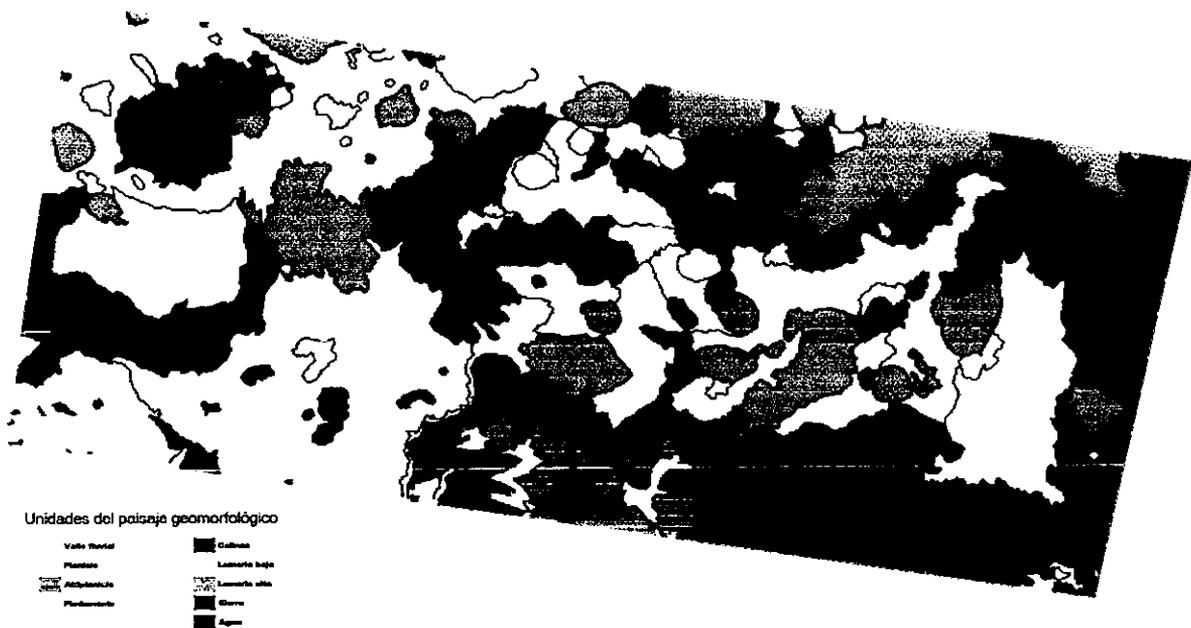


Figura 4.4.- Mapa temático de las Unidades del Paisaje Geomorfológico.

A continuación primero se definirá que es el paisaje geomorfológico: y es, una gran porción del terreno caracterizado por una repetición de relieves similares o una asociación de tipos de relieve disimilares.

Un valle, es la porción de tierra alargada y llana, intercalada entre dos bordes, zonas de relieve alto (piedemonte, plataforma, colina o montaña), generalmente se encuentra drenado por un río. La confluencia de corrientes es frecuente; los paisajes son relativamente planos resultado de la acción fluvial. La pendiente dominante es inferior a 3° y su amplitud puede variar de acuerdo a su extensión longitudinal.

La planicie es una porción del terreno de baja inclinación, amplia y llana con limitada energía del relieve y suaves pendientes inferiores a 3° , con una amplitud en general menor a 100 m, dependiendo de su magnitud.

La Altiplanicie es una porción amplia y llana del terreno relativamente elevada, la cual se encuentra limitada, al menos en un lado por un descenso abrupto (escarpe) hacia las

tierras bajas. Frecuentemente son el resultado del levantamiento tectónico de una planicie previamente formada, subsecuentemente subdividida por la incisión de profundos valles. La superficie topográfica tiene forma aplanada o suavemente ondulada por la erosión fundamentalmente de tipo lineal. Los paisajes son relativamente planos flanqueados por al menos una ladera fuertemente inclinada (altura relativa a partir del rompimiento de la pendiente de la ladera menor a 100 m y pendientes menores a 6°).

El piedemonte es una porción inclinada del terreno al pie de las unidades de paisaje con mayor altura (altiplanicie, montaña), su composición interna es generalmente heterogénea.

Las colinas son elevaciones suaves, con pendientes superiores a 3° y menores a 8° con alturas relativas menores a 250m.

Los lomeríos bajos son elevaciones más abruptas que las del nivel anterior, con alturas relativas mayores a 250 m e inferiores a 500 m, y pendientes que oscilan entre 6° y 20°.

Los lomeríos altos van de elevaciones con alturas relativas mayores a 500 m y menores a 1,000m, con pendientes variables entre 20° y 45°.

La sierra, son elevaciones abruptas con pendientes superiores a los 30° y alturas relativas superiores a los 1,000m, pero menores a 4,000m.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 Resultados

Los resultados obtenidos con la metodología utilizada en la presente tesis, se establecen en función de las propiedades de las bandas canónicas; y son como enseguida se escriben.

Primero se seleccionó un área donde las cubiertas de vegetación estuvieran presentes en la zona de estudio. Se aplicó un análisis en componentes principales a la imagen de tal área, empleando como entrada las bandas 1,2,3,4,5 y 7 de la imagen Micho Landsat TM, no fue incluida la banda 6 debido al tamaño diferente de pixel. Los eigenvectores de la matriz de covarianza derivados de los pixels en el área seleccionada forman un kernel que fue aplicado a la imagen entera, haciendo que el análisis de componentes principales produjera la primera banda canónica.

Después, con el índice de vegetación normalizado (NDVI) derivado de usar las bandas 7 y 4 cuya función presenta la sensibilidad de los cambios en la cobertura vegetal, basándose en la diferencia de reflectancia que la vegetación muestra y evaluar la humedad de la vegetación viva (Hardy y Burgan, 1999).

El índice de vegetación empleado en el presente trabajo se define de acuerdo a la relación abajo escrita:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{banda 7} - \text{banda 4}}{\text{banda 7} + \text{banda 4}}$$

Con el NDVI, se obtiene la segunda banda canónica para esta metodología.

Y por último, la transformación *Kauth – Thomas* fue aplicada a las bandas de la imagen Micho Landsat TM, sólo la banda de verdor fue incluida porque la evolución de las coberturas de vegetación incluye una fase donde el verde de la vegetación alcanza su completa intensidad. Esta banda que representa el verdor es la tercera banda canónica.

De lo anterior, estas tres bandas son descorrelacionadas, en otras palabras, son bandas independientes donde no hay correlación entre una y otra, lo cual por sí mismas no pueden describir el estado de la vegetación; sino que tienen que ser las tres bandas para tener una complementariedad.

Es por eso, que queda demostrado que las coberturas de vegetación están apropiadamente caracterizadas por medio del desarrollo canónico expuesto en este trabajo, porque las características importantes de la vegetación son: a) brillo de la vegetación, b) cantidad de la vegetación y su contenido de agua, y c) absorción de la clorofila.

Con estas tres propiedades de la vegetación representadas por la primera componente principal [C_{Pe01}], el índice de vegetación normalizado [NDVI] y la transformación *Kauth – Thomas* [verde], se hace un RGB de las tres bandas arriba mencionadas, creando una imagen multibanda, para después ser insertada esta imagen en un clasificador espectral no supervisado llamado Isodata generando un mapa temático de tipos de coberturas, e integrar las diferentes capas de información (figura 5.1).

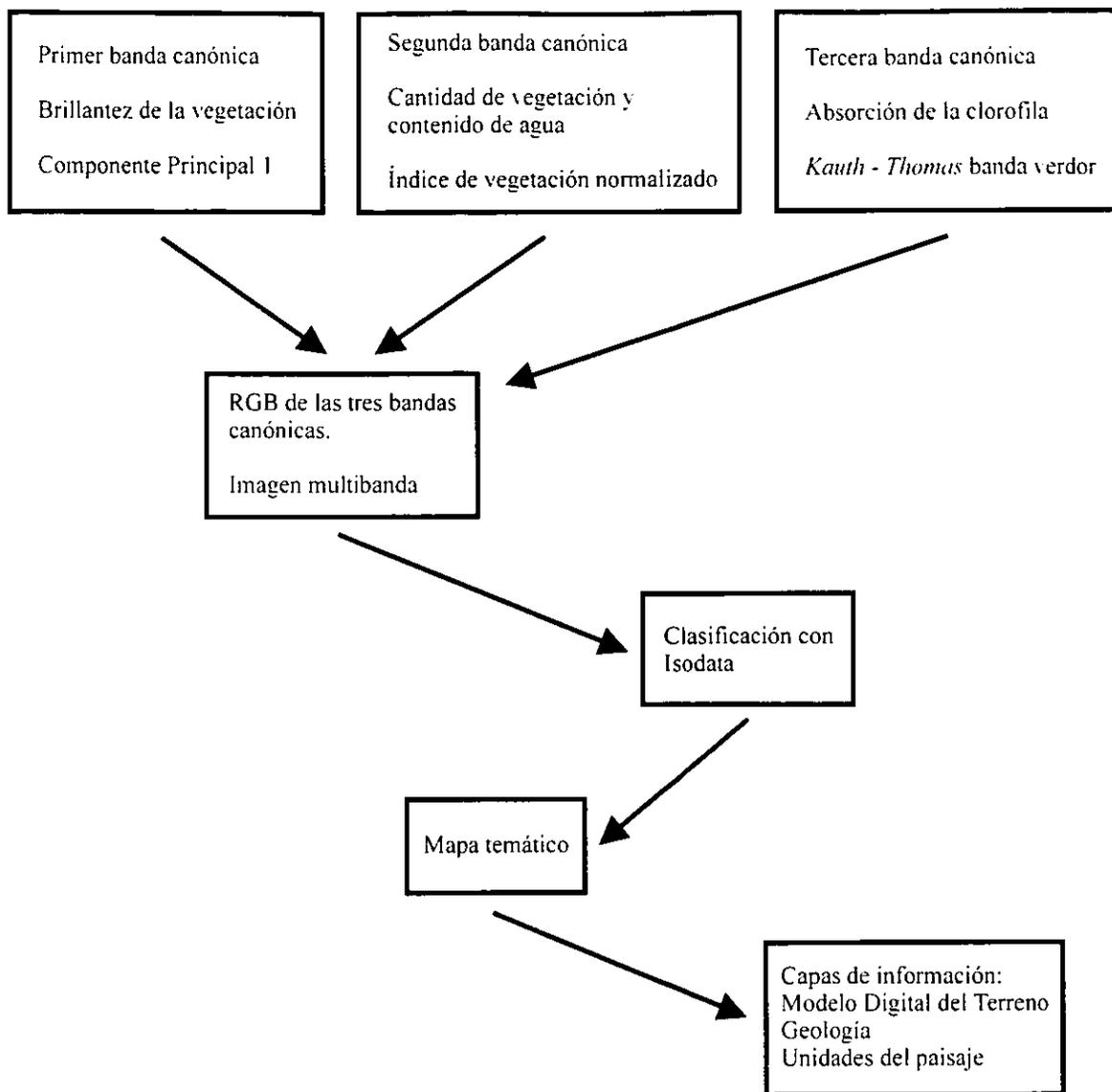


Figura 5.1.- Resultados obtenidos.

5.2 Conclusiones

Las conclusiones de la presente tesis son las siguientes:

-El resultado obtenido con la metodología utilizada nos demuestra que, para hacer estudios de discriminación de coberturas vegetales presentes en una imagen multispectral se tiene un óptimo resultado si se hace un análisis canónico y su implantación por medio de la transformación *Kauth – Thomas*, la descomposición en componentes principales y un índice de vegetación normalizado.

-Mediante el procesamiento digital que se hizo para obtener las tres bandas sintéticas que son la primera componente principal, la transformación *Kauth – Thomas* y el índice de vegetación normalizado, hacen la función de separar la vegetación de tal manera que las

propiedades de la vegetación son separadas espectralmente del resto de los patrones espectrales de la imagen.

-La primera componente principal tiene un 76% de la información de la imagen original, entonces contiene los rasgos más relevantes donde se resalta la brillantez de la vegetación.

-El índice de vegetación normalizado es una división pixel a pixel de los niveles digitales de dos bandas y por si sólo no se hace una buena discriminación de coberturas vegetales.

-El análisis canónico comprueba que si se pretende obtener una máxima separación entre clases espectrales (para este caso vegetación) del resto de la imagen si se cumple.

-La transformación *Kauth – Thomas* es un proceso del análisis canónico diseñado específicamente para estudiar la evolución de la cobertura vegetal presente en una imagen multispectral por lo que realiza una discriminación de cubiertas vegetales para esta zona de estudio.

-La aplicación de estas tres bandas sintéticas es de gran utilidad para la realización de estudios donde se requiere de la discriminación de cubiertas vegetales.

-Existe una complementariedad entre sí mismas de éstas tres bandas sintéticas, ya que si se hace la clasificación con sólo una de ellas los resultados no son óptimos para la separación espectral de la clase vegetación del resto de la imagen.

-La primera componente principal porta información sobre el albedo de la vegetación, la segunda componente de *Kauth – Thomas* contiene información sobre el vigor de la vegetación y el índice de vegetación normalizado lleva información sobre el contenido de humedad de la vegetación. Estas tres bandas sintéticas se complementan entre sí y caracterizan adecuadamente la cubierta vegetal de la zona de estudio.

-Mediante la percepción remota se ha aprendido acerca de las características espectrales de la vegetación, utilizando las transformaciones arriba mencionadas haciéndose el procesamiento digital de la imagen multispectral de la zona de estudio; con esto queda demostrado que la multidisciplinariedad de la Geografía y la Percepción Remota, como una herramienta para conocer más nuestros recursos naturales, mediante la caracterización de cubiertas vegetales, entre otros.

-Y por último, la tesis es útil para estudios de discriminación de cubiertas vegetales, ya que se caracterizan las propiedades principales de la respuesta espectral de la vegetación, que son factores importantes para evaluar los recursos naturales de nuestro país; esto es, mantener actualizada una base de datos, donde los tipos de coberturas de vegetación han sido modificadas por actividades antropogénicas. Estas actividades son una constante modificación del uso de suelo, deforestación, incendios forestales y erosión del suelo. Por consiguiente, el resultado obtenido en este trabajo es una clasificación de los tipos de vegetación, a partir de una escena compleja donde todas las clases de coberturas están entremezcladas.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

Albert, A. (1961). *Algebra Superior*. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, p. 319.

Anguizola R. y Cedeño V.J. (1991). Actualización de mapas topográficos a escala 1:50,000 a partir de Imágenes TM del Satélite Landsat. *Revista Cartográfica*, No. 59, pp. 153 –186.

Antaramian, E. (1988). *Sistema de Información Geográfica de Michoacán*. Tesis de Doctorado, México, p. 215.

Bocco, G., Velázquez, A., Mendoza, M., Torres M.A. y A. (1996). Regionalización Ecológica del Estado de Michoacán de Ocampo, Reporte Técnico. Centro de Ecología – UNAM. Unidad Académica Morelia, p. 95.

Bolós I. Capdelia, M., M. Bovet Pla, X. Estruch-García, R. Pena I. Villa, J. Ribas Vilàs y J. Soler Insa, (1992). *Manual de Ciencia del Paisaje, Teoría Métodos y Aplicaciones*. Masson S.A., Barcelona, p. 273.

Buschmann, C. y Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 4, pp. 711-722.

Consejo de Recursos Minerales, (1995). *Monografía Geológico – Minera del Estado de Michoacán*, México, pp. 18-27.

Correa, P. G. (1974). *Geografía del Estado de Michoacán*, Tomo I , Gobierno del Estado de Michoacán, pp. 454.

Chavira, D. (1996). Evaluación de la Complejidad (heterogeneidad) de una Imagen. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Colegio de Electrónica, BUAP. p. 19.

Damon, P. E., Shafiqullan, M., Clark, K. F., (1981). *Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis*: Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, vol. 5, núm. 2, pp. 223-238.

Daubenmire, R.F. (1990). *Ecología Vegetal: Tratado de Autoecología de Plantas*, Noriega Limusa, México, pp. 203-208.

Doyle, F. (1987). Modelos digitales del terreno: una reseña. *Revista Cartográfica*, No. 51/52, pp. 93-101.

- Erickson, Jon. (1992). *La exploración de la tierra desde el espacio*. Serie McGRAW-HILL de divulgación científica, España, p. 268.
- Escobar, D., Romero, J., Nuñez, M., Vence, J. y Rivera, D. (1996). *Regiones Agrícolas de Michoacán*. Universidad Autónoma de Chapingo. México-Chapingo. pp. 65-70.
- Felicísimo, A. M., (1997). Tutorial: Modelos Digitales de Elevación del Terreno. Universidad de Oviedo, España.
- García, E. y Reyna, T. (1969). Relaciones entre clima y la vegetación en el suroeste de Michoacán. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Vol. II, pp. 59-71.
- Hurcom, S.J., Harrison, A.R. and Taberner, M., (1996). Assessment of biophysical vegetation properties through spectral decomposition techniques. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56, pp. 203-214.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática INEGI, (1980). Cartas topográficas E13-3, E13-6-9, E14-1, E14-4, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática INEGI, (1992). Espaciomapas E13-3, E13-6-9, E14-1, E14-4, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática INEGI, (1980). Cartas Geológicas E13-3, E13-6-9, E14-1, E14-4, escala 1:250,000.
- Krebs, C. (1985). *Ecología: estudio de la distribución y la abundancia*. Harla, México, pp. 95, 460.
- Lira, J. (1987). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*, Fondo de Cultura Económica, México, p. 150.
- Lira, J. (1992). Sistema Personal Interactivo en Percepción Remota. INEGI & IBM. México.
- Lira, J. (1995). *Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes*, Cuadernos del Instituto de Geofísica, UNAM, México, No. 9 pp. 38.
- Lira, J. (2000). *Notas al Curso: Tratamiento Digital de Imágenes*, DEPMI, UNAM.
- Lira, J., García, E. (1999). Characterization of vegetation in the south of México by means of a canonical expansion. *Trabajo presentado en: Pecora 14/Land Satellite Information III Conference: 6 – 10 December the 1999, Denver, Colorado, U.S.A.*
- Maravall, D. y Gómez, Allende. (1994). *Reconocimiento de Formas y Visión Artificial*. Serie Paradigma, Ra-Ma. Colección: Informática, Fundamentos Teóricos.

Mikkola, K. (1996). A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in the Kola Peninsula, Russia. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 18, pp. 3675-3690.

Narasimha, Rao., L. Venkataratnam, Krishna, Rao y K.V. Ramana. (1993). Relation between root zone soil moisture and normalized difference vegetation index of vegetated fields. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 3, pp. 441- 449.

Pastrana, R. (1996). Restauración de Imágenes Digitales: Eliminación de Ruido y por medio de un Filtro Geométrico, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Colegio de Electrónica, BUAP. p. 26.

Richards, J. A. (1986). *Remote Sensing Digital: An Introduction Image Analysis*. Springer-Verlag, Cap. 6, pp. 127-147, Cap. 10, pp. 216-217.

Richards, J. A., Jia, X. (1999). *Remote Sensing Digital: An Introduction Image Analysis*. Springer-Verlag, 3 ed., Cap. 2, p. 56.

Robinson, A. (1984). *Elementos de Cartografía*. España, p. 525.

Rzedowski, J. (1994). *Vegetación de México*. Limusa, México, p. 432.

Sanvicente, H. (1996). Sistema para la Evaluación de Recursos Naturales Mediante Imágenes de Satélite, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería.

SPRING (Sistema de Información Geográfica, 2000), *Tutorial de Geoprocesamiento*, desarrollado por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Brazil.

Swain, P. Y Shirley, D. (1978) *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. McGRAW-HILL. pp. 231-241.

GLOSARIO

Percepción Remota: Es la obtención de información acerca de una superficie o escena, utilizando luz visible e invisible, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por un sensor remoto.

Campo Instantáneo de Vista (CIV): Es una área física sobre la escena, de forma cuadrada generalmente (figura 1.1). Define la resolución espacial, es decir proporciona el grado de detalle que se puede discernir de la escena. El tamaño del CIV depende de la geometría particular paisaje/escena/sensor y de la eficiencia de este último. En resumen, este cuadro define la resolución de la imagen digital.

Pixel: Es la representación numérica o lógica del campo instantáneo de vista y es la medida de la energía promedio que proviene de dicho campo(figura 1.1). Un pixel representa un patrón espectral.

Imagen Digital Multiespectral: Es la representación numérica de la variación espacial de la energía radiante proveniente de la escena, siendo también la representación lógica de una escena, y que en general tiene forma numérica y algunas veces visual. Al conjunto de bandas digitales (cuatro o siete) se les denomina "imagen multiespectral". Una imagen digital multiespectral es una composición de patrones espectrales y espaciales, y junto con la interrelación que tienen éstos, es lo que constituye la estructura de una imagen digital multiespectral.

Firma espectral : Al conjunto de números para cada CIV se les conoce como firma espectral.

Compuesto a color RGB: Un compuesto a color RGB es una representación visual donde se despliegan tres bandas asignando a cada una de ellas los tonos de los colores rojo, verde y azul, generando una composición falso color de tres bandas de la imagen multiespectral.

Análisis en Componentes Principales (PCA): El análisis en componentes principales es una transformación al conjunto de datos que se aplica simultáneamente a todas las bandas que componen la imagen, obteniéndose como resultado una imagen multiespectral con bandas decorrelacionadas. Los componentes principales generan un nuevo conjunto de bandas individuales que representan información no disponible en las bandas originales.

Matriz de covarianza: La matriz de covarianza cuantifica la variación global de los valores de una banda con respecto a otra en un espacio multiespectral, el cual está descrito por vectores, cuyos componentes son las respuestas espectrales individuales en cada banda. La matriz de covarianza es utilizada para generar los componentes principales ya que a partir de su diagonalización se obtienen los eigenvectores que determinan las direcciones de las componentes mencionadas.

Matriz de correlación: La matriz de correlación se obtiene a partir de la matriz de covarianza y representa la correlación global de una banda con respecto a otra. La matriz de correlación permite visualizar el parecido, en porcentaje, de una banda en relación con otra.

Porcentaje de Varianza: Medida de la dispersión de los valores de los pixels.

Eigenvalores: Los eigenvalores proporcionan el grado de información presente en las nuevas bandas producidas por la descomposición en componentes principales.

Eigenvectores: Los eigenvectores representan las direcciones de los ejes de las componentes principales. A los eigenvectores se les llama componentes principales y como los eigenvalores están arreglados de manera decreciente, entonces el contenido de información de la imagen es redistribuido entre estas componentes (o direcciones principales), de manera que la mayor información está concentrada en las primeras componentes o bandas de la imagen de salida, mientras que en las restantes se tiene muy poca información y prácticamente todo el ruido.

Kernel: El kernel es el operador matricial que define una transformación a la imagen. Específicamente, en el caso de la vegetación, se generó un kernel para resaltar la vegetación por medio de la transformación *Kauth – Thomas*.

Índice de Vegetación Normalizado (NDVI): El índice de vegetación normalizado es un cociente de bandas para resaltar el contenido de humedad de la vegetación y para atenuar factores tales como suelo, iluminación, atmósfera, etc.

El NDVI es utilizado para evaluar la humedad de la vegetación viva (Hardy y Burgan, 1999).

Un índice de vegetación presenta la sensibilidad de los cambios en la cobertura vegetal, basándose en la diferencia de reflectancia que la vegetación muestra:

$$NDVI = \frac{banda_j - banda_i}{banda_j + banda_i}$$

Análisis Canónico: El análisis canónico en percepción remota es la reducción y la selección de características espectrales, así como el resultado de las clases frecuentemente distribuidas en la dirección de la información máxima esparcida. Esto es particularmente para tipos de cobertura espectralmente similares (Richards, 1986).

En esta transformación se pretende obtener una máxima separación entre clases espectrales predefinidas. De lo anterior podemos decir que el objetivo principal del análisis canónico es: que las clases espectrales definidas estén lo más compactas posibles, es decir con la dispersión espectral mínima; y una máxima separación espectral entre ellas, es decir una máxima desviación estándar entre clases.

Transformación *Kauth-Thomas*: La transformación *Kauth – Thomas* es un proceso de análisis canónico diseñado especialmente para estudiar la evolución de la cobertura vegetal presente en una imagen multiespectral.

Esta transformación nos demuestra que teniendo una subregión de una cobertura vegetal ésta puede ser evaluada en relación con la evolución y tipo de cultivos presentes en la imagen multiespectral.

En la transformación *Kauth – Thomas* se generan tres imágenes de salida que son: la primera componente llamada brillo (*brighthness*), que es la brillantez del suelo, la segunda componente que es el verdor, utilizada para este trabajo de investigación (*greenness*), que es

la intensidad del verdor o de la biomasa de la vegetación, y la tercera es la amarillez o humedad (*yellowness*), que es la humedad del suelo.

Clasificación con el algoritmo Isodata: Es un clasificador no supervisado. La clasificación es la asignación o agrupación de los datos espectrales (pixels) contenidos en la imagen, a una de un conjunto de clases espectrales definidas.

En una clasificación no supervisada, las identidades de los tipos de cobertura a ser especificadas como clases dentro de una escena generalmente no son conocidas a priori, porque se carece de un trabajo de campo o los rasgos de la superficie en la imagen no están bien definidos (Sanvicente, 1996).



FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA

INFRAESTRUCTURA

La infraestructura con que cuenta el Laboratorio de Percepción Remota (LabPr) del Instituto de Geofísica, UNAM, es la siguiente:

Estación de Trabajo Sun ULTRA 10, con 512 MB RAM, 9GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM, drive de 3.5", monitor de 17" y tarjeta aceleradora gráfica de 24 bits.

Una PC Pentium DELL III, 700Mhz, con 128MB RAM, 34.9 GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM R/W, unidad DVD, Drive de 3.5", Monitor 17", tarjeta de 32 MB en Video RAM.

Una PC Pentium DELL III, 500Mhz, con 128MB RAM, 19.0 GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM R/W, unidad DVD, Drive de 3.5", Monitor 17", tarjeta de 32 MB en Video RAM.

Una PC Pentium DELL III, 500Mhz, con 128MB RAM, 12.7 GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM R/W, unidad DVD, Drive de 3.5", Monitor 17", tarjeta de 32 MB en Video RAM.

Una PC Pentium DELL III, 700Mhz, con 128MB RAM, 26.5 GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM R/W, unidad DVD, Drive de 3.5", Monitor 17", tarjeta de 32 MB en Video RAM.

Una PC Pentium DELL III, 700Mhz, con 128MB RAM, 27.9 GB de memoria en disco duro, unidad de CD-ROM R/W, unidad DVD, Drive de 3.5", Monitor 17", tarjeta de 32 MB en Video RAM.

Un Scanner HP ScanJet 6300C.

Una impresora HP DeskJet 970Cxi, a color.

Una impresora LaserJet 2100.

Una impresora Epson Stylus a Color 800, calidad fotográfica.

Una impresora Photo Smart HP, de calidad fotográfica.

Paquete *Idrisi for Windows*, versión 3.2, como Sistema de Información Geográfica y Percepción Remota.

Paquete de Tratamiento Digital de Imágenes ENVI 3.2

Paquete de Tratamiento Digital de Imágenes SANDI 3.0

Diversas utilerías de apoyo tales como *Paint Shop Pro 6.02*, *Corel Draw 9*, *AutoCad 2000* y *Office 2000*.

Diversos compiladores como *DELPHI 4*, *Matlab 5.2*

Extensa biblioteca especializada en procesamiento digital de imágenes.