

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**REVISIÓN GEOLÓGICA UTILIZANDO SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA ENTRE LA SIERRA DE LOS
MOTILONES Y JUAN MANUEL DE AGUAS CLARAS, ZONA SUR
DE LA SIERRA DE PERIJÁ**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Alvarez P., Oliver J.
Gutiérrez E., Gerler J.
Para optar al Título de
Ingeniero Geólogo

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

REVISIÓN GEOLÓGICA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA ENTRE LA SIERRA DE LOS MOTILONES Y JUAN MANUEL DE AGUAS CLARAS, ZONA SUR DE LA SIERRA DE PERIJÁ

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ricardo Alezones

COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Mauricio Hernández

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Alvarez P., Oliver J.
Gutiérrez E., Gerler J.
Para optar al Título de
Ingeniero Geólogo

Caracas, 2008

Caracas, 27 de Mayo de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Gerler Gutiérrez y Oliver Alvarez, titulado:

**“REVISIÓN GEOLÓGICA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA ENTRE LA SIERRA DE LOS MOTILONES Y JUAN MANUEL
DE AGUAS CLARAS, ZONA SUR DE LA SIERRA DE PERIJÁ”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Orlando Cabrera
Jurado

Prof. Enrique Toribio
Jurado

Prof. Ricardo Alezones
Tutor Académico

Prof. Mauricio Hernández
Cotutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela y la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería, por darnos la oportunidad de formarnos académicamente.

Al Profesor Ricardo Alezones, Tutor Académico, por prestarnos parte de su valioso tiempo y facilitarnos ayuda y orientación en la elaboración de este trabajo.

Al Profesor Mauricio Hernández, Cotutor Académico, por su constante ayuda, orientación y aportes de significativa importancia en el desarrollo de este trabajo.

A la Sra. Morela y al resto del personal de la Biblioteca de la Escuela, por facilitarnos información que forma parte de este trabajo.

Al Profesor Rafael Ruano, de la Escuela de Geografía de la UCV, por su tiempo y asesoramiento dado.

A Enzo Carballo, por su asesoría en consultas realizadas para la digitalización del mapa.

A Lilibel De Ponte y Yulimar Millán, quienes nos brindaron una muy valiosa ayuda en la formación de este proyecto.

A Gerardo Jaimes y Joao Caires, con quienes realizamos en conjunto toda la extensa etapa de procesamiento de las imágenes.

A la familia Caires (familia de Joao), por permitirnos usar su casa como lugar de reuniones entre los grupos que trabajamos en este proyecto.

A los panas Julio, Lesme, William, Darwin, Andrés, Keyllys, Rafael, Kristal, Alexis y Luís, quienes también trabajan en parte del mismo proyecto, y nos prestaron una importante ayuda.

Al pana Ofni Suárez, del Instituto Tecnológico, Coordinación de Extensión de la FIUCV por su gran ayuda en la logística de la presentación.

Y en especial a nuestras familias, Padres y Hermanos, por su invaluable apoyo y ayuda incondicional durante nuestros años de formación profesional.

A todos ellos...

GRACIAS.

Todo está en los reflejos.

Jack Burton

**Alvarez P., Oliver J.
Gutiérrez E., Gerler J.**

**REVISIÓN GEOLÓGICA UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA ENTRE LA SIERRA DE LOS MOTILONES Y JUAN MANUEL
DE AGUAS CLARAS, ZONA SUR DE LA SIERRA DE PERIJÁ**

Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones. Cotutor Académico: Prof. Mauricio Hernández. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica. Año 2008, 169 p.

Palabras Claves: Sierra de Perijá, Mapa Geológico zona suroccidental de la Sierra de Perijá, Percepción Remota, Procesamiento de Imágenes Satelitales.

Resumen. El siguiente trabajo tuvo como objetivo generar un mapa geológico actualizado de la zona suroeste de la Sierra de Perijá, mediante la recopilación e integración de trabajos previos consultados, información geológica superficial y la interpretación de datos obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales (Landsat 7 ETM).

Se utilizaron los paquetes informáticos ENVI[®] 4.2 y ERDAS IMAGINE[®] 8.5 para la etapa de procesamiento de las imágenes multiespectrales. Además se utilizó el paquete ArcGIS[®] 9.1 para la digitalización del mapa final.

Productos del procesamiento de las imágenes multiespectrales, como combinaciones de bandas en cañones RGB, clasificaciones Supervisada y No Supervisada e interpretación de firmas espectrales mostraron información valiosa para la etapa de interpretación de la geología de la zona de estudio.

En el mapa final se proponen posibles contactos entre unidades de rocas de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y Cretácico Inferior, y entre unidades de rocas de edad Eoceno-Oligoceno y rocas de edad Oligoceno-Mioceno. Además se actualizó la posición geográfica del cauce Río de Oro ubicado en la zona limítrofe con Colombia.

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I	
1.1. Introducción	1
1.2. Localización y extensión del área de estudio	1
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Metodología	3
1.4.1. Etapa Compilatoria	3
1.4.2. Etapa de Oficina	3
1.5. Antecedentes	4
CAPÍTULO II	
2. Geología Regional	8
2.1. Geología Estructural	8
2.1.1. Tectónica Regional	9
2.2. Estratigrafía Regional	13
CAPÍTULO III	
3. Fundamentos de Percepción Remota	37
3.1. Conceptos Generales	37
3.2. Breve historia de la Percepción Remota	39
3.2.1. Landsat, el barredor Multiespectral (MSS)	41
3.2.2. Spot y otros sistemas de Percepción Remota Satelital	43
3.3. Principios Básicos de la Percepción Remota	44
3.3.1. Fuentes de Energía en Percepción Remota	45
3.3.2. Interacción de la Energía Incidente con la atmósfera de la Tierra	46
3.3.3. Interacción de la Energía Incidente y los Elementos de la superficie de la Tierra	48
3.3.4. Reflectancia Espectral (Firmas Espectrales)	49
3.3.5. Sistemas de Percepción Remota	52
CAPÍTULO IV	
4.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales	56
4.1.1. Datos en Percepción Remota	57

4.1.2. Formato de Imágenes Satelitales	58
4.1.3. Almacenamiento	59
4.1.4. Sistemas de Procesamiento de Imágenes	60
4.2. Preprocesamiento de Imágenes Satelitales	61
4.2.1. Correcciones Radiométricas	61
4.2.1.1. Calibración de la Radiancia	62
4.2.1.2. Efectos Atmosféricos	62
4.2.1.3. Efectos de Ruido	63
4.2.2. Correcciones Geométricas.	63
4.3. Realce Visual, Despliegue a Color de una Imagen	64
4.3.1. Composición a Color	64
4.3.2. Despliegue del Pseudo Color	65
4.4. Transformaciones Especiales de Imágenes Satelitales	66
4.4.1. Operaciones entre Bandas	66
4.5. Extracción de Información	67
4.5.1. Clasificación Supervisada	68
4.5.2. Clasificación No Supervisada	68
4.5.3. Métodos Mixtos	68
CAPÍTULO V	
5. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	70
5.1. ArcGIS® 9.1	70
5.1.1 Características	70
5.2. ENVI® 4.2	74
5.3. ERDAS IMAGINE® 8.5	76
CAPÍTULO VI	
6.1. Metodología de Manejo de Imágenes Landsat 7 ETM	78
Corrección de Radiancia	78
Fusión de Bandas	81
Conversión a Formato BIL	83
Corrección Atmosférica (FLAASH)	85
Corrección de la Fracción Mínima de Ruido (MNF)	91
1. Conversión TIF a IMG.	91
2. Unión de Imágenes IMG	92
3. Creación del Archivo Shapefile en ArcGIS® 9.1	93

4. Construcción de la Mascara	96
5. Corrección MNF	104
Índice de Pureza de Píxel (PPI)	107
Visualizador N Dimensional	109
1. Distribución en rangos de PPI seleccionados y su cantidad de píxeles	109
2. Conversión PPI a ROI	111
3. Visualizador N Dimensional	115
4. Spectral Angle Mapper	120
Clasificación No Supervisada	123
1. Conversión del archivo FLAASH a IMG	123
2. Unión de Imágenes	125
3. Clasificación No Supervisada	126
Clasificación Supervisada	129
6.2. Elaboración del Mapa	133
CAPÍTULO VI	
7. Interpretación de Imágenes	136
CONCLUSIONES	161
RECOMENDACIONES	163
BIBLIOGRAFÍA	164

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1-1. Zona en Estudio. Modificado a partir de la Hoja 5543 RÍO INTERMEDIO, VENEZUELA (1973), la Hoja 5643 RÍO INTERMEDIO, VENEZUELA (1973), de Dirección de cartografía Nacional y http://www.igvsb.gov.ve/site2007/images/Zulia.jpg .	2
Figura 2-1. Mapa estructural del NO de Sur América. Modificado de Castrillo <i>et al.</i> (s.f.).	8
Figura 2-2. Mapa tectónico simplificado de la cuenca de Maracaibo. Modificado de González (1998).	12
Figura 2-3. Carta cronoestratigráfica del Paleozoico en Perijá. Modificado de González (1998).	15
Figura 2-4. Situación tectónica para el Jurásico en Venezuela. Modificado de González (1998).	17
Figura 2-5. Carta cronoestratigráfica del Jurásico en Perijá. Modificado de González (1998).	17
Figura 2-6. Carta cronoestratigráfica de la Sierra de Perijá y del Lago de Maracaibo, donde se muestran las distintas formaciones, así como su ubicación en las distintas secuencias depositacionales. Modificado de González (1998).	20
Figura 2-7. Situación tectónica para el Cretácico Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998).	21
Figura 2-8. Paleogeografía para el Aptiense en Venezuela. Modificado de González (1998).	22
Figura 2-9. Paleogeografía del tope de Cenomaniense Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998).	24
Figura 2-10. Paleogeografía para el Cenomaniense Tardío – Campaniense Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998).	24
Figura 2-11. Situación tectónica para el Cretácico Tardío - Paleoceno en Venezuela. Modificado de González (1998).	25
Figura 2-12. Paleogeografía para el Campaniense Tardío – Maastrichtiense en Venezuela. Modificado de González (1998).	27
Figura 2-13. Situación tectónica para el Paleoceno Tardío – Eoceno Medio en Venezuela. Modificado de González (1998).	28
Figura 2-14. Paleogeografía para el Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998).	30
Figura 2-15. Paleogeografía para el Eoceno Medio en Venezuela. Modificado de González (1998).	32
Figura 2-16. Paleogeografía para el Eoceno Tardío - Oligoceno en Venezuela. Modificado de González (1998).	35
Figura 3-1. Proceso de la percepción remota. Modificado de: http://img145.imageshack.us /img145/1962/beidou1dw.gif .	38
Figura 3-2. Cohete V-2 e imagen tomada por el mismo. Modificado de: http://www.v2rocket.com .	40
Figura 3-3. Primera fotografía multispectral del sur de California, tomada por la misión Apolo 9 en 1968. Se observan tres fotos en filtro blanco y negro, tomadas en las bandas foto1-verde, foto2-rojo, foto3-bandas del IR, y foto4-falso color de IR generada por la combinación de las bandas 1,2 y 3. Tomado de: http://www.gisdevelopment.net/technology/rs/techrs26pf.htm .	41
Figura 3-4. Satélite Landsat 7. Tomado de: http://library01.gsfc.nasa.gov/gdprojs/images/landsat7.jpg .	42

Figura 3-5. Regiones del espectro electromagnético para las bandas del Landsat 7. Modificado de: http://landsat.gsfc.nasa.gov/education/compositor/graphics/spectrum_chrt.jpg .	43
Figura 3-6. Rangos del espectro electromagnético. Modificado de: http://www.um.es/geograf/sig/teledet/imagenes/spectrum.gif .	45
Figura 3-7. Ventanas atmosféricas. Modificado de: http://www.eduspace.esa.int/subtopic/images/07-atmosvindue.gif .	47
Figura 3-8. Interacción de la radiación con los elementos de la superficie terrestre.	48
Figura 3-9. Firma espectral para distintos tipos de cubiertas Tomado de: http://fanpaulieb.blogspot.com/ .	50
Figura 3-10. Firma espectral para vegetación. Modificado de: http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm .	51
Figura 3-11. Orbitas satelitales. Tomado de: http://www.inta.es/descubreAprende/imagenes/Fotos/OrbitasSatelites.gif .	53
Figura 3-12. Comparación entre resolución de 2bits y 8 bits. Modificado de: http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/ciaf/TutorialSIG_2005_26_02/paginas/ctr_prsistemasensor.htm .	54
Figura 4-1. Componentes de una imagen digital. Modificado de Alzate 2001.	58
Figura 4-2. Formato de almacenamiento digital de imágenes.	59
Figura 4-3. Composición de color de imagen Landsat 7 ETM de El Cairo, Egipto, donde se observan combinaciones para: <i>A color verdadero, B y C composición en falso color</i> . Modificado de: http://www.eduspace.esa.int/eduspace/subdocument/default.asp?document=521&language=es	65
Figura 5-1. Aplicación ArcMap de ArGIS.	72
Figura 5-2. Aplicación ArcCatalog de ArGIS.	73
Figura 5-3. Herramientas del ArcToolbox de ArcGIS.	74
Figura 5-4. Grupo de visualización. A (ventana principal), B (ventana de scroll) y C (ventana de zoom).	76
Figura 6-1.	79
Figura 6-2.	79
Figura 6-3.	80
Figura 6-4.	81
Figura 6-5.	82
Figura 6-6.	82
Figura 6-7.	83
Figura 6-8.	83
Figura 6-9.	84
Figura 6-10.	84
Figura 6-11.	85
Figura 6-12.	86
Figura 6-13.	87
Figura 6-14.	87
Figura 6-15.	88
Figura 6-16.	88
Figura 6-17.	89
Figura 6-18.	90
Figura 6-19.	90
Figura 6-20.	92
Figura 6-21.	92

Figura 6-22.	93
Figura 6-23.	94
Figura 6-24.	94
Figura 6-25.	95
Figura 6-26.	95
Figura 6-27.	96
Figura 6-28.	97
Figura 6-29.	97
Figura 6-30.	98
Figura 6-31.	99
Figura 6-32.	100
Figura 6-33.	100
Figura 6-34.	101
Figura 6-35.	102
Figura 6-36.	103
Figura 6-37.	103
Figura 6-38.	104
Figura 6-39.	105
Figura 6-40.	105
Figura 6-41.	106
Figura 6-42.	106
Figura 6-43.	107
Figura 6-44.	108
Figura 6-45.	108
Figura 6-46.	109
Figura 6-47.	110
Figura 6-48.	110
Figura 6-49.	111
Figura 6-50.	112
Figura 6-51.	112
Figura 6-52.	113
Figura 6-53.	113
Figura 6-54.	114
Figura 6-55.	114
Figura 6-56.	115
Figura 6-57.	116
Figura 6-58.	116
Figura 6-59.	117
Figura 6-60.	117
Figura 6-61.	118
Figura 6-62.	119
Figura 6-63.	119
Figura 6-64.	120
Figura 6-65.	120
Figura 6-66.	121
Figura 6-67.	121
Figura 6-68.	122
Figura 6-69.	122
Figura 6-70.	123
Figura 6-71.	124

Figura 6-72.	. . . . .	124
Figura 6-73.	. . . . .	125
Figura 6-74.	. . . . .	126
Figura 6-75.	. . . . .	126
Figura 6-76.	. . . . .	127
Figura 6-77.	. . . . .	127
Figura 6-78.	. . . . .	128
Figura 6-79.	. . . . .	128
Figura 6-80.	. . . . .	129
Figura 6-81.	. . . . .	129
Figura 6-82.	. . . . .	130
Figura 6-83.	. . . . .	131
Figura 6-84.	. . . . .	131
Figura 6-85.	. . . . .	132
Figura 6-86.	. . . . .	132
Figura 6-87.	. . . . .	133
Figura 6-88.	. . . . .	133
Figura 6-89.	. . . . .	134
Figura 6-90.	. . . . .	135
Figura 6-91	. . . . .	135
Figura 7-1.	Parte de la imagen resultado de la corrección MNF	136
Figura 7-2.	Parte de la imagen resultado de la corrección PPI	137
Figura 7-3.	Figura que muestra en colores las clasificaciones representadas en parte de la imagen y debajo una tabla con la interpretación realizada a cada clase.	138
Figura 7-4.	Figura que muestra en colores las clasificaciones representadas en parte de la imagen y debajo una tabla con la descripción asignada a cada clase de la que se disponía de información.	139
Figura 7-5.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB135.	142
Figura 7-6.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB354.	143
Figura 7-7.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB357.	144
Figura 7-8.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB432.	145
Figura 7-9.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB453.	146
Figura 7-10.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB534.	147
Figura 7-11.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB543.	148
Figura 7-12.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB752.	149
Figura 7-13.	Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB754.	150
Figura 7-14.	Figura que muestra parte de la imagen donde se realizó la operación entre bandas R:(banda5/banda3) G:(banda4/banda7) B:(banda2/banda4).	151
Figura 7-15.	Figura que muestra parte de la imagen donde se realizó la operación entre bandas R:(banda3/banda5) G:(banda5/banda7) B:(banda7/banda4).	151
Figura 7-16.	Figura que muestra en la parte superior el resultado de la combinación R: 3,G: 1 y B: una de las clases SAM y en la parte inferior la combinación R: 6, G:3 y B: otra de las clases SAM.	152
Figura 7-17.	Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos tres puntos (clases), y se aprecia una diferencia entre los valores de reflectancia en las gráficas, entre la clase 1 con las clases 2 y 3, teniendo estos dos últimos valores iguales, lo que pudiese interpretarse como: las clases 2 y 3 pertenecen a una formación con características diferentes de la clase 1.	153

Figura 7-18. Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos seis puntos (clases), y se aprecia que las clases 1,2,3 y 4 muestran valores de reflectancia similares en la gráfica, y diferentes a los valores de las clases 5 y 6, teniendo estos dos últimos valores muy similares. Además muestra un segmento en color verde que pudiese representar una separación entre estas clases, indicando un posible contacto entre dos formaciones.	154
Figura 7-19. Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos seis puntos (clases), y se aprecia que las clase 1,2 y 4 muestran valores de reflectancia similares en la gráfica, y diferentes a los valores de las clases 3, 5 y 6, teniendo estos tres últimos valores muy similares.	154
Figura 7-20. Figura que muestra dos polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos dos polígonos identificados como Class1 y Class2.	155
Figura 7-21. Figura que muestra en composición los mapas consultados y el mapa generado con el procesamiento e interpretación de las imágenes Landsat 7 ETM. Mapa A: Bellizia <i>et al.</i> , B: Urbani <i>et al.</i> , C: Duerto <i>et al.</i> (parte este de la zona Mostrada en los otros mapas) y D: Mapa producto de este trabajo. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:1.000.000.	156
Figura 7-22. Figura que muestra el contacto entre las unidades de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y Cretácico Inferior en los mapas A: Bellizia <i>et al.</i> , B: Urbani <i>et al.</i> , y el propuesto en este trabajo (C), el cual difiere de los anteriores. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:300.000.	156
Figura 7-23. Figura que muestra en composición RGB752 la sección de la imagen donde se encuentra el contacto propuesto, marcado en líneas negras, entre las unidades Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y Cretácico Inferior, donde se puede apreciar la diferencia visual entre ambas unidades. La sección de la imagen se muestra a escala 1:300.000.	157
Figura 7-24. Figura que muestra dos polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales, mostrando la diferencia en valores de reflectancia para estos dos polígonos identificados como Class 1 y Class2.	157
Figura 7-25. Figura que muestra varios polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales donde se aprecia una diferencia entre los valores de reflectancia en las gráficas. Estos valores se pueden concentrar en dos grupos, uno que contiene a los polígonos Class 1,2 y 3 y otro que contiene a los polígonos Class 4 y 5. Esto pudiese interpretarse como dos grupos pertenecientes a formaciones de características litológicas distinta.	158
Figura 7-26. Figura que muestra el contactos entre rocas de edades comprendidas desde el Eoceno hasta el Mioceno en los mapas A: Bellizia <i>et al.</i> , B: Urbani <i>et al.</i> , C: Duerto <i>et al.</i> y D: Mapa producto de este trabajo. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:750.000.	159
Figura 7-27. Figura que muestra el cambio de curso en una sección de Río de Oro. A la izquierda se observa la posición del cauce para el año 1973 (carta topográfica) y a la derecha el cauce actual en la imagen satelital.	160

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

Perijá es un área en Venezuela de difícil acceso y alto riesgo tanto humano (guerrilla, paramilitares, narcotráfico, etc.). Debido a esto se ha planteado la necesidad de emplear el estudio con imágenes satelitales multiespectrales para la actualización de los mapas geológicos existentes.

El objetivo general de este estudio es el de generar un mapa geológico actualizado de la zona suroeste de la Sierra de Perijá, mediante la recopilación e integración de trabajos previos consultados, información geológica superficial y la interpretación de datos obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales (Landsat 7 ETM).

Pocos estudios geológicos realizados en diferentes zonas del país emplean las imágenes satelitales (multiespectrales) como herramienta, a pesar de su alta versatilidad en este tipo de estudios. Por esta razón se emplearán y aprovecharán las imágenes satelitales como una importante fuente de información de datos geológicos, los cuales al ser interpretados y procesados permitirán crear un mapa geológico actualizado de la Sierra de Perijá, cuya ubicación corresponde con un área geográfica de difícil acceso y por ende poco explorada y estudiada.

1.2. Localización y extensión del Área de Estudio

La zona de estudio se localiza hacia la parte suroccidental de la Sierra de Perijá y comprende las siguientes coordenadas: longitud ($72^{\circ}30'$ - $73^{\circ}23'$) y latitud ($9^{\circ}00'$ - $9^{\circ}20'$), entre la Sierra de Los Mutilones y Juan Manuel de Aguas Claras, tal como se muestra en la figura siguiente (Figura 1-1), y comprende una extensión de 2100 km^2 aproximadamente.

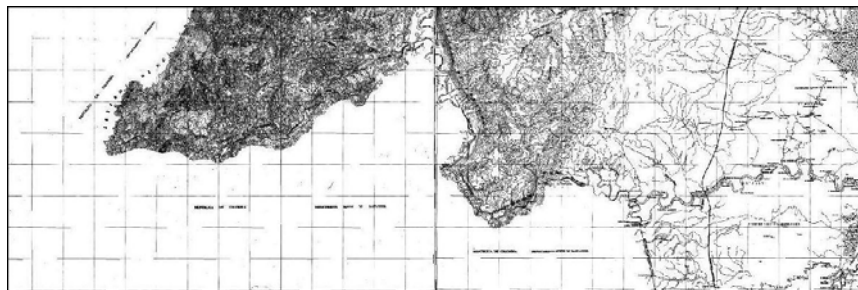


Figura 1-1. Zona en estudio. Modificado de las Hojas 5543 RÍO INTERMEDIO, VENEZUELA (1973), 5643 RÍO INTERMEDIO, VENEZUELA (1973), del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar y la página web: <http://www.igvsb.gov.ve/site2007/images/Zulia.jpg>

1.3. Objetivos Específicos

- Realizar el procesamiento de las imágenes satelitales *Landsat 7 ETM* P008R054 y P007R054 y con ello generar una metodología bien detallada del procesamiento de las imágenes satelitales.
- Determinar lineaciones y estructuras a través de la interpretación de las imágenes satelitales *Landsat 7 ETM* empleadas.
- Determinar unidades espectrales y realizar una asociación litológica a través de las diferentes combinaciones y cocientes de bandas, de las imágenes *Landsat 7 ETM* empleadas.

- Realizar la clasificación supervisada y no supervisada a las imágenes *Landsat 7 ETM* empleadas, para realzar características geológicas en la zona
- Revisión de mapas geológicos existentes e la zona, para comparar con la información interpretada en las imágenes *Landsat 7 ETM* empleadas.
- Generar un mapa geológico digitalizado de la zona de estudio bajo la plataforma ArcGIS.

1.4. Metodología

El trabajo se realizó cumpliendo con las actividades contenidas dentro de las siguientes etapas:

1.4.1. Etapa compilatoria

Búsqueda y revisión de información geológica existente de la zona a estudiar, en las bibliotecas Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, tales como:

- Trabajos Especiales de Grado.
- Artículos publicados en revistas y en congresos geológicos nacionales e internacionales.
- Mapas inéditos del Ministerio de Energía y Minas (Bellizia *et al.*, año 1976, y Etchart H., año 1970).
- Hojas topográficas a escala 1:25.000 y 1:100.000 del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB).
- Mapa Geológico de Venezuela compilado por Urbani *et al.* (2006).
- Mapa Geológico de Duerto *et al.* (s/f).

Además se realizó la búsqueda de asistencia técnica para el manejo de sistemas de información geográfica en la Escuela de Geografía de la Facultad de Humanidades de la Universidad Central de Venezuela, así como también en el Centro de Estudios Integrales del Ambiente de la Universidad Central de Venezuela (CENAMB),

1.4.2. Etapa de oficina

El trabajo de oficina comprendió la digitalización, procesamiento y posterior interpretación de las imágenes satelitales, mapas topográficos y mapas geológicos. Esta etapa incluye el trabajo mediante el empleo y manejo de los programas de computación: ENVI[®] 4.2, ERDAS IMAGINE[®] 8.5 y ArcGIS[®] 9.1.

1.5. Antecedentes

Sutton (1946), desarrolla una recopilación de la geología de la cuenca del Lago de Maracaibo, tomando en cuenta la estratigrafía de la zona y la geología estructural del área. Se presenta información de superficie y de subsuelo, de rocas del basamento ígneo-metamórfico hasta rocas que conforman la cobertura sedimentaria. El estudio realizado tuvo importantes alcances en estratigrafía, se proponen nombres formales para varias formaciones Cretácicas y Terciarias que presentaban problemas de nomenclatura.

Rod y Maync (1954), dividen el Grupo Cogollo en tres formaciones: Apón, Lisure y Maraca, además efectúan la subdivisión de Apón en tres intervalos. Mencionan un espesor máximo de 835 metros del Grupo Cogollo en el caño Maraca.

Miller (1960), enfoca su trabajo principalmente en la tectónica de la Sierra de Perijá. Propone un modelo evolutivo de la zona, tomando en cuenta la información estratigráfica como base para establecer correlaciones con la tectónica. Este trabajo tiene su mayor relevancia en el área de la Sierra de Perijá, presentando un análisis de toda la sierra mediante el uso de la interpretación de fotografías aéreas. Como conclusión de mayor relevancia se determina una tendencia de acomodo de las estructuras geológicas en la sierra, dominadas por los fuertes alineamientos que forman la falla de Perijá que genera la desgarradura de Perijá y la falla el Tigre.

Hea y Whitman (1960), proponen el nombre de Grupo La Ge para la sedimentación Triásico – Jurásico en Perijá constituido por las formaciones Tinacoa, Macoita y La Quinta. Esta sedimentación presenta abundante material volcánico. Además señalan la necesidad de dividir la Formación La Quinta en dos unidades estratigráficas, una inferior que presenta la interdigitación de ésta con rocas volcánicas de El Totumo y una superior donde no existe interdigitación.

Miller y San Juan (1963), realizan una revisión de la estratigrafía de la cuenca de Maracaibo, basando su trabajo a depósitos terciarios. Se discuten algunos inconvenientes de nomenclatura en rocas de edad Eoceno-Oligoceno, específicamente al centro occidente de la cuenca de Maracaibo. Se discute sobre las formaciones Guasare y Marcelina de edad Paleoceno, mostrando información suplementaria y algunas secciones de referencia.

Zambrano *et al.* (1971), presentan una síntesis general sobre la evolución paleogeográfica, sus facies, dinámica y la historia petrolera de la cuenca occidental.

Xavier y Espejo (1977), Realizan un estudio estructural en los ríos Macoita, Tucuco, Jucucunaca y Río Negro. Definen las tendencias estructurales ocurridas durante el paleozoico.

González de Juana *et al.* (1980), presentan un resumen de la geología de Venezuela. A través de una intensa recopilación de publicaciones y trabajos de grado, se presentan descripciones e interpretaciones que abarcan aspectos de la estratigrafía, sedimentología y aspectos estructurales.

Maze (1984), publica un artículo sobre la Formación La Quinta. En él realiza una descripción detallada en distintos afloramientos, resaltando características estratigráficas y estructurales y su relación con depósitos semejantes desde México hasta Chile. Por otro lado, realiza estudios paleomagnéticos que indican que el modelado tectónico que existe entre la sierra de Perijá y los Andes venezolanos no pueden ser interpretados bajo un mismo modelo. Sugiere que la sierra de Perijá es un terreno alóctono emplazado en un marco tectónico que presentaba un proceso de subducción de la placa Pacífico al oeste y un proceso de rifting asociado a la apertura del Caribe durante el Jurásico.

Kellogg (1984), publica un artículo que muestra la evolución tectónica de la zona de Perijá. Establece cuatro fases de deformación durante el Cenozoico, marcadas durante el Eoceno Temprano, Eoceno Medio, Oligoceno y la última fase de deformación que abarca desde el Mioceno hasta el Reciente; fase de deformación del marco tectónico actual en la zona norte de Venezuela. El modelo tectónico que genera la arquitectura final del orógeno en Perijá está basado en fallas inversas de bajo ángulo.

Audemard (1991), realiza una revisión de la tectónica del oeste de Venezuela. Describe a través de un conjunto de líneas sísmicas de Perijá, mostrando su respectiva interpretación. El autor divide la sierra en tres sectores en base a su estilo estructural: sector norte, central y sur.

Gamarra y Adrián (1993), describen unidades litológicas que afloran y presentan un análisis petrográfico de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Realizan una columna estratigráfica detallada de la sección de quebrada Riecito en el Palmar.

Parnaud *et al.* (1995), elaboran una síntesis de la estratigrafía del oeste de Venezuela, los Andes merideños, cuenca de Barinas, cuenca de Maracaibo y Sierra de Perijá. La contribución más importante para el entendimiento de la evolución durante el periodo Mesozoico-Cenozoico, reside en la división del área en supersecuencias que se encuentran limitadas por discordancias verificadas en campo y mediante el uso de la sísmica.

De Toni *et al.* (1996), proponen la evolución de las estructuras mediante un modelo estructural. Se basan para la elaboración de su modelo en la reactivación de fallas normales preexistentes asociadas a depósitos de “rifting” de edad Jurásico. Se establece una variación lateral de los sectores meridional y central de la sierra dividiendo esta zona de la sierra en tres sectores: sector meridional o norte, sector central y sector septentrional o sur. Se muestra además el desarrollo de zonas triangulares.

Roure *et al.* (1997), exponen modelos evolutivos de tipo estructural de la cuenca de Maracaibo. Se realiza una descripción detallada de las estructuras más importantes en la cuenca, disposición y relación, además de su evolución.

En 1997, el Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN), realiza una actualización de la estratigrafía en Venezuela, mostrando descripciones de tipo estratigráfico como localidades tipo, edades, extensión geográfica, espesores, tipos litológicos, paleoambientes y correlaciones.

Duerto *et al.* (1998), realizan una discusión de las zonas triangulares ubicadas en la zona occidental de Venezuela, centrandó su estudio en los flancos norte y sur andino y la sierra de Perijá. Estos autores establecen que la evolución estructural está controlada por la reactivación de fallas preexistentes. Observan además zonas de buzamientos bajos y acortamientos hacia el sector norte mientras que para el sector sur se observa una verticalización de las estructuras debido a un patrón estructural que se atribuye a un corrimiento en el subsuelo denominado “Corrimiento de los Motilones”.

González (1999), muestra, integrando información de geología y subsuelo, como resultado un modelo de deformación para el transecto regional basado en la inversión tectónica de estructuras extensivas de edad Jurásico, en el flanco sur oriental de la Sierra de Perijá.

Mendoza (2005), presenta un resumen actualizado de la geología de Venezuela, mediante una recopilación de publicaciones y trabajos de grado actualizados, incluyendo los recursos minerales de las provincias geológicas y relacionándolos con la evolución geotectónica de cada provincia.

CAPÍTULO II

2. Geología Regional

2.1. Geología Estructural

La Sierra de Perijá constituye la parte septentrional de la cadena andina que se localiza en el límite occidental de Venezuela, formando parte de una rama hacia el norte de la Cordillera Oriental de Colombia (Miller, 1960 en González 1998). El extremo norte de la cadena termina de manera abrupta contra la Falla de Oca, a diferencia del límite sur, el cual se conecta con el Macizo de Santander en Colombia (De Toni *et al.*, 1996; Colleta *et al.*, 1997 en González 1998) (Figura 2-1).

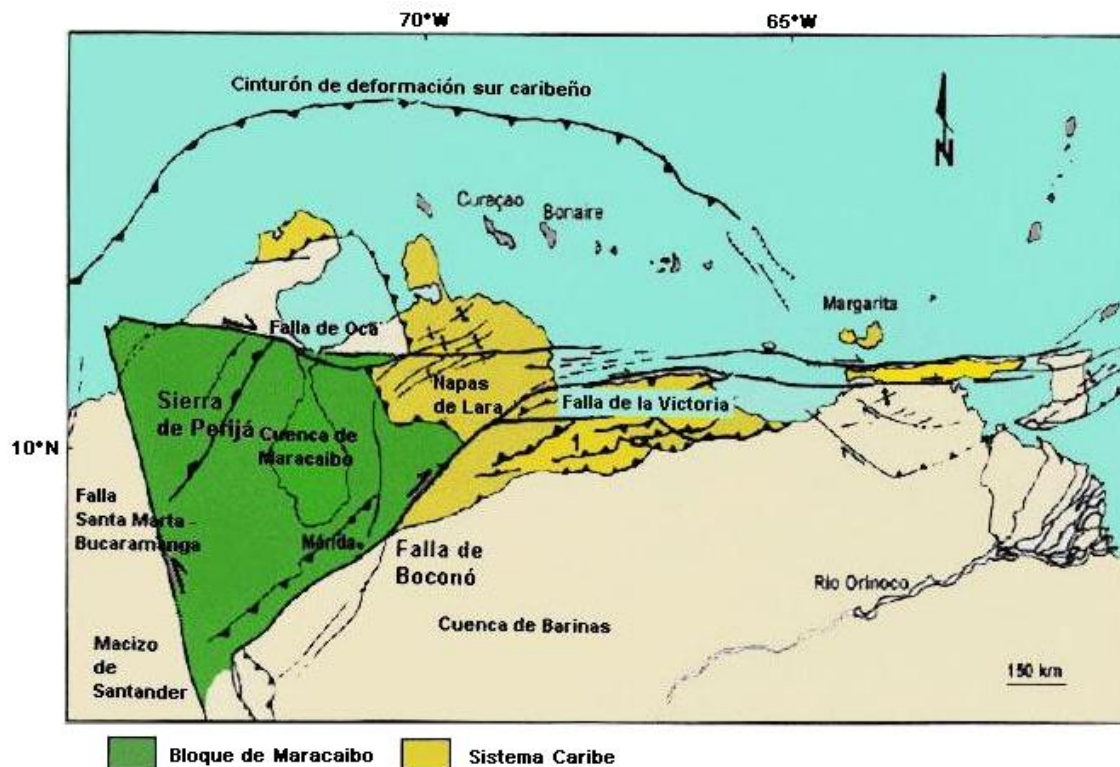


Figura 2-1. Mapa estructural del NO de Sur América. Modificado de Castrillo *et al.* (s.f.)

Aproximadamente en el paralelo 9°N, la Cordillera Oriental de Colombia se acoda y cambia su rumbo de N20°O a N25°E, dirección que se conserva en la Sierra de Perijá, desde su comienzo en Venezuela hasta la planicie de la Guajira, por una distancia aproximada de 250 km. La cresta de la Sierra de Perijá marcan la frontera entre Colombia y Venezuela, y la extensión de esta subprovincia fisiográfica, dentro de Venezuela, es de unos 7500 km² (González de Juana *et al.*, 1980).

Aproximadamente 100 km en dirección N25°E a partir de su entrada en el territorio venezolano, la cadena montañosa presenta una depresión designada por MILLER (1960, p. 688) Desgarradura de Perijá, producida por la falla del mismo nombre y situada en las cabeceras del río Tucuco. El segmento situado al sur de esta depresión se conoce como la Sierra de Los Motilones y representa una cadena simple, divisoria entre el valle del río Cesar al oeste y la Cuenca del Lago de Maracaibo hacia el este; las laderas de esta cadena por el lado venezolano son escarpadas y la elevación de la divisoria se mantiene entre 2.000 m y 2.600 m de altitud, con una culminación a 3.750 m en el pico Tetaría (González de Juana *et al.*, 1980).

La red hidrográfica oriental de la Sierra de Los Motilones está formada por varios tributarios del río Santa Ana como el Tucuco, Santa Rosa, Lora, etc., pero su extremo occidental, en territorio venezolano está drenado por el Río de Oro que penetra profundamente hacia el norte por un valle intermontano (González de Juana *et al.*, 1980).

Al norte de la Desgarradura de Perijá la Sierra está formada por una serie de filas paralelas al grano NNE de la cadena. Su cresta constituye la cresta de la Serranía de Valledupar que se extiende al oeste de las cabeceras de los ríos Negro y Apón hasta las cabeceras más elevadas del río Guasare; en este sector la culminación de la sierra está representada por el Cerro Pintado, con 3.600 m sobre el nivel del mar. La parte septentrional de la sierra, al oeste y norte del Río Guasare se conoce como los Montes de Oca que termina en el Alto del Cedro (González de Juana *et al.*, 1980).

En la Sierra de Perijá se encuentran rocas metamórficas e ígneas posiblemente paleozoicas o más antiguas y rocas no metamorizadas comprendidas entre el Paleozoico Medio y el ciclo Terciario Superior, marcando un lapso aproximadamente de 500 millones de años. (González de Juana *et al.*, 1980).

2.1.1. Tectónica Regional

La sierra de Perijá está ubicada en un bloque triangular al NO de Sur América, el cual tiene una activa deformación. Esta zona triangular está limitada al oeste por el sistema de falla Santa Marta-Bucaramanga, que presenta un movimiento transcurrente sinistral, hacia el este por el sistema de fallas de Boconó, con un movimiento transcurrente dextral, y hacia el norte por el prisma de deformación de sur del Caribe (Mann y Burke, 1984, en Lugo y Mann, 1995), donde domina el sistema transpresivo de la Falla de Oca (Figura 2-1).

En el flanco oriental de la Sierra de Perijá, se encuentra como el elemento más sobresaliente el monoclinial de Perijá, el cual en los mapas geológicos se muestra como un conjunto de unidades estratigráficas que afloran en la misma dirección que sigue la cadena, las cuales presentan un buzamiento medio entre los 30 y 40°. Este buzamiento promedio varía hacia el este, donde presenta un incremento, alcanzando valores entre los 50 y 70° para las unidades cretácicas tardías y terciarias tempranas. A medida que se baja hacia la cuenca, los valores de buzamiento en las unidades de edad Mioceno Tardío-Plioceno se suavizan llegando a ser subhorizontales (De Toni *et al.*, 1996).

En los mapas geológicos de Miller (1960), en los de la Creole (hojas E-2 y D-2), y en la de Bellizia *et al.* (1976), se puede observar una alineación estructural predominantemente de orientación NE-SO, donde la expresión más característica es la falla de Perijá-El Tigre (Figura 2-2). Esta cruza toda el área en Venezuela y se extiende en parte a Colombia (González, 1998).

Audemard (1991), divide la Sierra de Perijá en tres zonas, según los estilos estructurales que se observan. Una zona **sur**, marcada por pliegues con vergencia este, limitados por fallas de inclinación oeste, a las cuales se opone un retrocorrimiento de vergencia oeste que se despega de las lutitas de la Formación Colón. Una zona **central** compuesta principalmente por estructuras de vergencia este y oeste, donde las de vergencia oeste están caracterizadas por las fallas de Cerrejón y Cuiba, que son interpretadas como la inversión de unos semigrabenes Jurásicos, y las de vergencia este están desarrolladas a partir de la zona oriental de la falla de Cuiba, dominando el flanco este de la sierra, y representan una serie de imbricaciones que envuelven el basamento debajo de un retrocorrimiento. La zona **norte** por su parte está caracterizada por una vergencia oeste de todas las estructuras y el desarrollo de anticlinales asimétricos asociados a fallas inversas del basamento.

Adyacente a la Sierra de Perijá, hacia la parte este, se desarrolla una cuenca flexural, la cual presenta como expresión morfológica el lago de Maracaibo. La Cuenca de Maracaibo ocupa la posición central de una microplaca que ha sido menos deformada que los límites de la misma esta microplaca se encuentra caracterizada por una cuña triangular litosférica (Roure *et al.*, 1997 en González, 1998), mencionada anteriormente como el bloque triangular limitado por el sistema de fallas Santa Marta-Bucaramanga, Boconó y Oca (Figura 2-1).

Las estructuras de mayor importancia en la Cuenca de Maracaibo son la Falla de Urdaneta y la Falla de Icotea (Figura 2-2).

La falla de Urdaneta es una estructura con dirección aproximada SO-NE, la cual comprende un conjunto de alineaciones elongadas con orientación norte-NE, y que son subparalelas al borde del lago (Roure *et al.*, 1997). Este alineamiento se localiza en la zona media oeste del lago, y se puede dividir en dos segmentos conocidos como Urdaneta Noreste y Sur, al norte y sur respectivamente (Audemard, 1991 en González, 1998).

Según Roure *et al.* (1997) esta estructura se caracteriza por una serie de estructuras anticlinales que contienen desde rocas pre-Cretácicas hasta la secuencia sedimentaria cretácica-paleógena. La secuencia neógena presenta menos deformación que la secuencia infrayacente, la cual muestra mayores estructuras y acortamiento como resultado de eventos compresivos que ocurren desde el Paleoceno hasta el Eoceno Medio – Tardío.

La falla de Icotea, muestra una deformación transpresiva sinistral que afecta e invierte las estructuras normales preexistentes. Según Roure *et al.* (1997) la falla de Icotea se extiende hacia el sur desde el extremo norte del lago y termina progresivamente a medida que se interna en el *foredeep* (depocentro) andino, (Figura 2-2), y comprende dos segmentos, uno ubicado al norte, compuesto por sedimentos jurásicos y capas rojas, y otro ubicado al sur que muestra un basamento cristalino o Paleozoico, el cual se encuentra por debajo de la discordancia cretácica, que se presenta tanto en el lado este como oeste de la falla de Icotea.

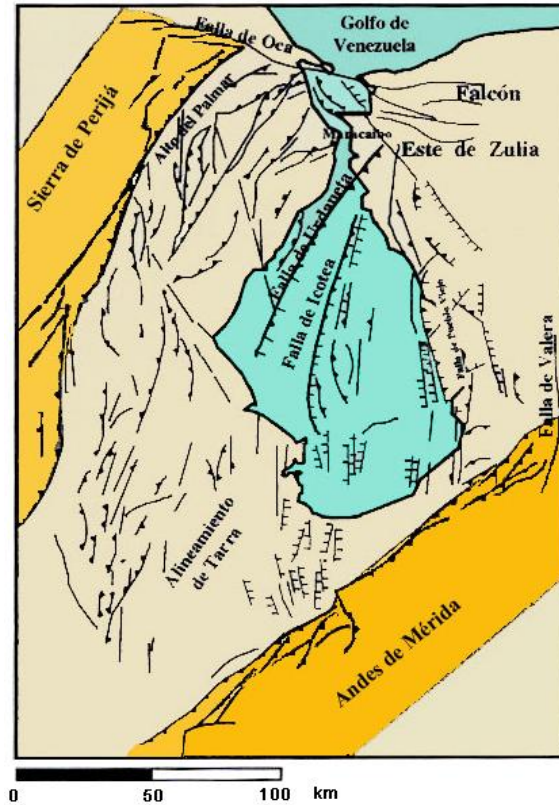


Figura 2-2. Mapa tectónico simplificado de la cuenca de Maracaibo. Modificado de González (1998)

El movimiento rumbo deslizante sinistral transpresional de la falla de Icoatea es debido a una relativa oblicuidad de los esfuerzos principales producidos por la deformación neógena y Caribe. Debido a que en la cobertura sedimentaria se presentan numerosos niveles de despegue en el Cretácico Tardío y en los sedimentos Cenozoicos, es común encontrar deformación disarmónicas o colas de pescado (fishtails), a lo largo de la falla (Roure *et al.*, 1997 en González, 1998).

En la zona denominada alto de Icoatea se muestra una deformación caracterizada por cuñas del basamento que se levantan en falla de bajo ángulo, dentro de las capas sedimentarias, produciendo un retrocabalgamiento somero que nace desde un estrato dúctil, que los representan los sedimentos de la Formación Colón (Roure *et al.*, 1997).

El levantamiento asociado a la falla de Icoatea se genera en fallas de bajo ángulo, conocidas como “short cut”, las cuales elevan el basamento y acomodan su acortamiento por medio de zonas triangulares o cuñas geométricas. En la zona oeste de Icoatea toda esta deformación se encuentra asociada a inversión de fallas normales preexistentes de edad Jurásico o Eoceno localizadas en la cuenca (Roure *et al.*, 1997).

El retrocorrimiento regional de la indentación del basamento y las estructuras de cola de pescado someras que se desarrollan en la cobertura sedimentaria, están conectadas en profundidad con fallas normales preexistentes y se encuentran parcialmente acomodadas por una deformación transcurrente dextral (Roure *et al.*, 1997 en González, 1998).

Efectos similares del basamento y estructuras de tensión se aprecian en numerosos rasgos transpresionales en el oeste del lago de Maracaibo (De Toni *et al.*, 1996). Estos efectos se observaron en la Sierra de Perijá donde domina un régimen de inversión de estructuras preexistentes, formándose retrocorrimientos o indentaciones que se desarrollan en los sedimentos de la Formación Colón (De Toni *et al.*, 1996 en González, 1998).

2.2. Estratigrafía Regional

Perijá presenta un registro estratigráfico que inicia en el Precámbrico a Paleozoico hasta el reciente. Este capítulo presenta una descripción de la estratigrafía de Perijá, tomando en cuenta las relaciones estratigráficas tales como la litología, espesores, contactos y otras características de las rocas de la zona.

Parnaud *et al.*, (1995) dividen el occidente de Venezuela en seis supersecuencias, limitadas por discordancias, las cuales evidencian la dinámica evolución de las cuencas en el Mesozoico-Cenozoico, de un proceso de extensión a uno de colisión. La supersecuencia **A** fue depositada durante un episodio de apertura de corteza del Jurásico (*rifting*). La supersecuencia **B** corresponde al margen pasivo subsiguiente, durante el Cretácico Temprano al Tardío. La supersecuencia **C** marca la transición a un régimen compresivo en el Cretácico Tardío y Paleoceno Temprano. La compresión es el resultado de la colisión y obducción del arco volcánico pacífico al oeste con la placa suramericana. La supersecuencia **D** pone de manifiesto el desarrollo de la cuenca de antepaís del Paleoceno Tardío-Eoceno Medio, al frente del arco volcánico pacífico, y el emplazamiento de las napas de Lara. Las supersecuencias **E** y **F** se atribuyen a las modificaciones en la cuenca de antepaís debidas a la colisión Eoceno Tardío-Pleistoceno del arco de Panamá. Los levantamientos de la Serranía de Perijá, del Macizo de Santander y de los Andes de Mérida particionaron la cuenca de antepaís generando así las actuales cuencas del Lago de Maracaibo y Barinas-Apure.

Para una mejor descripción y comprensión de la estratigrafía de la zona se procede a separar los distintos grupos de rocas de la zona por periodos de tiempo geológico. De tal forma cada conjunto queda expresado de la siguiente manera:

PRECÁMBRICO TARDÍO

PALEOZOICO

TRIASICO-JURASICO

CRETÁCICO TARDÍO

PALEOCENO-EOCENO MEDIO

EOCENO TARDÍO-PLIO-PLEISTOCENO

PRECÁMBRICO TARDÍO

El registro estratigráfico de Perijá comienza con la Formación Perijá y su edad es Precámbrico Tardío según CIEN (1997). Hea y Whitman (1960) definen un periodo de tiempo que abarca desde el Precámbrico hasta el Devoniano Temprano (CIEN, 1997)

La *Formación Perijá* es suprayacente al basamento y discordante, a su vez infrayacente a la Formación Caño Grande del Grupo Cachirí en contacto de falla (Hea y Whitman, 1960 en CIEN 1997). Bowen (1972) indica que la unidad se encuentra infrayacente a sedimentos no metamorfizados del Grupo Río Cacharí de edad Devónico.

Liddle *et al.* (1943) indican que la litología corresponde a cuarcitas duras cortadas por diques y vetas de cuarzo. La descripción litológica hecha por Sutton (1946) y por Hea y Whitman (1960) reconocen la unidad como un conjunto de esquistos biotíticos, muscovíticos, tremolíticos, cuarzo-feldespáticos y metacuarcitas cloríticas, cortadas por pequeños diques y vetas de cuarzo (CIEN, 1997).

En cuanto a espesor, Liddle *et al.* (1943) lo establece en 300 m, mientras que Hea (1964) reconoce una sección de 1000 m en la localidad de Caño Grande (CIEN, 1997).

PALEOZOICO

El conjunto de rocas paleozoicas de la Sierra de Perijá, esta constituido por un grupo rocoso de edad Devónico-Pérmico y definido por el Grupo Río Cachimí conformado por las formaciones: Los Guineos, Caño Grande, Caño del Oeste y Campo Chico. Suprayacente y discordante al Grupo Río Cacharí se encuentran las formaciones Caño del Noroeste, Caño Indio, Río Palmar y Palmarito del Paleozoico Superior completando así la secuencia estratigráfica (Figura 2-3).

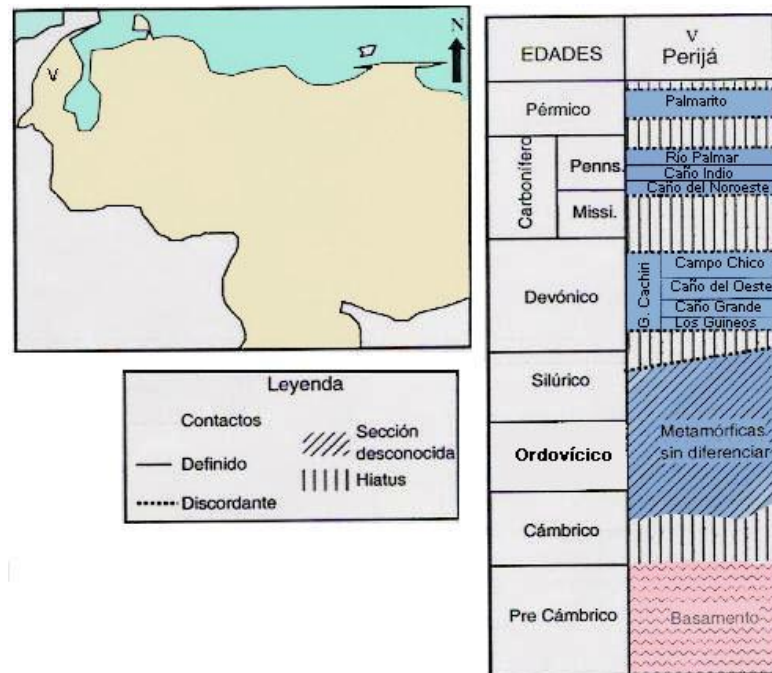


Figura 2-3. Carta cronoestratigráfica del Paleozoico en Perijá. Modificado de Gonzáles (1998)

Para el Grupo Río Cachimí se establece un periodo de depositación donde el ambiente sedimentario es marino de aguas llanas a salobres, evidenciado en la Formación Caño Chico. La secuencia del Grupo Río Cachimí tiene un espesor aproximado de 2500 m. Se establece como ambiente sedimentario marino de aguas llanas hasta salobre, con influencia continental

Bowen (1972) describe al Grupo Río Cachimí hacia su base por la presencia de una unidad discordante sobre el Granito de Lajas, considerado por el mismo autor como pre-Devónico sin confirmación radiométrica de edad, denominada formación Los Guineos, compuesta por guijarros angulares de cuarzo, areniscas cuarcíticas, lutitas y limo. Suprayacente y en contacto concordante identifica la Formación Caño Grande, de edad Devónico, compuesta por calizas, lutitas y areniscas. Hacia el tope de esta formación, también

en contacto concordante se encuentra la Formación Caño del Oeste, de edad Devónico, compuesta predominantemente por lutitas, hacia el tope se encuentra en contacto concordante la formación Campo Chico de edad Devónico Tardío, con presencia de grauvacas ferruginosas, intercaladas con limolitas carbonáceas y algunas calizas microcristalinas gris oscuro (Gonzalez de Juana *et al.* 1980).

Durante el Paleozoico superior se depositan las Formaciones Caño del Noreste, Caño Indio, Río Palmar y Palmarito. En esta sección las tres primeras formaciones corresponden a bancos delgados de arenas arcósicas, intercalados con lutitas limosas de color gris a gris verdoso. La Formación Caño del Noreste presenta un horizonte de calizas crinoidales y margas grises donde se determina su edad en Carbonífero Medio (Bowen, 1972). Se sugiere un ambiente sedimentario de aguas llanas restringido (Gonzalez de Juana *et al.* 1980)

Suprayacente y concordante se encuentra la formación Caño Indio que es una sección de capas rojas, localmente contentiva de elementos volcánicos y carbonatos marinos (Bowen, 1972).

La **Formación Río Palmar**, transicional en la base con la formación Caño Indio, presenta tipos litológicos en la base, como calizas oolíticas y calizas conchíferas en asociación con limolitas calcáreas, luego hacia su parte media se presentan dos horizontes faníticos y su edad se establece como Pennsilvaniense Inferior (González de Juana *et al.* 1980).

La **Formación Palamarito** de edad Pérmico es suprayacente y discordante completando la secuencia, la unidad presenta dos miembros diferenciados en la zona norte de Perijá. Un miembro inferior clástico arenoso y un miembro superior de calizas fosilíferas con fanita. El ambiente sedimentario en la Formación Palmarito es marino poco profundo para las arenas y de plataforma marina para las calizas. (González de Juana *et al.* 1980).

TRIÁSICO-JURÁSICO

Parnaud *et al.*, (1995) toman como marco tectónico asociado a la secuencia sedimentaria a un periodo de *rifting* de la Pangea durante el Jurásico (Figura 2-4), lo que se define como supersecuencia A o supersecuencia extensiva. Según Ostos y Yoris (1997), en WEC, en Venezuela, la rotura o “*rifting*” de Pangea (super-continente que reunía las masas continentales de América, Europa y África actuales) produjo varias estructuraciones importantes, entre ellos valles de extensión o grábenes, en los que se incluyen los grábenes de

los Andes, Perijá y el ubicado en el Lago de Maracaibo, que posteriormente influyeron en la evolución de las cuencas sedimentarias venezolanas.

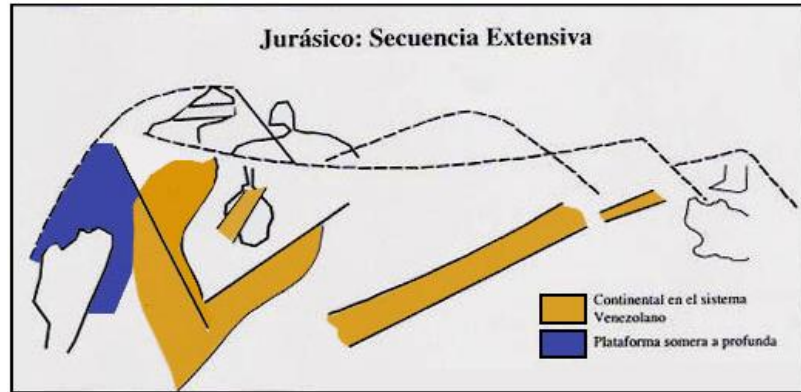


Figura 2-4. Situación tectónica para el Jurásico en Venezuela. Modificado de González (1998)

Este periodo de tiempo se encuentra representado principalmente por el Grupo La Ge (Hea y Whitman, 1960 en Gonzalez de Juana *et al.* 1980) conformado por las Formaciones Tinacoa (Liddle *et al.* 1943 en Parnaud *et al.* 1995), Macoita (Hedberg y Sass, 1937 en Parnaud *et al.* 1995) y La Quinta (Küding, 1938 en Parnaud *et al.*, 1995) (Figura 2-5).

Las edades se determinaron para este Grupo por Benedetto y Odreman (1997). Estos autores asignan las siguientes edades: Formación Tinacoa, Jurasico Medio Temprano, para la Formación Maocita Jurasico Medio y para la Formación La Quinta se asigna edad Jurasico Tardío Medio. (Maze 1984).

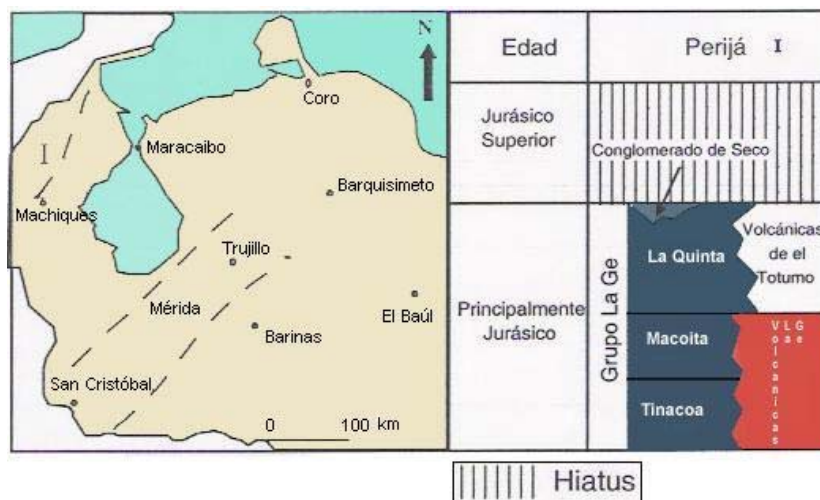


Figura 2-5. Carta cronoestratigráfica del Jurásico en Perijá. Modificado de González (1998)

La **Formación Tinacoa** se depositó según Gonzalez de Juana *et al.* (1980), en un ambiente sedimentario de aguas poco profundas, propicio para la formación de calizas. El material de tipo volcánico o piroclásticos crecen en volumen lateralmente y hacia el tope y se conocen como las Volcánicas de La Ge (González de Juana *et al.* 1980).

La **Formación Macoita** presenta un aporte de terrígenos, y se caracteriza por un intervalo de lutitas y limolitas calcáreas, que se interestratifican con grauvacas, areniscas tobáceas, tobas líticas que presentan frecuentemente estratificación cruzada (Gonzalez de Juana *et al.* 1980), representando una transición entre las formaciones Tinacoa y La Quinta. Bowen (1972) establece que la edad corresponde al Jurásico Temprano. En levantamientos geológicos realizados por profesores de la UCV (Falcón R. y Loureiro D., 1993; Mora J. y Rojas O., 1993; Ostos M. y Yoris F., 1993), se determinó una edad Jurasica para esta formación, con una composición de 60% de areniscas conglomeráticas, 20% de areniscas y 20% de calizas, estratigráficamente posee un espesor promedio de 755 m.

La **Formación La Quinta** se encuentra suprayacente, se encuentra en contacto transicional con la Formación Macoita en la localidad del Río Macoita, sin embargo se puede encontrar en contacto discordante (Bowen 1972 en Gonzalez de Juana *et al.* 1980), y representa la parte superior del Grupo La Ge. Esta unidad aflora en la Sierra de Perijá como una potente secuencia de limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo (Gonzalez de Juana *et al.* 1980). La Formación La Quinta se puede dividir en tres intervalos (Maze, 1984), el primer intervalo, basal, presenta espesores comprendidos entre los 700 y 800 m, y se caracteriza por arcosas de marrón a roja oscura con pocas intercalaciones piroclásticas, también existe la presencia de carbonatos de agua dulce en forma de concreciones, luego se desarrolla una zona de transición correspondiente al segundo intervalo con espesores de 1 a 20 m, compuesto principalmente por capas de basalto-andesitas, conglomerados tobáceos y arcosas verdes, con intercalaciones de arcosas marrones y rojizas oscuras y lutitas, además hay menos presencia de carbonatos y se muestran en forma de lentes o nódulos irregulares, posteriormente el intervalo superior muestra cantos conglomeráticos, que consisten en una arcosa roja oscura a marrón y capas de cenizas rojas feldespáticas completando en su totalidad este intervalo un espesor de 700 a 800 m (CIEN, 1997). El espesor total de la Formación La Quinta en la Sierra de Perijá es de aproximadamente 1700 m. Hea y Whitman lo estiman en 1050 m (Maze, 1984). Según Falcón *et al.*, (1993) esta formación consiste en areniscas (50%),

conglomerados (35%) y lutitas (15%), cronológicamente es de edad Jurasica y estratigráficamente es de 1200 a 600 m de espesor, promediándose en unos 850 m.

CRETÁCICO TEMPRANO

Para Parnaud *et al.* (1995) esta secuencia sedimentaria representa la supersecuencia **B** (Figura 2-6) o secuencia de margen pasivo (Figura 2-7) que marca el comienzo de la transgresión marina cretácica en Venezuela. Según Ostos y Yoris (1997), en el occidente venezolano la sedimentación del Cretácico Temprano estuvo controlada en su inicio por el sistema de fallas de los grábenes jurásicos, evidenciado en los clásticos arenosos de la Formación Río Negro, con espesores de más de dos kilómetros en el Surco de Machiques, y de unos pocos metros en localidades del Flanco Norandino. Posteriormente, la subsidencia se estabilizó propiciando la sedimentación carbonática del Grupo Cogollo en un extenso mar transgresivo.

Este periodo está representado por la Formación Río Negro, luego el Grupo Cogollo conformado por las Formaciones Apon, Lisure y Maraca y finalmente la Formación La Luna. En cuanto a la edad se establece que presenta un rango que va desde el Neocomiense hasta el Campaniense (Gonzalez de Juana *et al.* 1980, Parnaud *et al.* 1995 y CIEN, 1997).

La **Formación Río Negro** tiene una edad Neocomiense-Barremeiense establecida por las relaciones estratigráficas (Maync, 1959 en González, 1998) y muestra una litología caracterizada por areniscas blancas, conglomerados heterogéneos, arcillas y lutitas (CIEN, 1997), además se identifican depósitos de tipo fluvial como abanicos aluviales hacia su base (Renz, 1959). Según Falcón *et al.*, (1993) la formación consiste en areniscas (50%), conglomerados (35%) y lutitas (15%), teniendo una edad cretácico inferior, con un espesor promedio de 600 m.

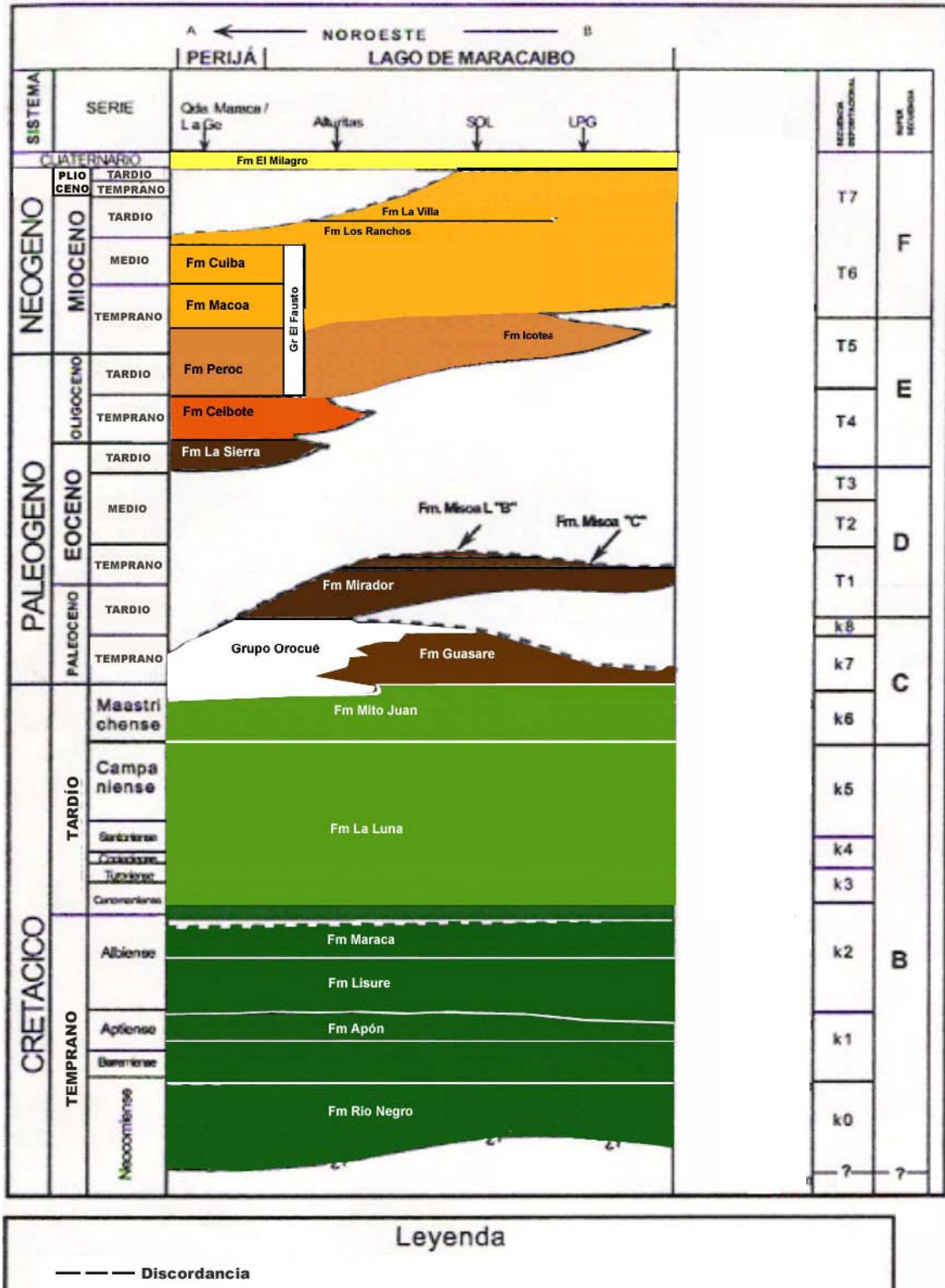


Figura 2-6. Carta cronoestratigráfica de la Sierra de Perijá y del Lago de Maracaibo, donde se muestran las distintas formaciones, así como su ubicación en las distintas secuencias depositacionales. Modificado de González (1998).

El **Grupo Cogollo** se desarrolla de manera transicional suprayacente a la Formación Río Negro (Hedberg y Sass, 1937). Consiste en un conjunto de rocas de tipo carbonático en su mayoría y se relaciona con la transgresión marina que abarca desde el Campaniense hasta el Aptiense (Parnaud *et al.*, 1995) y el ambiente sedimentario se reconoce como deltaico y de plataforma restringida y abierta (Barkot *et al.* 1981, en González de Juana *et al.* 1980). Realizando una descripción litológica desde la base hasta el tope de este grupo se muestran hacia la base calizas con estratificación gruesa con lutitas calcáreas y margas, se presenta además un horizonte de calizas nodulares y lutitas con presencia de foraminíferos reconocidas como Miembro Machiques de la Formación Apon. Luego se encuentran carbonatos de mezcla y calizas glauconíticas y lutíticas, finalmente hacia el tope se muestran calizas bioclásticas en su mayoría intercaladas con capas de margas y lutitas (CIEN, 1997).

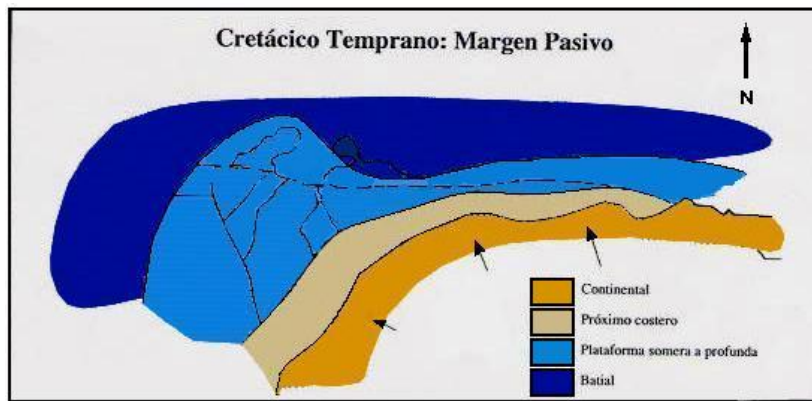


Figura 2-7. Situación tectónica para el Cretácico Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998)

Como se menciona anteriormente, las formaciones Apón, Lisure y Maraca conforman al Grupo Cogollo. La **Formación Apon** se deposita bajo la influencia de un ambiente de plataforma marina somera a externa (Figura 2-8), es suprayacente a la Formación Río Negro, presenta un contacto transicional y es concordante con la Formación Lisure (Rod y Maync, 1954 en Parnaud *et al.*, 1995). Rod y Maync (1954) dividen la Formación Apon en tres miembros, que de más inferior a más superior son Tibú, Machiques y Piché concordantes entre si y las cuales pueden reconocerse en la Sierra de Perijá. El *Miembro Tibú*, para González de Juana *et al.* (1980) es Aptiense-Albiense y posee unos 360 m de calizas arenosas, areniscas calcáreas y lutitas. Según Falcón *et al.*, (1993) este miembro está compuesto por calizas (95%) y arenas (5%), teniendo una edad Aptiense-Albiense, con un espesor promedio de 305 m. Para González de Juana *et al.* (1980) el *Miembro Machiques* es Aptiense-Albiense y posee unos 205 m de Calizas laminares negras, margas y lutitas. Según Falcón *et al.*, (1993)

este miembro consiste principalmente en calizas (100%), posee una edad Aptiense-Albiense, teniendo un espesor promedio de 107 m. El *Miembro Piché*, según González de Juana *et al.* (1980), es Aptiense-Albiense y posee unos 70 m de calizas coquinoideas, mientras que según Falcón *et al.*, (1993) este miembro consiste en calizas (60%) y lutitas (40%), teniendo una edad Aptiense-Albiense, y un espesor promedio de 90 m.

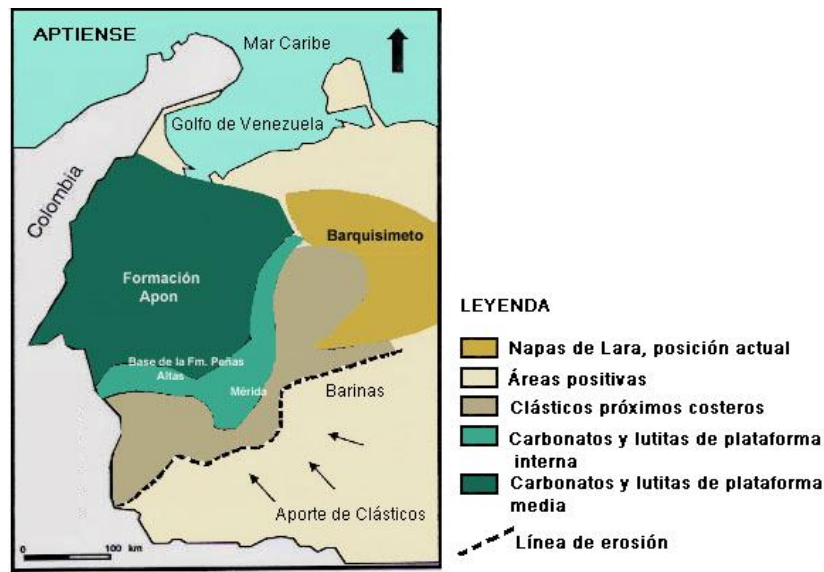


Figura 2-8. Paleogeografía para el Aptiense en Venezuela. Modificado de González (1998)

La *Formación Lisure* por su parte tiene como ambiente sedimentario plataforma marina somera a intermareal y es concordante con la Formación Maraca (León 1975, Barkot *et al.* 1981 en CIEN, 1995). Según Falcón *et al.* (1993) la formación consiste en 65% de arenas, 25% de calizas, 7% de margas (7%) y 3% de lutitas, teniendo una edad Aptiense-Albiense, con un espesor promediándose de 160 m. Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Albiense y posee unos 130 m de areniscas glauconíticas, calizas arenosas y lutitas.

La *Formación Maraca* se deposita en un ambiente de aguas tranquilas cercano a la costa. Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Albiense Superior y posee unos 70 m de calizas arenosas y calizas coquinoideas. Según Falcón *et al.* (1993) la formación consiste en calizas (95%) y lutitas (5%), teniendo una edad Aptiense-Albiense, su espesor es de 60 m en promedio.

Las formaciones Apon, Lisure y Maraca se identifican como las secuencias depositacionales **K1**, y **K2** marcando la transgresión marina durante el periodo Aptiense a Campaniense y que son parte de la supersecuencia **B** (Figura 2-6).

Durante el Cenomaniense se observa un periodo de no depositación o hiatus y que se encuentra por encima de la Formación Maraca y la base de la Formación La Luna (Canache *et al.* 1994). Por medio de la interpretación se establece que este periodo erosivo produce la pérdida de las secuencias durante el Albiense y se relaciona con la colisión del arco volcánico del Pacífico con la placa suramericana, generando una deformación flexural y dando origen a una cuenca antepaís o *foreland* se desarrolla al oeste de la Sierra de Perijá y un *forebulge* aparece en áreas de Perijá y el lago de Maracaibo (Figura 2-9). El levantamiento del *forebulge* restringe la sedimentación y promueve la erosión de la Formación Maraca durante el Cenomaniense Temprano (Parnaud *et al.* 1995)

La **Formación La Luna** de edad Cenomaniense-Campaniense (CIEN, 1997) se extiende por los estados Lara, Trujillo, Península de la Guajira y la cuenca de Maracaibo (Figura 2-10). Muestra una litología predominante de calizas de color gris oscuro a negro, bituminosas (Hedberg y Sass, 1937). Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Cenomaniense-Santoniense y posee unos 200 m de calizas laminadas y ftanitas negras. Según Falcón *et al.*, (1993) la formación consiste en calizas (80%) y lutitas (20%), teniendo una edad Cenomaniense-Santoniense, con espesor promedio de 140 m. Esta Formación representa la más importante roca madre de hidrocarburos en el occidente venezolano. Se toma como marcador del punto de máxima transgresión durante el Cretácico en Venezuela (Parnaud *et al.* 1995). Las condiciones de depositación la definen como euxínicas, sin embargo los estudios paleo batimétricos proponen profundidades de 100 m en el Turoniense hasta los 800 m en el Campaniense (Boesi *et al.* 1988 en CIEN 1997). Para Ostos y Yoris (1997), en Perijá y la Cuenca del Lago de Maracaibo, la Formación La Luna pasa verticalmente a las calizas glauconíticas del Miembro Socuy y lutitas oscuras y areniscas delgadas de las Formaciones Colón y Mito Juan.

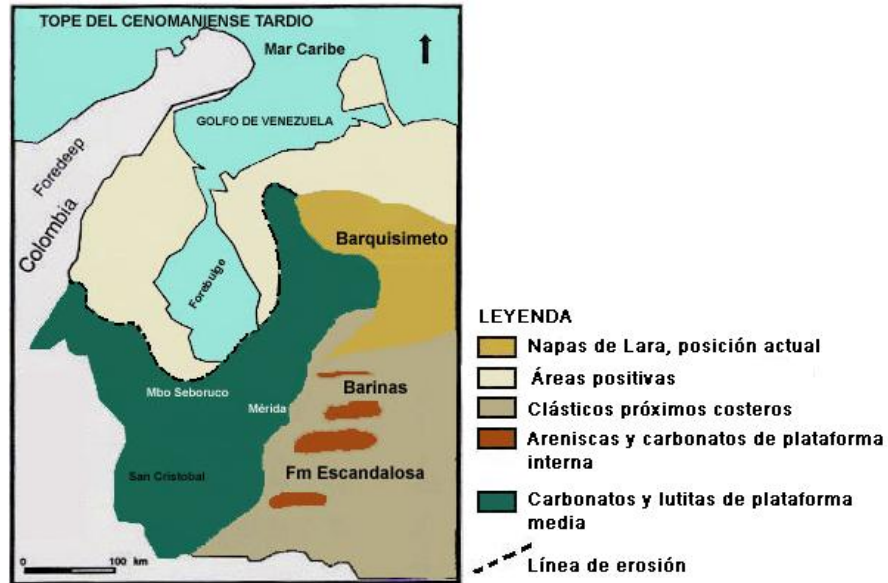


Figura 2-9. Paleogeografía del tope de Cenomaniense Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998)

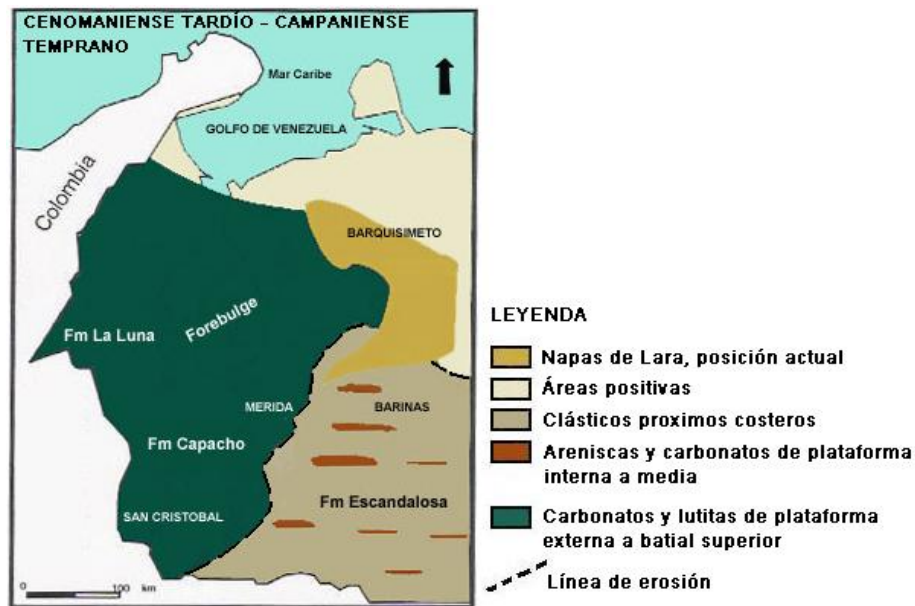


Figura 2-10. Paleogeografía para el Cenomaniense Tardío – Campaniense Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998)

Las secuencias depositacionales identificadas como K3, K4 y K5 (Figura 2-6) evidencian el resultado de la transgresión comprendida entre el Cenomaniense Tardío al Campaniense Temprano de la Formación La Luna y corresponde con la depositación que ocurre en la Sierra de Perijá y el Lago de Maracaibo. La existencia de un arco volcánico

asociado a la depositación se evidencia por la presencia de cenizas volcánicas en la base de esta Formación.

CRETÁCICO TARDÍO

Según Parnaud *et al.* (1995) esta secuencia sedimentaria representa la supersecuencia C (Figura 2-6) o secuencia de transición entre el margen pasivo y activo (Figura 2-11). Para Ostos y Yoris (1997), a finales del Cretácico, Venezuela Occidental, experimenta el efecto de la colisión entre la Placa de Nazca y el Occidente Colombiano. Según Pindell y Ericsson (1994), la subducción a mediados del Cretácico sufre una inversión hacia el oeste, permaneciendo bajo el arco, consumiendo corteza oceánica entre el arco y la Cordillera Central Colombiana. Luego en el Cretácico Tardío esta subducción vuelve a sufrir otra inversión, creando un nuevo sistema hacia el este bajo la Cordillera Central, mientras que la porción que no colisionó, del arco de islas, continuó su deriva con una subducción al oeste generando la placa del Caribe (González, 1998).

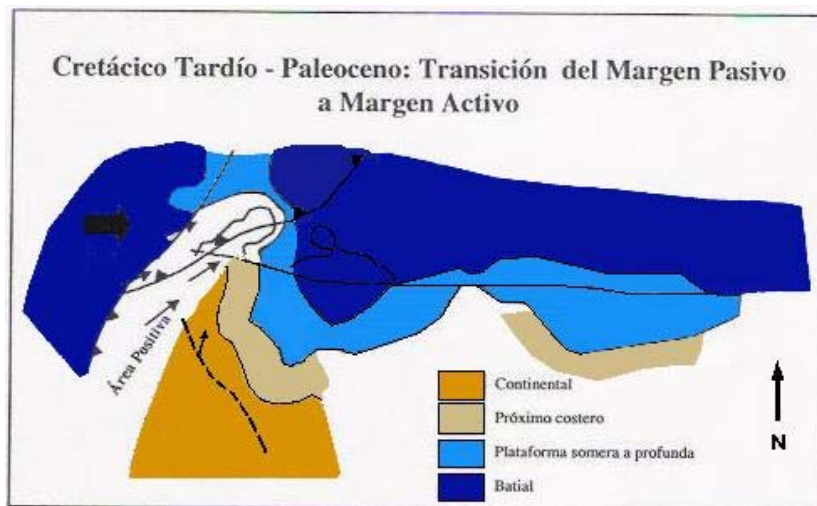


Figura 2-11. Situación tectónica para el Cretácico Tardío - Paleoceno en Venezuela. Modificado de González (1998)

En este periodo de tiempo se desarrolla la sedimentación de las Formaciones Colón y Mito Juan. Al carácter arcilloso en la Formación Colón se le da trato de cobertura transgresiva, donde se definen ambientes de aguas profundas en sectores basales e intermedios de la unidad mientras que hacia el tope se define ambientes más someros. Para la Formación Mito Juan se definen ambientes de aguas salobres a marinas evidenciando un posible relleno de la cuenca (Sutton, 1946).

La **Formación Colón** es de edad Maastrichtiense Temprano (Cushman y Hedberg, 1941; en Sutton, 1963 en González, 1998), se extiende por toda la cuenca de Maracaibo y presenta una litología mayoritaria de lutitas interestratificadas con margas y calizas en menor proporción, las lutitas son mas arenosas hacia la base de la Formación (CIEN, 1997). Según Sutton (1946), esta formación presenta un espesor en la cuenca del lago, en la Sierra de Perijá y en el Río Cachiri de 470 m, y se compone de lutitas microfósilíferas color gris a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas y glauconíticas con capas de calizas y margas subordinadas. Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Maastrichtiense Inferior y posee unos centenares de metros de lutitas grises oscuras. Según Falcón *et al.*, (1993), la formación consiste principalmente de lutitas (100%), posee una edad Campaniense-Maastrichtiense, con un espesor promedio de 650 m.

Esta formación posee un miembro inferior denominado *Miembro Socuy*, el cual Para González de Juana *et al.* (1980) es de edad Maastrichtiense Temprano y posee unos 42 m de calizas margosas. Según Falcón *et al.*, (1993), el miembro consiste principalmente en calizas (100%), posee una edad Campaniense-Maastrichtiense, con un espesor promedio de 52m.

La **Formación Mito Juan** de edad Maastrichtiense Tardío (Cushman y Hedberg, 1941 en Sutton, 1963 en González, 1998), es suprayacente y su contacto es concordante transicional, su litología presenta lutitas grises, y que su contenido arenoso aumenta hacia el tope donde se aprecian algunas capas de calizas y areniscas. Para esta formación se estiman espesores entre 215 a 755 m en Táchira (Sutton, 1946). Según Falcón *et al.*, (1993), la formación consiste en 80% de areniscas y 20% de lutitas, teniendo una edad Campaniense-Maastrichtiense, su espesor promedio es de 230 m. González de Juana *et al.* (1980) exponen que la formación es Maastrichtiense Tardío y posee unos 200 m de arcillas, en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente.

Durante el periodo Campaniense Tardío - Maastrichtiense la regresión marca un cambio de marco tectónico (Figura 2-12) permitiendo la depositación de la Formación Colon (Liddle, 1928 en Parnaud *et al.*, 1995). Este evento termina con el tipo de sedimentación que se desarrollaba hasta la depositación de la Formación Mito Juan (Garner, 1926 en Parnaud *et al.*, 1995) que permite a Parnaud *et al.* (1995) definirla como la secuencia depositacional **K6** (Figura 2-6), perteneciente a la supersecuencia **C** (secuencia de transición entre margen pasivo y margen activo).

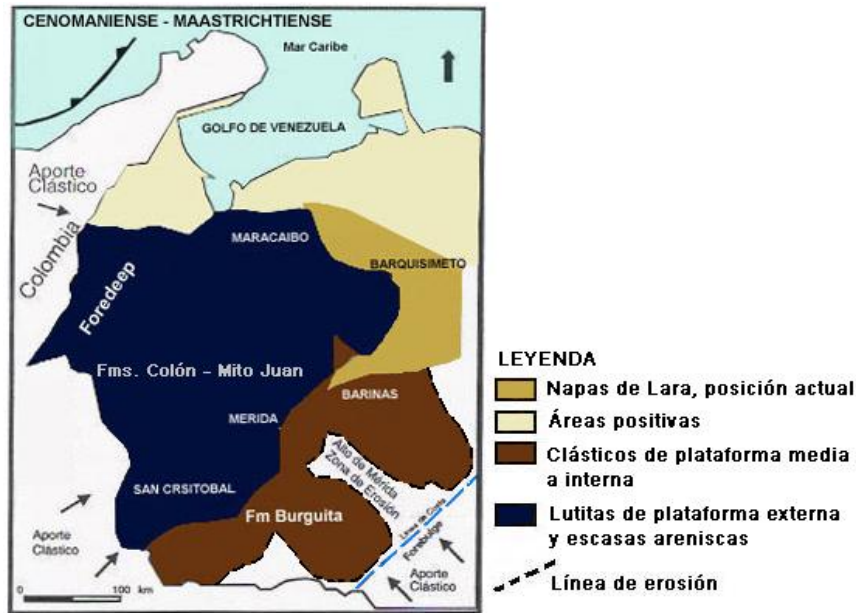


Figura 2-12. Paleogeografía para el Campaniense Tardío – Maastrichtiense en Venezuela. Modificado de González (1998)

Una erosión muy pequeña registrada en el área de Perijá hacia el tope de la secuencia sugiere un leve tectonismo. Para el final del Cretácico y comienzo del Paleoceno, la cuenca *foredeep* de la sierra de Perijá se rellenaba con sedimentos procedentes del oeste.

PALEOCENO-EOCENO MEDIO

El marco tectónico varía considerablemente, según Lugo (1998), en este periodo se produce la colisión de un arco de islas contra el borde occidental de Colombia del Cretácico Tardío al Paleoceno, y posterior emplazamiento de las napas de Caribe en el Occidente de Venezuela del Paleoceno al Eoceno Medio (Figura 2-13), además se produce la formación de una cuenca “foreland” en Venezuela (González, 1998).

Este periodo se caracteriza por la depositación de las Formaciones Guasare en la base de la secuencia, el Grupo Orocué y las Formaciones Marcelina, Trujillo, Mirador, Misoa y Paují.

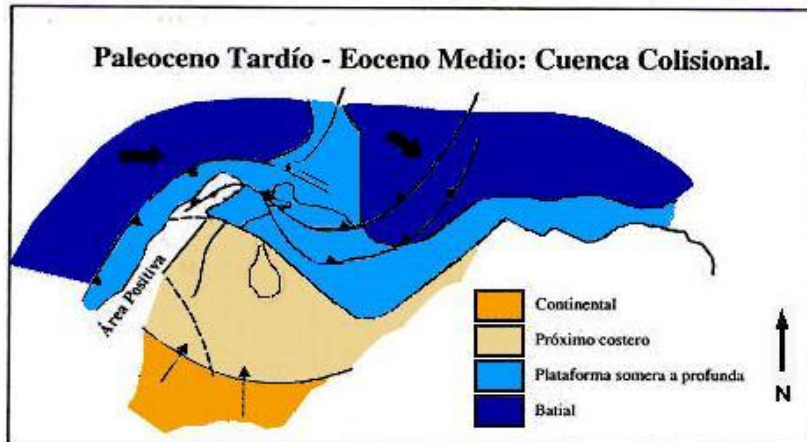


Figura 2-13. Situación tectónica para el Paleoceno Tardío – Eoceno Medio en Venezuela. Modificado de González (1998)

La **Formación Guasare** de edad Paleoceno Inferior, marca el comienzo de la regresión en Venezuela occidental. Esta formación es suprayacente a la Formación Mito Juan y su contacto es concordante y transicional. Presenta en su base lutitas grises oscuras, carbonáceas y micáceas intercaladas con calizas (CIEN, 1997). En menores proporciones se presentan calizas arenosas de color gris con capas delgadas de carbón. El ambiente sedimentario se interpreta como sedimentación marina de plataforma influenciado por un ambiente deltaico hacia la parte SO. La unidad marca el proceso regresivo en ese periodo. González de Juana *et al.* (1980) expone que la formación es Paleoceno-Eoceno Inferior y posee unos 425 m. de calizas fosilíferas, areniscas y lutitas glauconíticas o carbonáceas. Según Falcón *et al.*, (1993), la formación se compone de 50% de calizas, 25% de arenas y 20% de lutitas, teniendo un espesor promedio de 170 m. Según Mendoza (2005), la formación tiene su sección tipo en el río del mismo nombre en la Sierra de Perijá y se extiende como una faja de 50 a 60 km de ancho a lo largo de los contrafuertes de dicha Sierra.

Lateralmente ocurre la depositación del **Grupo Orocué** al oeste de la cuenca de Maracaibo. Esta unidad de roca consiste en una intercalación de lutitas, arcilitas carbonosas con algunas laminaciones de carbón y areniscas de grano grueso con capas de carbón hacia el tope. Para este grupo se interpreta al ambiente sedimentario como deltaico (González de Juana *et al.*, 1980). Según Falcón *et al.*, (1993), el Grupo Orocué consiste en 75% de lutitas, 20% de areniscas y 5% de carbones, teniendo una edad Paleoceno, con espesor promedio de 425 m. Mendoza (2005), expone que el grupo representa una sedimentación deltaica, de unos 500 m a 600 m de espesor, con una intercalación de arcilitas, lutitas y areniscas, alternantes,

con ambientes parálícos con algunas capas de carbón de hasta 3 m de espesor. Esta unidad comprende (de base a tope), a las Formaciones Barco y Los Cuervos.

Según González de Juana *et al* (1980) la **Formación Barco** es Paleoceno-Eoceno Inferior y posee unos 278 m de areniscas y lutitas, y la **Formación Los Cuervos** es Paleoceno-Eoceno Inferior y posee unos 500 m de lutitas con areniscas arcillosas. El paleoambiente para la Formación Barco es deltaico bajo en su parte inferior, a deltaico alto en la parte superior. Las formaciones Barco-Los Cuervos, representan un pulso de ambientes fluvio-deltaicos entre el Paleoceno y el Eoceno medio al oeste de la Cuenca de Maracaibo (Ostos y Yoris, 1997).

La **Formación Marcelina** es suprayacente al Grupo Orocué y es concordante en la zona norte de la Sierra de Perijá. Se caracteriza por la presencia de intercalaciones de areniscas, lutitas y capas de carbón. En la base de la unidad se presentan las areniscas mas gruesas mientras que hacia el tope son más delgadas intercaladas con lutitas grises y algunas capas de carbón. Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Paleoceno-Eoceno Inferior y posee unos 540 m de lutitas oscuras carbonáceas, porcelanitas, areniscas y lechos de carbón. Esta formación según Falcón *et al.*, (1993), consiste en arenas (60%), lutitas (25%), carbón (10%) y margas (5%), teniendo una edad Paleoceno, su espesor promedio es de 380 m.

El conjunto descrito representa la parte final de la supersecuencia C, (secuencia de transición entre margen pasivo y margen activo) correspondiendo a las secuencias depositacionales **K7** y **K8** según Parnaud *et al.*, (1995) (Figura 2-6).

Durante el Paleoceno Tardío, comienza un emplazamiento de las napas de Lara hacia la zona norte del Lago de Maracaibo (Parnaud *et al.*, 1995) (Figura 2-14), luego se emplazaron hacia el este originando una cuenca foreland. Esta deformación genera una serie de ciclos transgresivos y regresivos que se reflejan en las distintas formaciones de la cuenca para el Paleoceno Tardío al Eoceno (Parnaud *et al.*, 1995)

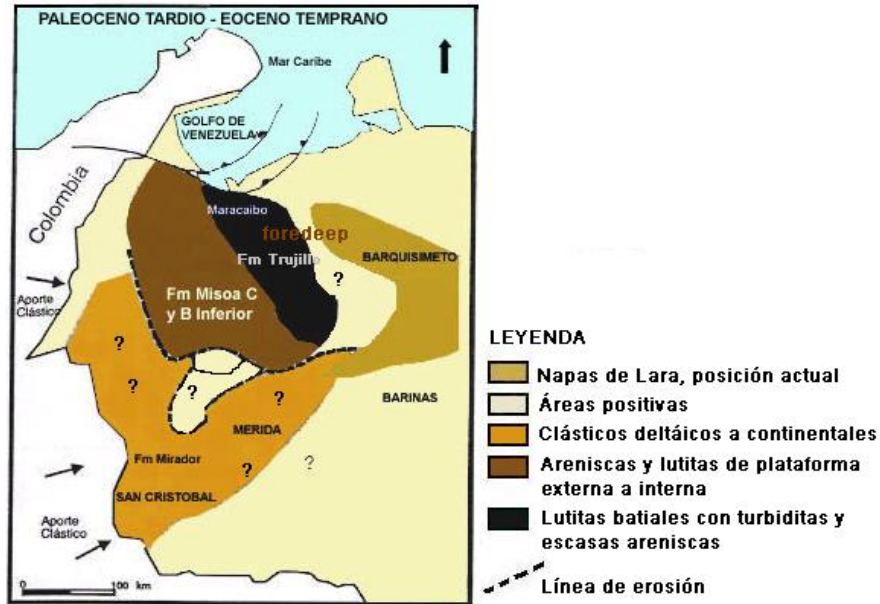


Figura 2-14. Paleogeografía para el Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano en Venezuela. Modificado de González (1998)

La **Formación Trujillo** de edad Paleoceno Tardío se caracteriza litológicamente por la presencia de lutitas oscuras micáceas o carbonáticas, intercaladas con areniscas marrones y grises, hacia la base se observan delgadas capas de carbón (Sutton, 1946). Representa depósitos marinos profundos de la cuenca de antepaís o foreland. Las condiciones marinas al norte de la cuenca de Maracaibo producen una sedimentación de tipo turbidítico (Parnaud *et al* 1995).

La **Formación Mirador** de edad Eoceno Temprano según González de Juana *et al.* (1980) mientras que para Parnaud *et al.* (1995) se establece que la formación se pudo haber depositado entre el Paleoceno Tardío y Eoceno Temprano. Se encuentra suprayacente y discordante a la Formación Guasare donde presenta un hiatus y hacia su tope el contacto es discordante erosivo con las formaciones La Sierra y Ceibote. Se caracteriza por la presencia de areniscas claras y capas de guijarros de composición cuarzosa. El ambiente sedimentario corresponde al de tipo fluvial, con captación de meandros barras y canales (Gonzalez de Juana *et al.* 1980), mientras que para Parnaud *et al.* (1995) se corresponde a una sedimentación de tipo continental en una fase transgresiva de la cuenca ocasionada por la flexura de la plataforma frente a la carga generada por las napas en la zona central de la cuenca de Maracaibo. Según Falcón *et al.*, (1993), la formación consiste en 75% de arenas, 20% de lutitas y 5% de carbón, teniendo una edad Eoceno Inferior, con un espesor promedio de 410

m. Hacia el NO, en dirección del Lago de Maracaibo, esta formación pasa transicionalmente a la facies deltaica-marina de la Formación Misoa.

La secuencia depositacional **T1** (Figura 2-6) corresponde a las Formaciones Mirador y Trujillo dentro de lo que se denomina la supersecuencia **D** o secuencia de cuenca colisional (Parnaud *et al.*, 1995).

La **Formación Misoa** es discordante con la Formación Guasare y otras del Paleoceno, mientras que hacia su tope es concordante con la Formación Paují. Presenta un intervalo de importancia y que abarca gran parte de la cuenca de Maracaibo, parte de los Andes Merideños y La Sierra de Perijá. Se describe al NE con una presencia importante de lutitas y areniscas de grano fino mientras que hacia el sur existe una mayor proporción de areniscas. Las calizas son escasas y se localizan exclusivamente en la base de la sección. El espesor varía adelgazándose hacia el oeste y hacia el sur por el Macizo de Avispa. Hacia la zona norte se preservan espesores de 3000 m. Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es Eoceno Inferior-Medio y posee unos 5000 m de areniscas cuarcíticas y lutitas. Según Falcón *et al.*, (1993), la formación consiste en 75% de arenas, 20% de lutitas y 5% de limos, teniendo una edad Eoceno Temprano, y un espesor promedio de 980 m. Mientras que para Mendoza (2005) esta formación es definida, en general, como una sección de areniscas cuarcíticas de color gris claro con intercalaciones delgadas de lutitas laminadas, micáceas y carbonosas localizada por encima de la Formación Trujillo y por debajo de las lutitas marinas profundas de la Formación Paují.

Esta unidad se ha dividido en el subsuelo del Lago de Maracaibo en los *Miembros B* y *C* (Figura 2-6). Las arenas *C* de la Formación Misoa caracterizan una depositación asociada a un evento transgresivo y luego son solapadas por las arenas *B* que corresponden a un evento transgresivo en su base y luego a un complejo de alto nivel (Parnaud *et al.*, 1995).

Los ambientes de sedimentación son variados y van desde el deltaico alto, en la zona sur y SE; deltaico bajo y marino somero al norte y NE (CIEN, 1997). La secuencia depositacional **T2** corresponde a la Formación Misoa, dentro de la supersecuencia **D** (Figura 2-6).

La **Formación Paují** de edad es concordante de tipo abrupto y transicional en algunas zonas con la Formación Misoa, mientras que su contacto superior es discordante (Parnaud *et*

al. 1995). Se caracteriza por la presencia de lutitas que son fácilmente diferenciables por contener concreciones ferruginosas y calcáreas (CIEN, 1997). La sedimentación de la Formación Paují se da en una transgresión marina de este- NE solapando la Formación Misoa.

Durante el Eoceno Medio se presentan dos eventos que modifican la configuración de la cuenca. En primer lugar el emplazamiento final de las napas de Lara hacia el sur, generando subsidencia por flexura de la plataforma de la cuenca Barinas-Apure, generando una inundación marina (Figura 2-15), evidenciado hacia el tope de la Formación Paují representando la secuencia depositacional T3 (Figura 2-6) (Parnaud *et al*, 1995). El segundo de estos genera una línea de bisagra en la plataforma del lago de Maracaibo hacia el NE producto de la carga de las napas de Lara, permitiendo la depositación de las arenas B de la Formación Misoa y luego la depositación por condiciones de batimetría de la secuencia de la Formación Paují.

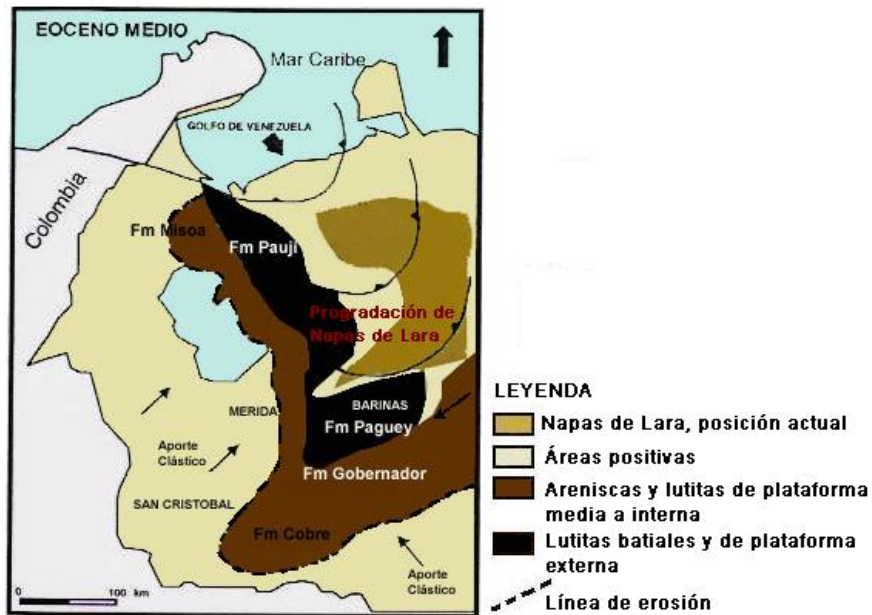


Figura 2-15. Paleogeografía para el Eoceno Medio en Venezuela. Modificado de González (1998)

EOCENO TARDÍO-PLIO PLEISTOCENO

Según Ostos y Yoris (1997), durante el Eoceno, en la cuenca del Lago de Maracaibo, el régimen sedimentario está caracterizado por sistemas deltaicos-estuarinos, fluvio-costeros y marinos, en diferentes áreas geográficas delante de los frentes de corrimiento, ya sea el de Perijá o el relativamente más joven del Estado Lara, hacia el este. Para Parnaud *et al*. (1995), la secuencia depositacional de este periodo de tiempo representa la secuencia E (Figura 2-6),

o secuencia de cuenca colisional. Según Lugo (1998), en el Eoceno Tardío y en el Mioceno Medio, se produce un régimen transpresivo, el cual es manifestado sedimentariamente por un relleno al oeste de la falla de Icotea y al este de la falla de Pueblo Viejo. Estos rellenos serían consecuencia del movimiento transcurrente a lo largo de las fallas de Pueblo Viejo e Icotea (González, 1998).

Durante este periodo se depositan las Formaciones La Sierra, y las Formaciones Ceibote, Peroc, Macoa y Cuiba pertenecientes al Grupo El Fausto, además de las Formaciones Los Ranchos, La Villa y El Milagro.

La **Formación La Sierra**, tiene edad Eoceno Tardío por correlación estratigráfica con la Formación Carbonera (Kuyl *et al.*, en CIEN, 1997) mientras que Parnaud *et al.* (1995) estima la edad Eoceno Tardío a Oligoceno Temprano, finalmente Gonzalez de Juana *et al.* (1980) estima la edad en Oligoceno. Presenta una litología predominante de areniscas pardas, macizas en capas gruesas a medianas, intercaladas con lutitas arenosas, limolitas y ocasionalmente conglomerados, lignito y capas de carbón (Gonzalez de Juana *et al.* 1980 y CIEN, 1997).

La unidad se pudo dividir en tres miembros identificados como Los Tanques, Caña Brava y Rincón (Miller y San Juan, 1963) La parte basal de la Formación es predominantemente arenosa, presencia de areniscas masivas y escogimiento pobre. Como estructuras sedimentarias se aprecia la estratificación cruzada y se conoce con el nombre de *Miembro Los Tanques*. El miembro central *Caña Brava* posee intercalaciones de lutitas y areniscas en capas delgadas, además se observan algunos lentes de calizas y capas de lignito (Miller y San Juan, 1963). El último miembro denominado *Miembro Rincón* presenta un conjunto de areniscas con estratificación cruzada, lutitas grises. Los contactos de la Formación La Sierra son discordantes en la base y el tope. En el tope tiene contactos discordantes con las Formaciones La Quinta, Colon, Guasare, Marcelina, Mirador y Misoa, mientras que para la parte superior tiene contactos con la Formación Ceibote del Grupo El Fausto, aunque hacia el sur las unidades pasan a ser concordantes y lateralmente gradan a la Formación Carbonera (Miller y San Juan, 1963; Parnaud *et al.*, 1995 y CIEN, 1997)

El ambiente sedimentario varía de acuerdo de los miembros. Para el primero se define un ambiente de playas transgresivas, mientras que para el segundo se propone un ambiente de

estuarios y lagunas costeras e islas de barrera, que para el periodo de sedimentación del Miembro El Rincón se rellenaron por sedimentos deltaicos.

El marco tectónico presente durante la depositación de la Formación La Sierra presenta desarrollos de relieves positivos que dividen la cuenca de Falcón y Maracaibo, otros levantamientos al oeste y sur de Perijá y la Cordillera colombiana Oriental sirvieron como fuente al sistema fluvio-deltaico (Figura 2-16). Para este periodo se reconoce, según Parnaud *et al.* (1995), la secuencia depositacional **T4** (Figura 2-6) constituida en su base por la Formación La Sierra y la Formación Carbonera. Además la secuencia **T4** forma parte de la secuencia **E** o secuencia de cuenca colisional.

El **Grupo El Fausto** está constituido por las formaciones Ceibote, Peroc, Macoa y Cuiba. La litología presente en el Grupo El Fausto en su base consiste en areniscas masivas con pobre escogimiento y algunas capas delgadas de arcillitas intercaladas. Hacia el tope el Grupo presenta un carácter más arcilloso (CIEN, 1997). La edad se establece en Oligoceno-Mioceno Tardío. También para este grupo los ambientes sedimentarios varían de base a tope, empezando en la base con un ambiente continental con presencia de abanicos aluviales mientras que hacia el tope los ambientes varían a sedimentación de tipo lagunar (*Formación Peroc*) y evolucionar en ambientes con más presencia marina como se evidencia en la *Formación Macoa*, que responde a un ciclo transgresivo en el lago de Maracaibo, finalmente la *Formación Cuiba* presenta una depositación de aguas salobres en planos costeros (CIEN, 1997). Para González de Juana *et al.* (1980) el Grupo El Fausto es Oligoceno-Mioceno y posee unos 2945 m de arcillitas, capas ocasionales de arenisca, y capas de lignito. Según Falcón *et al.*, (1993), esta unidad consiste en lutitas (70%), limos (20%), carbón (5%) y arenas (5%), teniendo una edad Oligoceno-Mioceno, con un espesor promedio de 820 m. Para Ostos y Yoris (1997), en la Sierra de Perijá, el Grupo El Fausto es la unidad molásica, relacionada con los frentes de deformación en el límite occidental de la Cuenca de Maracaibo.

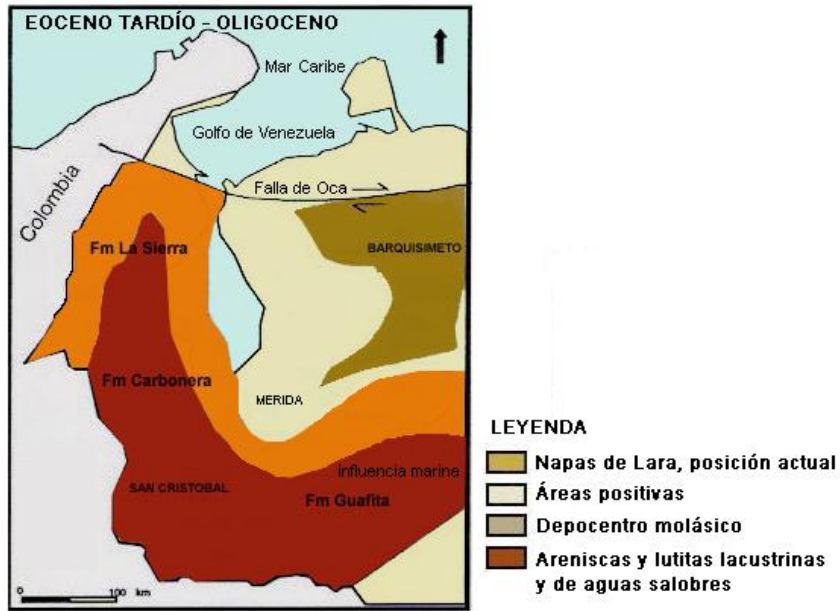


Figura 2-16. Paleogeografía para el Eoceno Tardío - Oligoceno en Venezuela. Modificado de González (1998)

Parnaud *et al.*, (1995) establecen que la base del Grupo El Fausto está definido por la Formación Ceibote que representa el tope de la secuencia depositacional **T4**, suprayacentes se encuentra la secuencia depositacional **T5** que son características en la Sierra de Perijá por las Formaciones Peroc y Macoa (Figura 2-6).

La **Formación Los Ranchos** es suprayacente al Grupo el Fausto y tiene edad Mioceno Medio. La litología se presenta como areniscas en un 60% y el resto lo conforman lutitas y en cantidades menores limolitas y algunas areniscas conglomeráticas (CIEN 1997). Se define un ambiente sedimentario de laguna costera de aguas salobres con influencia de sedimentación subaérea, esta unidad es concordante y transicional con la Formación La Villa (CIEN 1997). Para González de Juana *et al.* (1980) la formación es de edad Mioceno y posee unos 1500 m de areniscas, arcillitas, limolitas y conglomerados. Según Falcón *et al.*, (1993), la formación consiste en 65% de arenas, 30% de lutitas, y 5% carbón, teniendo una edad Mioceno, su espesor promedio es de 720 m. Para Mendoza (2005), esta formación se compone litológicamente de más de un 50% de areniscas color marrón ferroso y el resto son mayormente arcillitas color gris muy claro, con un espesor total de unos 1.500 m y carente de fósiles, excepto restos de plantas carbonizados.

La **Formación La Villa** es de edad Mioceno Tardío y esta en contacto transicional con la Formación Los Ranchos y su contacto superior es discordante angular con la Formación El

Milagro (CIEN, 1997). Tiene como litología predominante arcillas y areniscas de grano fino, mal escogidas y a veces conglomeráticas, se observan esporádicamente estructuras sedimentarias como la estratificación cruzada (Gonzalez de Juana *et al.*, 1980 y CIEN, 1997). Según Mendoza (2005), es la más joven de la región plana al este de La Sierra de Perijá, y en la sección tipo predominan las areniscas sobre las arcillitas y limolitas.

La **Formación El Milagro** es de edad Plio-Pleistoceno y se encuentra en discordancia angular con la Formación La Villa, su litología se caracteriza por arenas finas a gruesas muy micáceas interestratificadas con arcillas arenosas, lentes lateríticos y nódulos de hierro en algunos horizontes (Gonzalez de Juana *et al.*, 1980 y CIEN, 1997). El ambiente sedimentario se enmarca en depósitos de aguas dulces y llanas. Graf (1969) define un ambiente de tipo fluvial y paludal sobre un plano costero (CIEN, 1997).

Durante el Mioceno Medio se inicia un periodo de tectonismo compresivo que afecta el Macizo de Santander, Sierra de Perijá y la cadena de los Andes Merideños. Esta influencia tectónica se puede correlacionar con las secuencias **T6** y **T7** (Figura 2-6), representadas por la Formación Cuiba perteneciente al tope del Grupo El Fausto y las Formaciones Los Ranchos, la Villa y El Milagro. Estas formaciones forman parte de la supersecuencia **F** o secuencia de cuenca colisional, definidas por Parnaud *et al.* (1995).

Según Ostos y Yoris (1997), el final del Oligoceno y comienzo del Mioceno, está relacionado a importantes períodos de levantamientos y formación de montaña. Durante este lapso se produjo la generación de cuencas de tipo extensional y de tipo antepaís; estas últimas, reciben la influencia de la orogénesis andina en Colombia y Venezuela. Para Lugo (1998), se produce el levantamiento de la Sierra de Mérida y Perijá desde el Oligoceno al Plioceno (González, 1998). Según Duerto (1998), en el segundo pulso tectónico desde el Mioceno al Plioceno se produce un levantamiento generalizado, el cual deformó a los sectores de Perijá Sur y Central con el desarrollo de una zona triangular de bajo buzamiento con despegue en la Formación Colón. Luego en un tercer periodo en el Pleistoceno se produce un desplazamiento de aproximadamente 6 km a lo largo del corrimiento de Los Motilones, permitiendo que con esta deformación ocurran fallamientos con vergencia hacia el este.

CAPITULO III

3. Fundamentos de Percepción Remota

3.1. Conceptos Generales

Para la mejor comprensión de nuestro tema a tratar, es necesario primero definir algunos términos básicos, los cuales son:

- **Imagen**, en nuestro contexto hará referencia a la representación de la superficie de la tierra, obtenida a través de medios ópticos, electro-ópticos, óptico-mecánicos o eléctricos, registrando en forma digital, la radiación reflejada o emitida por los objetos sobre esa superficie (Alzate, 2001).

- **Percepción remota o teledetección**, es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, en nuestro caso se trata de objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. Esta interacción va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Dicha radiación es la de la energía de los fotones (componentes de la luz), que emanan de materiales distantes, los cuales pueden identificarse y ser categorizados de acuerdo a su clase/tipo, sustancia y su distribución espacial (Alzate, 2001).

- **Sensores remotos**, son los dispositivos que permiten la referenciación a distancia de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Estos son de diferentes tipos, de acuerdo con los principios básicos de diseño, su forma de registrar los datos y la fuente de energía que emplean. Pueden ser cámaras, radares, barredores ópticos, óptico-mecánicos, eléctricos, etc. (Alzate, 2001).

- **Las plataformas**, son los vehículos o sitios donde se transportan los sensores. Pueden ser plataformas satelitales o plataformas aéreas (Alzate, 2001).

- **Los sistemas de teledetección**, son un conjunto de elementos que se interrelacionan para realizar la adquisición de los datos a través de los sensores como cámaras o barredores, que además constan de diversos dispositivos como lentes,

espejos, antenas, motores, detectores, con los cuales realizan la toma en diferentes direcciones, con distintas formas de barrido y mecanismos de detección y referencia (Alzate, 2001).

• **Proceso *repercepción remota***, el sistema de percepción remota consta de componentes que se interrelacionan, tal como se muestra en la Figura 3-1

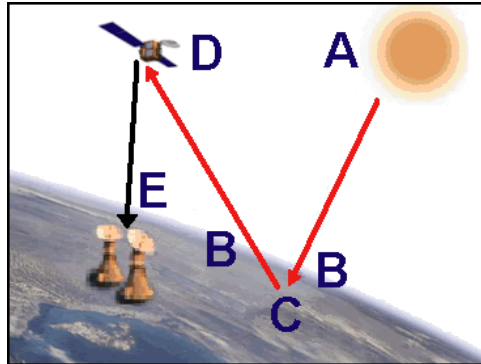


Figura 3-1. Proceso de la percepción remota. Modificado de:
<http://img145.imageshack.us/img145/1962/beidou1dw.gif>

- A. *Fuente de Energía*, es la que da origen al flujo energético que es detectado por el sensor (Alzate, 2001).
- B. *Radiación y la atmósfera*, para que la energía vaya de la fuente hacia el objeto, necesita atravesar e interactuar con la atmósfera. Esta interacción también sucederá cuando la energía retorne de vuelta desde el objeto al sensor (Alzate, 2001).
- C. *Interacción con el objeto de interés*, cuando la energía llega a la tierra interactúa con el objeto de interés, conformado por las diferentes coberturas de la tierra (superficie terrestre, atmósfera, océano), esta interacción se da en forma de algún fenómeno (reflexión, emisión, absorción) (Alzate, 2001).
- D. *Sistema del sensor*, es el que capta, codifica y graba la radiación que devuelve el objeto en tierra, sin estar en contacto con él. Después envía al sistema de recepción en tierra, la energía grabada (Alzate, 2001).
- E. *Transmisión, recepción y procesamiento*, aquí los datos recibidos en forma digital, son preprocesados para obtener una imagen, bien sea en papel o en medio digital. Luego de este paso la imagen es interpretada, de forma visual o

procesándola adicionalmente a través de técnicas digitales, para llegar al elemento final del proceso, el cual consiste en realizar aplicaciones con la información temática que se extrae de la imagen, entendiendo el comportamiento de los objetos que fueron censados allí, para la solución de algún problema en particular (Alzate, 2001).

3.2. Breve Historia de la Percepción Remota

Puede decirse que la teledetección, como tecnología, se inició con la aparición de las primeras fotografías, siendo la cámara fotográfica uno de los dispositivos más conocidos que ha servido como un primer sensor remoto por más de 150 años. Este dispositivo captura un “retrato” de objetos exteriores a ella, concentrando a través de un lente la radiación electromagnética (normalmente, la luz visible) en un medio (película) capaz de desplegar los objetos y sus posiciones relativas por variaciones en su brillo de los niveles grises (blanco y negro) o los tonos de colores (Alzate, 2001).

Durante la primera Guerra Mundial, cámaras montadas en aviones proporcionaron vistas aéreas de la superficie bastante grandes que aportaron al reconocimiento militar. Desde entonces hasta principio de los años sesenta, la fotografía aérea seguía siendo la única herramienta estándar para representar la superficie desde una perspectiva vertical u oblicua (Alzate, 2001).

La teledetección desde cohetes tuvo sus orígenes durante los primeros días de los programas espaciales rusos y americanos. Comenzó tomando imágenes de la superficie, usando varios tipos de sensores de plataforma espacial. Por el año 1946, se lanzaron unos cohetes V-2 adquiridos de Alemania después de la Segunda Guerra Mundial (Figura 3-2). Fueron lanzados desde Arenas Blancas en Nuevo México. Estos cohetes, mientras no alcanzaban la órbita, mantenían cámaras fotográficas con películas, las cuales sacaban fotos durante el ascenso (Alzate, 2001).

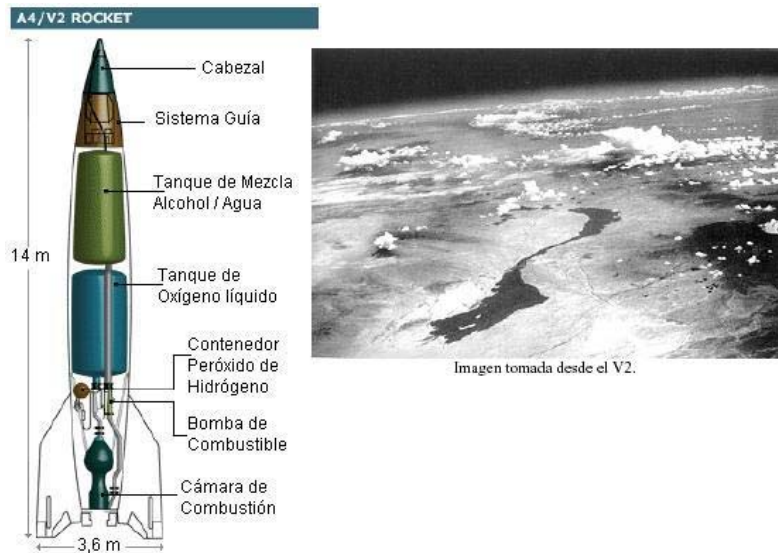


Figura 3-2. Cohete V-2 e imagen tomada por el mismo. Modificado de <http://www.v2rocket.com>

Durante los años setenta, los primeros sensores de imágenes sofisticados fueron incorporados en satélites de órbita. Al principio, éstas eran cámaras básicas de televisión que tomaban un gran detalle de cuadros en blanco y negro con acercamientos a la superficie de la tierra (Alzate, 2001).

Después se desarrollaron otros tipos de sensores multiespectrales que captaban datos más allá del rango visible en ambos rangos del infrarrojo: cercano y termal. Los campos de visión (FOV – “field of vision”) eran de un ancho de 100 kilómetros. Tales áreas sinópticas, eran de gran valor para la comunidad meteorológica. Muchos de estos satélites tempranos fueron “Metsats” (satélites meteorológicos) dedicados a recoger información sobre nubes, temperaturas del aire, patrones de viento, etc. (Alzate, 2001).

La primera fotografía multiespectral, hecha desde el espacio, fue durante la misión tripulada “Apolo 9” en 1968 (Figura 3-3). Cuatro cámaras estaban montadas en una base de tal forma, que todas apuntaban al mismo punto cuando sus disparos eran activados simultáneamente (Alzate, 2001).

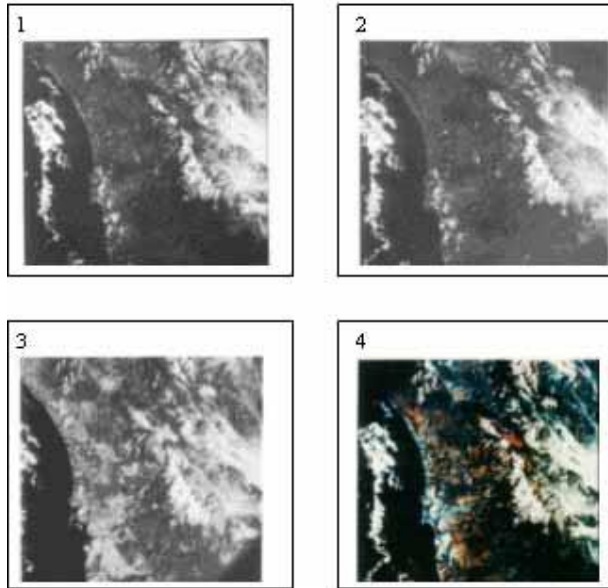


Figura 3-3. Primera fotografía multiespectral del sur de California, tomada por la misión Apolo 9 en 1968. Se observan tres fotos en filtro blanco y negro, tomadas en las bandas foto1-verde, foto2-rojo, foto3-bandas del IR, y foto4-falso color de IR generada por la combinación de las bandas 1,2 y 3. Tomado de <http://www.gisdevelopment.net/technology/rs/techrs26pf.htm>

El valor de la fotografía multiespectral fue rápidamente reconocido por los científicos de diversas disciplinas, particularmente geólogos, hidrólogos, agrónomos, forestales y aquellos relacionados con el monitoreo del medio ambiente y valoración de su uso y cobertura (Alzate, 2001).

3.2.1. *Landsat, el barredor Multiespectral (MSS)*

El 23 de julio de 1972 fue realizado el lanzamiento del ERTS-1 (satélite de tecnología de recursos de la tierra), siguiéndole el 22 de julio de 1975, el lanzamiento del ERTS-2. Este programa, posteriormente renombrado LANDSAT, consta de una serie de satélites observadores de la tierra, los cuales han permitido la cobertura continua de gran parte de la superficie de la tierra. El último de ellos fue el Landsat-7 (Figura 3-4), puesto en órbita en abril de 1999 (Alzate, 2001).



Figura 3-4. Satélite Landsat 7. Tomado de <http://library01.gsfc.nasa.gov/gdprojs/images/landsat7.jpg>

Los primeros dos LANDSAT soportaron dos sistemas de sensores. El RBV (Return Beam Vidicom), que consistió en tres cámaras de televisión, que usaron filtros de color para proveer bandas multiespectrales centradas en azul – verde, amarillo – rojo y rojo – IR. Este sensor falló rápidamente en el primer ERTS y nunca llegó a ser de uso rutinario (Alzate, 2001).

El segundo instrumento fue el MSS (barredor multiespectral), que fue operado sobre todas las plataformas espaciales LANDSAT. Un sensor de imágenes multiespectrales más sofisticado, llamado TM (Thematic Mapper), fue adicionado al Landsat-4 en 1982, al Landsat-5 en 1984 y al Landsat-6 en 1993. Otro más sofisticado aún, el ETM+, fue adicionado al Landsat-7. El Landsat-6 presentó fallas y nunca se obtuvieron datos con él (Alzate, 2001).

En la Figura 3-5 se observa el rango del espectro electromagnético para cada una de las 7 bandas del satélite Landsat 7.

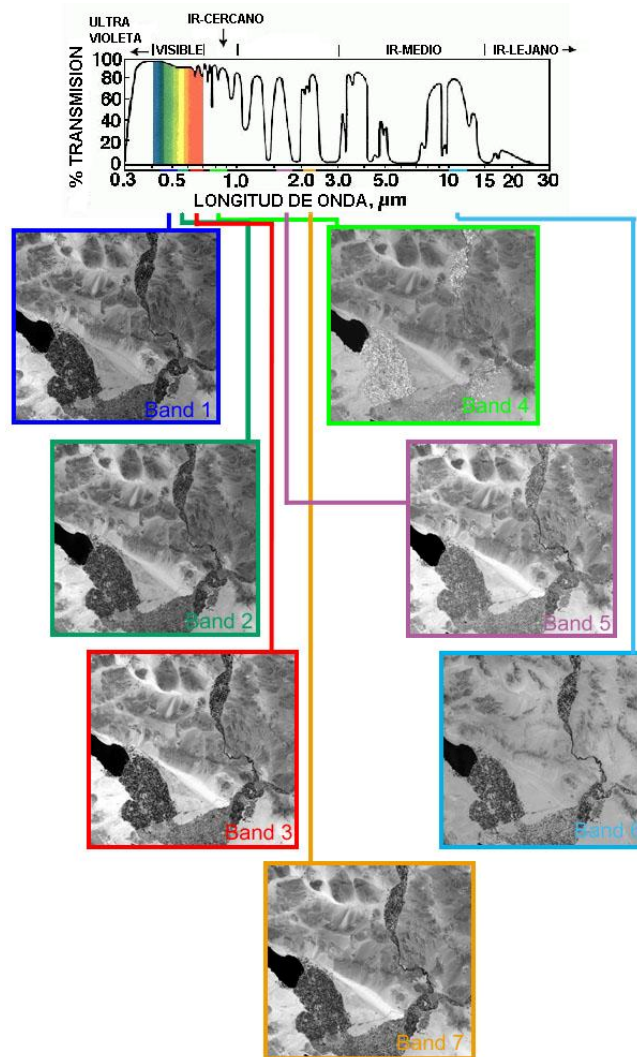


Figura 3-5. Regiones del espectro electromagnético para las bandas del Landsat 7. Modificado de http://landsat.gsfc.nasa.gov/education/compositor/graphics/spectrum_chrt.jpg

3.2.2. Spot y otros sistemas de Percepción Remota Satelital

Otro gran aporte para la detección de la radiación fue realizado con el barredor pushbroom del SPOT, lanzado en 1986. La India también ha operado exitosamente muchos satélites de recursos de la tierra que recogen datos en el rango visible y en el infrarrojo cercano (Alzate, 2001).

También, otro gran avance lo han hecho las imágenes hiperespectrales, que permiten el muestreo continuo de intervalos de muchas gamas del espectro. El laboratorio de propulsión Jet (JPL) ha producido dos sensores hiperespectrales, uno conocido como AIS (Airbone Imaging Spectrometer), que voló en 1982, y el otro

llamado AVIRIS (Airbone Visible Infrared Imaging Spectrometer), puesto en funcionamiento en 1987 (Alzate, 2001).

Otra clase de sensores remotos satelitales o aerotransportados son los sistemas de RADAR. Entre los sistemas que operan se encuentran el RADARSAT de Canadá, el ERS-1 y ERS-2, manejados por la agencia espacial europea y el JERS-1 y JERS-2 manejados por Japón (Alzate, 2001).

3.3. Principios Básicos de la Percepción Remota

Existen dos componentes básicos el sistema de los sensores remotos: fuente de energía y ruta de transmisión objetivo y sensor. Ellos trabajan juntos para medir y registrar la información acerca del objetivo sin entrar en contacto físico con él. Para que esto suceda *algo* debe actuar como medio para transmitir la información desde el objetivo hasta el sensor. Para la teledetección terrestre, en la mayoría de los casos, ese *algo* es la energía electromagnética. La energía electromagnética existe en las muchas formas, como lo son: ***Ondas de radio, Microondas, Calor, Rayos ultravioleta, Rayos x, Rayos gamma, Luz visible*** (Alzate, 2001).

Cada una de estas formas describe la energía en una región específica del espectro electromagnético (Figura 3-6), el cual representa la continuidad de la energía electromagnética desde longitudes de onda extremadamente corta (rayos cósmicos y rayos gamma) a longitudes de onda extremadamente largas (radio y televisión). Los nombres en el espectro electromagnético han sido asignados a regiones en las cuales las longitudes de onda adyacentes se comportan en forma similar, o son generadas por mecanismos similares. Sin embargo la división entre estas regiones no es definida exactamente, ni súbitamente, una región se confunde con la otra (Alzate, 2001).

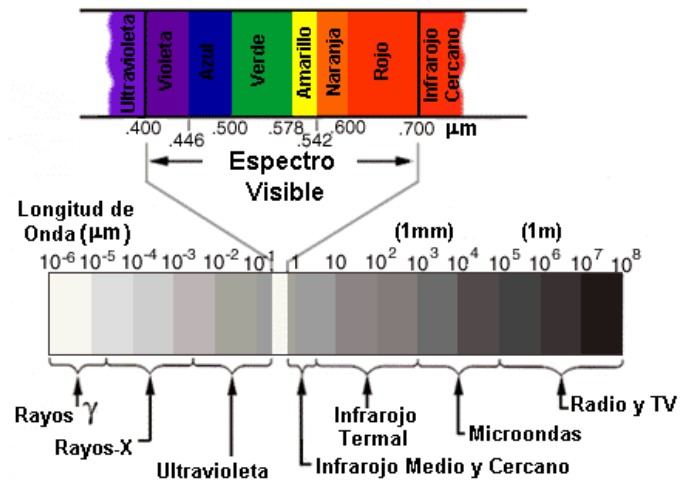


Figura 3-6. Rangos del espectro electromagnético. Modificado de: <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/imagenes/spectrum.gif>

3.3.1. Fuentes de Energía en Percepción Remota

La fuente de una vasta mayoría de esta radiación reflejada es el sol. La fuente de energía más a menudo usada para iluminar los objetivos naturales es la irradiación solar. A pesar de que el sol es la fuente de energía electromagnética más común, que se mide en teledetección terrestre, no es la única fuente de energía que se puede encontrar. Toda materia a temperatura mayor que el cero absoluto (0 grados kelvin) continuamente emite radiación electromagnética. Generalmente, entre más caliente sea un objeto, más irradia energía (Alzate, 2001).

La teledetección usa energía electromagnética de fuentes naturales y hechas por el hombre. Esas fuentes de energía naturales son denominadas *fuentes de energía pasivas*. Las fuentes de energía humanas, son denominadas *fuentes de energía activa* (Alzate, 2001).

La energía solar (incluidos: infrarrojo, visible, ultravioleta, rayo-x y gamma) y el calor radiante (detectable como el infrarrojo lejano) son ejemplos de fuentes de energía pasivas. El radar es ejemplo de fuentes de energía activas. El radar usa su propia energía y por ello tienen la capacidad de enviar una señal fuerte, garantizando un retorno fuerte desde el cuerpo. La ventaja de usar la energía de las microondas es que pasa a través de las nubes y que la luz solar no es necesaria, por lo tanto las imágenes pueden ser tomadas de noche y bajo condiciones de mal tiempo (Alzate, 2001).

3.3.2. Interacción de la Energía Incidente con la atmósfera de la Tierra

La modificación atmosférica de la radiación electromagnética entrante y saliente incluye tres procesos, los cuales modifican físicamente la dirección y penetración de la radiación electromagnética, en el momento en que pasa a través de la atmósfera (Alzate, 2001). Estos procesos son:

A. *Dispersión*

Es el redireccionamiento de la energía electromagnética por partículas suspendidas en la atmósfera (contaminación, polvo) o por moléculas grandes de gases atmosféricos (dióxido de carbono, ozono, gas nitrógeno). Este redireccionamiento de la luz puede ser en cualquier dirección. La dispersión normalmente direcciona la luz reflejada fuera del campo de visión del sensor, disminuyendo el detalle espacial (imagen borrosa). Existen tres tipos básicos de dispersión (Alzate, 2001):

- *Dispersión de Rayleigh*: es consecuencia de la interacción de la radiación con moléculas de los gases atmosféricos y con otras partículas pequeñas de diámetro mucho menor que la longitud de onda de la radiación con la que interaccionan. Se da en la atmósfera superior. El “azul del cielo” se debe a este efecto: en ausencia de él el cielo aparecería negro, pero como la atmósfera dispersa sobretodo las cortas longitudes de onda (como el azul en el rango de espectro visible) el cielo nos aparece azul. La dispersión de Rayleigh es una de las causas primarias de nebulosidad en muchas imágenes que ven así reducida su nitidez o contraste (Bense, 2007).
- *Dispersión de Mie*: es una dispersión en la parte inferior de la atmósfera, entre 0 y 5 km. Se produce cuando los diámetros de las partículas atmosféricas son esencialmente iguales a la longitud de onda de la radiación (vapor de agua, polvo fino, contaminación, etc.) y tiende a influenciar la radiación de longitudes de onda mayores que las afectadas por la dispersión de Rayleigh (Bense, 2007).
- *Dispersión no-selectiva*: constituye un fenómeno mucho más molesto que los anteriores y se produce cuando los diámetros de las partículas que producen la dispersión son mucho mayores que las longitudes de onda con que interaccionan. Un ejemplo típico lo constituyen pequeñas gotas de agua con diámetros comprendidos entre 5 y 100 μm que dispersan en igual forma todas

las radiaciones en las regiones visible e IR cercano y medio. Al ser su dispersión no selectiva respecto a la longitud de onda ocurrirá que en el espectro visible se dispersan en igual proporción las radiaciones azules, verde y rojas, con la consecuencia de que las nubes y la niebla aparecen blancas (Bense, 2007).

B. Refracción

Es la desviación de la luz. Sucede cuando la luz pasa a través de dos medios con diferente densidad (capas atmosféricas). Produce el aminoramiento de las *firmas espectrales* (de lo cual se hablará más adelante) en días húmedos y calientes, debido a que esta densidad en las capas atmosféricas se altera (Alzate, 2001).

C. Absorción

Las moléculas de aire absorben la luz y provocan atenuación sobre el haz luminoso, por tanto, esto hace que no llegue toda la luz al receptor. La absorción depende de la longitud de onda. Es causada principalmente por tres gases atmosféricos (Alzate, 2001):

- Ozono, absorbe los rayos ultravioleta.
- Dióxido de carbono, en la atmósfera interior absorbe energía en la región de los 13 - 17.5 micrómetros.
- Vapor de agua, absorbe en las porciones del espectro entre 5.5 y 7 micrómetros, y también por encima de los 27micrómetros.

D. Ventanas atmosféricas

Son porciones del espectro electromagnético que pueden pasar a través de la atmósfera con poca o ninguna atenuación (Figura 3-7). La mayoría de los sensores remotos fueron seleccionados para operar en una o más de esas ventanas, y hacen sus mediciones usando detectores calibrados para ciertas longitudes de onda específicas, que pasan a través de la atmósfera (Alzate, 2001).

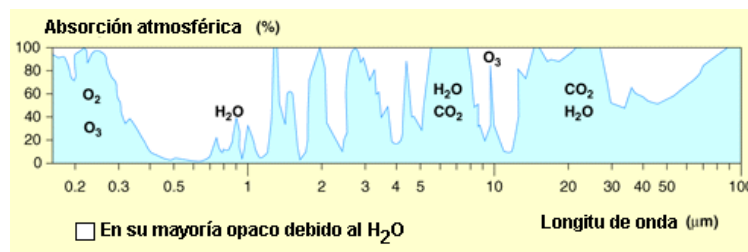


Figura 3-7. Ventanas atmosféricas. Modificado de <http://www.eduspace.esa.int/subtopic/images/07-atmosvindue.gif>

3.3.3. Interacción de la Energía Incidente y los elementos de la superficie de la Tierra

Las ondas electromagnéticas son irradiadas a través del espacio, desde alguna fuente. Cuando la energía encuentra un objeto (Figura 3-8), una de tres reacciones ocurre (Alzate, 2001):

- La radiación será *absorbida* por el objeto
- La radiación será *transmitida* a través del objeto
- La radiación será *reflejada* fuera del objeto

La cantidad total de radiación que golpea un objeto es llamada radiación incidente y es igual a la radiación reflejada más la absorbida más la transmitida (Alzate, 2001).

La teledetección espacial se involucra en buena parte con la radiación reflejada. Esta es la radiación por la cual podemos ver colores, los filmes infrarrojos registran la vegetación y las imágenes de radar de la tierra son creadas (Alzate, 2001).

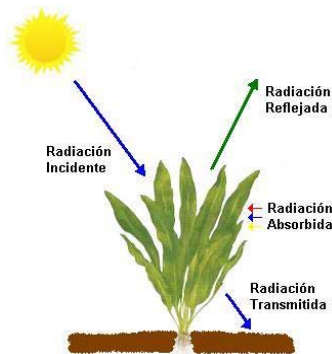


Figura 3-8. Interacción de la radiación con los elementos de la superficie terrestre.

A. Absorción

En la naturaleza, los colores que conocemos son todos reflejados por la luz blanca del sol, así un objeto que es golpeado por un haz de luz absorbe todos los colores y refleja el color del espectro correspondiente a la onda emitida por el pigmento que posee en su superficie (Alzate, 2001).

B. Transmisión

Es el movimiento de la luz a través de una superficie que depende de la longitud de onda. Cuando la radiación es transmitida no sufre atenuación. La transmitancia es la

cantidad proporcional de la radiación incidente pasando a través de una superficie. Las hojas de las plantas pueden transmitir cantidades significativas de la radiación infrarroja, pero no pueden transmitir así mismo la luz visible (Alzate, 2001).

C. Reflexión

Es el retroceso de la energía electromagnética desde una superficie. La reflectancia es el cociente de la cantidad de radiación electromagnética reflejada desde una superficie sobre la cantidad que originalmente chocó con la superficie. Esta definición implica que algo de la energía que choca no es reflejada, pues puede ser transmitida o absorbida. Hay dos tipos de reflectancia, dependiendo del tamaño de las irregularidades de la superficie y en relación con la longitud de onda incidente (Alzate, 2001), estas son:

- *Reflectancia especular*: es la reflexión de las superficies lisas, en relación con la longitud de onda incidente. La luz es reflejada en una dirección única. La reflectancia especular ayuda y dificulta la teledetección dependiendo de dónde el sensor es situado en relación con la radiación saliente (Alzate, 2001).
- *Reflectancia difusa*: la superficie es rugosa en relación con la longitud de onda incidente. La energía es reflejada (dispersa) en todas las direcciones (Alzate, 2001).

Si la reflectancia se mira con respecto a la longitud de onda, ésta es llamada *reflectancia espectral*. Una consideración básica de sensores remotos es que la reflectancia espectral es única y diferente de un objeto a otro (Alzate, 2001).

3.3.4. Reflectancia Espectral (*Firmas Espectrales*)

Todos los elementos de la naturaleza tienen una firma espectral (Figura 3-9). Si se detecta esa firma espectral, se pueden separar los objetos y obtener una visión del tamaño general y forma de ellos. Estas firmas espectrales cambian en el tiempo y el espacio. En la percepción remota es necesario caracterizar los objetivos de la superficie, basados en perfiles espectrales que disminuyen el error en la identificación (Alzate, 2001).

Cualquier material, dado la cantidad de radiación que es reflejada (absorbida o transmitida) variará con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia permite que diferentes sustancias puedan ser identificadas y separadas por su firma espectral. Debido a esto, en algunas longitudes de onda las areniscas pueden reflejar más luz que la vegetación verde, pero en otras absorbe más luz que la vegetación, la cual refleja (Alzate, 2001).

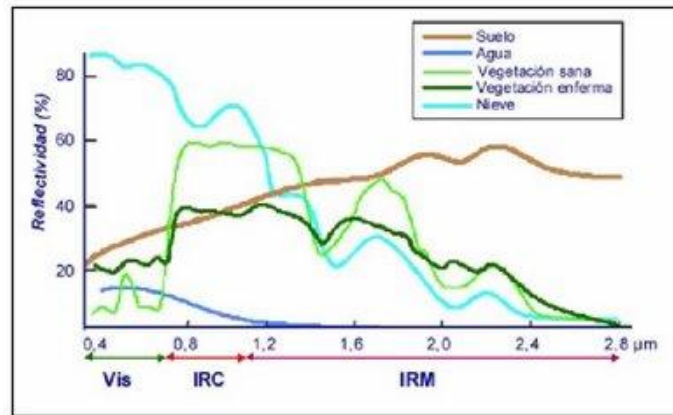


Figura 3-9. Firma espectral para distintos tipos de cubiertas. Tomado de: <http://fanpaulieb.blogspot.com/>

Todos los elementos tienen propiedades de reflexión y absorción en distintas bandas del espectro electromagnético. Estos elementos también emiten ondas de acuerdo con una proporción característica de la longitud de onda y con las propiedades térmicas (Alzate, 2001).

La reflectancia de la vegetación es usualmente relativamente baja en la región visible (Figura 3-10). Esta baja reflectancia se atribuye a la elevada absorción de los pigmentos vegetales, principalmente clorofila. Estos pigmentos, sin embargo, son altamente transparentes a la radiación IR, y la elevada reflectancia en dicha región estaría determinada por la estructura interna de la hoja. Los mínimos de reflexión a 1,45, 1,95 y 2,5 µm corresponden a la elevada absorción de las moléculas de agua presentes en la hoja (Bense, 2007).



Figura 3-10. Firma espectral para vegetación. Modificado de: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>

El agua absorbe intensamente en el IR cercano, los cuerpos de agua aparecerán en dicha región como cuerpos oscuros, facilitando su observación y delineamiento. Para longitudes de onda visibles hay factores que complican la interpretación. En efecto, la reflectancia de un cuerpo de agua puede generarse por interacción con la superficie (reflexión especular), con material en suspensión o con el fondo mismo del cuerpo de agua. El agua clara absorbe poca energía con longitudes de onda por debajo de 0,6 μm, pero a medida que aumenta la turbidez la reflectancia en el visible aumenta rápidamente. Igualmente la presencia de clorofila (algas, fitoplancton) modifica la reflectancia del agua, efecto que se aplica al monitoreo por percepción remota de concentraciones de algas (Bense, 2007).

La curva de reflectancia espectral de suelos es más monótona que la de la vegetación. Entre los factores que afectan la reflectancia del suelo se encuentran su contenido de humedad, su textura, rugosidad, presencia de materia orgánica y contenido de óxido de hierro. En particular, el contenido de humedad está estrechamente ligado a la textura: los suelos arenosos, de partículas grandes, usualmente están bien drenados, resultando con baja humedad y relativamente alta reflectancia. La inversa ocurre con los suelos mal drenados. La rugosidad y la materia orgánica, así como el óxido de hierro disminuyen la reflectancia del suelo, a lo menos en la región visible (Bense, 2007). La diferencia entre las curvas espectrales de estos tres distintos tipos de elementos (vegetación, agua y suelo) se puede apreciar en la Figura 3-9.

3.3.5. *Sistemas de Percepción Remota*

A. Satélites

Satélite es una palabra que se refiere a un cuerpo en órbita alrededor de otro cuerpo. Un ejemplo de un satélite natural es la luna que orbita alrededor de la Tierra. Los satélites de observación de la Tierra son naves espaciales que actúan como plataformas para llevar los instrumentos (sensores). Existen varios tipos de sensores, clasificados de acuerdo con la fuente de radiación electromagnética que usan y con el sistema que emplean para la recolección de datos. Los *sensores pasivos* detectan la radiación electromagnética reflejada o emitida desde fuentes naturales, mientras que los *sensores activos* detectan las respuestas reflejadas desde los objetos, los cuales son irradiados desde fuentes de energía generada artificialmente. Cada uno es dividido además en sistemas de *barrido* y *no-barrido* (Alzate, 2001).

El tipo de sensores debe escogerse asegurando que la información que produce sea la más conveniente. El sensor más adecuado para predicción meteorológica no es el más adecuado para otros usos, como por ejemplo para la supervisión de cultivos (Alzate, 2001).

Los satélites pueden ser descritos de acuerdo con el tipo de órbita que ellos ocupan (Alzate, 2001), estas orbitas pueden ser:

- *Orbitas geoestacionarias*, los satélites geoestacionarios giran a velocidades que se comparan con la rotación de la Tierra, de tal forma que ellos son estacionarios (estáticos) con respecto a la superficie de la Tierra (Figura 3-11). Esto permite a los satélites observar y coleccionar información continuamente sobre áreas específicas (Alzate, 2001).
- *Orbitas polares*, muchas plataformas de percepción remota son diseñadas para seguir una órbita (básicamente norte-sur) que, junto con la rotación de la Tierra, les permite cubrir la mayoría de su superficie en un cierto periodo de tiempo (Figura 3-10) (Alzate, 2001).



Figura 3-11. Órbitas satelitales.

Tomado de: <http://www.inta.es/descubreAprende/imagenes/Fotos/OrbitasSatelites.gif>

El satélite utilizado para la elaboración de este trabajo (LANDSAT 7ETM) es de *órbita polar* y posee un sensor del tipo *pasivo, barredor y productor de imágenes*.

B. Resoluciones en Percepción Remota

Las características fundamentales de los datos adquiridos en un sistema de este tipo, se pueden definir por parámetros como (Alzate, 2001):

- *Resolución espectral:* se refiere al número, espaciamiento y ancho de las bandas de longitud de onda a lo largo de espectro electromagnético. Entre más alta sea la resolución espectral más completa y precisa será muestreada esta firma espectral y más fácilmente, diferentes elementos de la escena, podrán ser clasificados y discriminados basados en sus firmas (Alzate, 2001).
- *Resolución espacial:* es una medida del objeto más pequeño que puede ser resuelto por el sensor, o el área en la superficie que recoge cada píxel. Entre más alta sea la resolución espacial (más fina) más completa y precisa es muestreada la forma de los objetos y más nítidamente pueden ser identificados, igualmente con más precisión será determinada su localización, extensión y área (Alzate, 2001).
- *Resolución temporal:* se refiere a cada cuanto tiempo recoge el sensor una imagen de un área particular. Por ejemplo el satélite Landsat puede ver la misma área del globo cada 16 días. Muchos objetos de la tierra tienen firmas temporales características. Esta se refiere a como la reflectancia para un objeto dado en una longitud de banda dada, o combinación de bandas, cambia a través del tiempo. Para las superficies cubiertas de vegetación las firma temporal esta relacionada con los cambios fisiológicos en el tiempo, que se dan en los ciclos durante los cambios de estación. Entre más alta sea la resolución temporal más completas y precisas son muestreadas las firmas temporales de los objetos y más nítidamente

podrán ser discriminados los elementos, basado en su comportamiento temporal (Alzate, 2001).

- *Resolución radiométrica*: se refiere al rango dinámico, o número de posibles valores que puede tomar cada dato. Por ejemplo con 8 bits, el rango de valores va de 0 a 255. entre mayor sea la resolución radiométrica (Figura 3-12), en forma más precisa pueden presentarse los datos de las variaciones en la radiación, que viene de la superficie (Alzate, 2001).

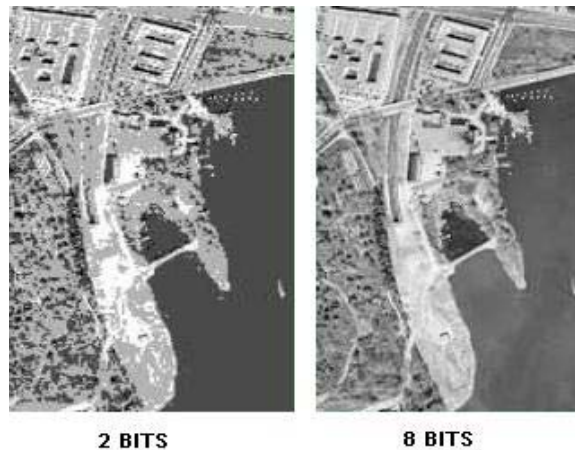


Figura 3-12. Comparación entre resolución de 2bits y 8 bits. Modificado de: http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/ciaf/TutorialSIG_2005_26_02/paginas/ctr_prsiste_masensor.htm

- *Escala vs. Resolución espacial*: Los conceptos de escala y resolución espacial están estrechamente relacionados con el grado de detalle con que podemos visualizar una dada imagen. Sin embargo difieren en ciertos aspectos que conviene puntualizar. La escala de una imagen o de un mapa hace referencia a la diferencia relativa de tamaño o distancia entre los objetos de la imagen y los reales terrenos. Esta diferencia se expresa como la relación entre la distancia sobre la imagen y la real terrena. Así por ejemplo, una escala de 1:100000 significa que 1 cm en el mapa o imagen corresponde a 100000 cm (1 km) sobre el terreno. Ahora bien, la resolución espacial de una imagen es una indicación del tamaño del pixel expresada en términos de dimensiones sobre el terreno. Así, una resolución espacial de 30 m significa que el pixel representa un área de 30 m x 30 m sobre el terreno. Si el pixel fuera rectangular debería ser representado por su largo y ancho, por ejemplo 56 m x 79 m. La resolución espacial es una indicación del potencial de detalle que ofrece una imagen. Si una imagen de satélite de 1 m de resolución se imprime a una escala de

1:500000 se perdería el potencial de detalle que ofrece dicha imagen. La inversa también es cierta: si se imprime una imagen de baja resolución espacial, por ejemplo 500 m, a una escala muy fina sólo veríamos los píxeles individuales. Cuando efectuamos “zoom” repetido sobre una imagen digital (es decir, cuando vamos “afinando” la escala) llega un momento en que comienzan a visualizarse los píxeles, y a partir de ese punto aunque sigamos afinando la escala no se aumentará su nivel de detalle llegando a dificultarse su interpretación (Bense, 2007).

En la siguiente tabla (Tabla 3-1) se presentan las principales características del sensor utilizado para la elaboración de este trabajo (LANDSAT 7ETM), el cual posee las 7 bandas del mapeador temático (TM) más una banda pancromática (ETM).

Tabla 3-1. Características del Landsat 7ETM

Tamaño de la escena	185 Km x 185 Km		
Resolución espacial	Bandas 1,2,3,4,5 y 7: 30 m Banda 6: 120 m		
Resolución Radiométrica	8 -bit (256 valores)		
Resolución Temporal	Repite ciclo cada 16 días (233 órbitas)		
Resolución espectral	Banda	Longitud de onda (micrómetros)	Tópico a discriminar
	1	0.45 - 0.52 (azul)	Discriminación de suelos/vegetación, mapas de batimetría, identificación de elementos culturales/urbanos, calidad del agua.
	2	0.52 - 0.60 (verde)	Mapas de vegetación verde, identificación de aspectos urbanos, culturales, calidad el agua.
	3	0.63 - 0.69 (roja)	Discriminación de especies vegetales, elementos culturales/urbanos, áreas vegetadas Vs. áreas no - vegetadas.
	4	0.76 - 0.90 (IR cercano)	Estimación del vigor de la vegetación y biomasa, identificación de tipos de plantíos y vegetación, delimitación de cuerpos de agua y humedad del suelo.
	5	1.55 - 1.75 (IR medio)	Indicativa de la cantidad de humedad en las plantas y el suelo. Se distingue entre nieves y nubes.
	6	10.4 - 12.5 (IR termal)	Discriminación del stress en las plantas, humedad del suelo por radiación termal, mapas termales (urbano, agua).
	7	2.08 - 2.35 (IR medio)	Discriminación de minerales y tipos de rocas, mapeo hidrotérmico, contenido de humedad en la vegetación.

CAPITULO IV

4.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales

Actualmente, la gran mayoría de imágenes son grabadas en formato digital y después procesadas en computador para producir imágenes que servirán de fuente de datos y como información en los diversos campos de interpretación para los cuales su empleo es fundamental (Alzate, 2001).

El principal objetivo del procesamiento digital de imágenes es permitir manipular y analizar los datos de imágenes producidas por sensores remotos, de tal forma que sea “revelada” información que no pueda ser reconocida inmediatamente en forma original. Existen tres pasos generales en el procesamiento de imágenes digitales (Alzate, 2001), los cuales son:

- *Preprocesamiento*: antes de ser usadas, las imágenes requieren correcciones radiométricas, las cuales tienden a remover los efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales (Alzate, 2001).
- *Realce de la información*: Son procedimientos que tienden a mejorar la interpretabilidad visual de una imagen, aunque no aumentan la cantidad de información contenida en ella. El rango de opciones de que dispone el analista para realces de imagen es virtualmente ilimitado (Bense, 2007). Los procesos que existen para realzar una imagen han sido clasificados dentro de dos categorías: *operaciones puntuales*, las cuales cambian el valor de cada píxel individual, independientemente del valor de los otros píxeles y *operaciones locales*, las cuales cambian el valor de píxeles individuales, en el contexto de sus píxeles vecinos. Los realces comunes incluyen: ajuste del contraste, filtros espaciales, coeficiente de bandas, transformaciones de Fourier, componentes principales y transformación de textura (Alzate, 2001).
- *Extracción de información*: diferente al procesamiento de imágenes análogas, el procesamiento de imágenes digitales se basa enteramente en los elementos primarios de tono y color de píxel de la imagen para la extracción de la información (Alzate, 2001).

Una vez procesados los datos, pueden ser colocados en un formato que transmita la información en forma efectiva. Esto puede ser realizado de diversas formas: una impresión de la imagen realzada, un mapa de imágenes, un mapa temático, una base de datos espacial, gráficas, etc. (Alzate, 2001).

4.1.1. *Datos en Percepción Remota*

Una imagen en formato digital consta de píxeles (celdas), los cuales se encuentran dispuestos en filas y columnas llamadas *arreglo raster*. La posición de cada píxel es determinada por un sistema de coordenadas XY. Cada píxel tiene también un valor numérico llamado *numero digital* (ND), que registra la intensidad de la energía electromagnética medida para la celda de resolución de la tierra representada por ese píxel. Los números digitales van de cero a 255, en la mayoría de los casos, y son representados en una escala de grises (Figura 4-1) (Alzate, 2001).

Este sistema registra una imagen en términos estrictamente numéricos en tres coordenadas X, Y y Z. X y Y localizan cada píxel y Z da el ND, el cual es desplegado como un valor de intensidad de escala de grises. Los sistemas de barrido para producir las imágenes registran dichas imágenes en un formato directamente digital, donde cada celda de resolución en la tierra es representada por un píxel en la imagen (Alzate, 2001).

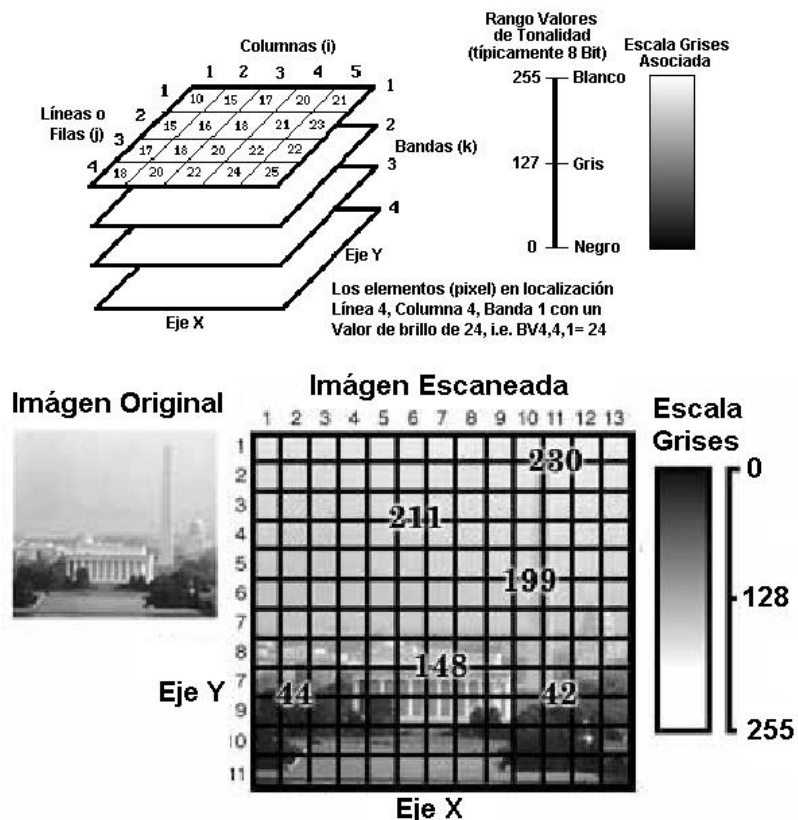


Figura 4-1. Componentes de una imagen digital. Modificado de Alzate 2001

4.1.2. Formato de Imágenes Satelitales

Existen muchos formatos usados para almacenar los datos de teledetección, entre ellos los cuatro principales formatos de datos usados por los proveedores comerciales son (Alzate, 2001):

- *Formato de bandas intercaladas por píxel, BIP (band interleaved by pixel)*: este formato trata a los píxeles como unidades de almacenamiento separadas. Los valores de intensidad radiométrica para cada píxel son almacenadas una después de la otra. Es práctico si todas las bandas en una imagen van a ser usadas, de lo contrario es engorroso extraer todas las bandas, para usar solamente una. Todas las bandas son escritas antes de que los valores para el siguiente píxel sea representado (Figura 4-2) (Alzate, 2001).
- *Formato de bandas intercaladas por línea, BIL (band interleaved by line)*: los valores de celdas en la imagen son almacenados por líneas. Cada línea es representada en todas las bandas antes de que la siguiente línea sea grabada. Como el anterior formato,

es útil si todas las bandas de la imagen van a ser usadas en el análisis (Figura 4-2) (Alzate, 2001).

- *Formato secuencial de banda, BSQ (band sequential)*: requiere que todos los datos para una banda simple que cubren la escena completa, sean escritos como una fila. Es un formato fácil, pues no es necesario leer la información que no se vaya a usar. Un encabezado en formato ASCII (un formato de texto, llamado *metadata*) contiene la información acerca de la imagen, incluidos la fecha de adquisición, el sensor, la elevación del sol y el azimuth (Figura 4-2) (Alzate, 2001).
- *Formato de run-length encoding*: es un formato secuencial de banda que guarda el valor radiométrico de cada píxel y el número de veces que este valor ocurre a lo largo de una línea de barrido dada. Sin embargo, si los datos son heterogéneos con ausencia de valores repetitivos, este formato no será mejor que los otros (Alzate, 2001).

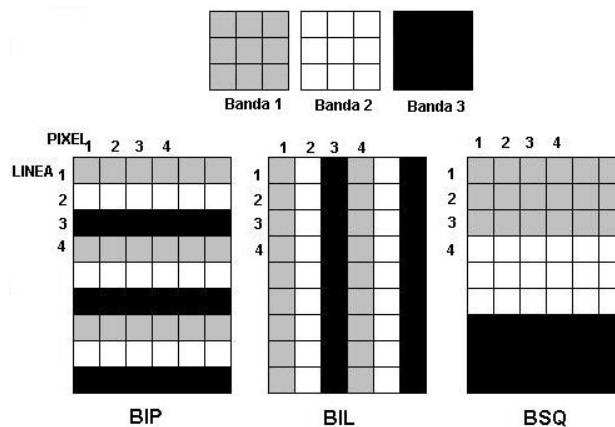


Figura 4-2. Formato de almacenamiento digital de imágenes.

4.1.3. Almacenamiento

Por el carácter multidisciplinario de los estudios que se realizan con las imágenes de sensores remotos, el volumen de almacenamiento de datos es considerable. A este volumen de datos se adiciona aquel requerido para almacenar los archivos intermedios generados por correcciones geométricas, realces y combinaciones de bandas. Una aproximación del volumen de datos que debería reservarse para desarrollar los análisis dentro de los estudios de teledetección, es de cuatro a cinco veces el almacenamiento de los datos de imágenes crudas. Para un área de 185 km por 185 km, que puede abarcar una escena de una imagen LANDSAT, el volumen de almacenamiento del conjunto de datos que cubren esa área es de 300 Mb aproximadamente (Alzate, 2001).

4.1.4. *Sistemas de Procesamiento de Imágenes*

Un sistema de procesamiento de imágenes es la combinación del hardware del computador y del software de procesamiento de imágenes. Un sistema PC con CPU de 16 hasta 32 bit, con el software apropiado, puede realizar un procesamiento de imágenes digitales relativamente sofisticado (Alzate, 2001).

Entre las funciones más importantes realizadas por el software para el procesamiento de imágenes, se encuentran (Alzate, 2001):

1. *Funciones de preprocesamiento*

- Correcciones radiométricas
- Correcciones geométricas

2. *Funciones de despliegue y realce*

- Despliegue de composiciones a color y en blanco y negro
- Magnificación, reducción
- Manipulación de contraste
- Algebra de imágenes (cociente de bandas)
- Filtros espaciales
- Realce de bordes
- Transformación de texturas
- Modelos digitales de elevación (DEM)

3. *Extracción de información*

- Clasificación supervisada y no supervisada
- Clasificación contextual
- Análisis de datos hiperespectrales
- Procesamiento de imágenes de radar

4. *Composición cartográfica*

- Salida de imágenes y mapas

4.2. Preprocesamiento de Imágenes

El preprocesamiento de imágenes, también llamado restauración de imágenes, está relacionado con la corrección y calibración de las imágenes con el fin de conseguir una representación lo más fiel posible de la superficie de la tierra (Alzate, 2001).

Las imágenes de sensores remotos son tomadas frecuentemente a gran distancia de la superficie terrestre. Como resultado hay un camino atmosférico que la energía electromagnética debe atravesar antes de llegar al sensor. Dependiendo de la longitud de onda y de las condiciones atmosféricas, la energía que llega al sensor pudo haber sido sustancialmente modificada. Además, durante el tiempo de barrido del sensor, el satélite sigue una ruta que está sujeta a variaciones menores, al mismo tiempo que la tierra se mueve debajo de él (Alzate, 2001).

La restauración o corrección de la imagen trata de remover esos efectos de degradación (Alzate, 2001). La restauración de las imágenes puede ser dividida en dos tipos:

4.2.1. Correcciones Radiométricas

Se refieren a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética registrada por cada detector. Algunas de las distorsiones más comunes para las cuales existen procedimientos de corrección son (Alzate, 2001):

- Valores elevados uniformemente: debido a la neblina atmosférica, la cual preferencialmente dispersa las longitudes de onda corta (Alzate, 2001).
- Bandeamiento: debido a los detectores que se encuentran sin calibración (Alzate, 2001).
- Ruido al azar: debido al desempeño no-sistemático e impredecible del sensor o de la transmisión de los datos (Alzate, 2001).

Para estudiar patrones de reflectancia en diferentes tiempos o a través de mosaicos de imágenes, es necesario calibrar los valores de radiancia para que los niveles de reflectancia absolutas de los objetos medidos por diferentes sensores correspondan a través de imágenes separadas. Este procedimiento también puede ser requerido para normalizar los ángulos solares y las distancias Tierra-Sol (Alzate, 2001).

4.2.1.1. *Calibración de la Radiancia*

Los valores de los píxeles en imágenes comerciales representan la radiancia de la superficie en forma de números digitales (ND), los cuales son calibrados para ajustarlos en cierto rango de valores. La conversión del ND a radiancia absoluta es un procedimiento necesario para comparar imágenes tomadas por diferentes sensores. Cada sensor tiene sus parámetros de calibración usados para grabar los valores del ND (Alzate, 2001).

Usualmente los detectores son calibrados para que haya una relación lineal entre el ND y la radiancia espectral. Esta función lineal es descrita por tres parámetros: el rango del valor del ND en la imagen, la mínima (L_{min}) y la máxima (L_{max}) radiancia medida por un detector sobre la banda espectral del canal. L_{min} es la radiancia espectral correspondiente al valor del ND mínimo (usualmente 0). L_{max} es la radiancia espectral correspondiente al máximo ND (usualmente 255). No solamente cada sensor, sino cada banda dentro del mismo sensor tiene su propio L_{max} y L_{min} . La información acerca de los parámetros de calibración del sensor es usualmente suplida con la imagen (Alzate, 2001).

Para estudiar patrones de reflectancia en diferentes épocas, es necesario aplicar una corrección de elevación del sol (o ángulo solar) y una corrección de distancia Tierra-Sol (Alzate, 2001).

4.2.1.2. *Efectos Atmosféricos*

Las partículas atmosféricas y las moléculas causan efectos de dispersión en la transmisión de la energía, sobretodo en las longitudes de onda cortas. El efecto de la niebla es usualmente una elevación uniforme de los valores espectrales, en las bandas del visible del espectro electromagnético (Alzate, 2001).

Una de las formas de reducir la niebla en la imagen es ver los valores en las zonas donde se sabe que debe haber reflectancia cero, como en el agua profunda. Cualquier valor sobre cero en esas áreas probablemente representa un incremento en los valores de la imagen y puede ser sustraído fácilmente de todos los píxeles en las bandas individuales (Alzate, 2001).

Otra forma de reducir la niebla es a través del análisis de componentes principales. Mediante este análisis se detecta una de las componentes que contiene los efectos

atmosféricos. Esta componente se desecha y se realiza una transformación de reversa para obtener nuevas bandas (Alzate, 2001).

4.2.1.3. *Efectos de Ruido*

Los ruidos en las imágenes suceden debido a interferencias mecánicas en el sistema que conduce a errores de transmisión. El ruido puede o degradar la señal registrada o virtualmente eliminar toda la información radiométrica. El ruido puede ser sistemático como el mal funcionamiento periódico de un detector, el cual resulta en el bandeamiento de la imagen. También puede ser más al azar, cuando causa variaciones radiométricas descritas como “sal y pimienta” debido a la apariencia que dan (Alzate, 2001).

4.2.2. *Correcciones Geométricas*

En las imágenes comerciales como LANDSAT, la mayoría de elementos de restauración geométrica asociados con la captura de la imagen, son corregidos por los distribuidores de las imágenes (Alzate, 2001). Estas correcciones incluyen:

- Corrección de la oblicuidad: considera al aspecto de que la tierra se mueve mientras que una imagen es capturada (Alzate, 2001).
- Corrección de la distorsión del scanner: toma en cuenta el hecho de que el campo instantáneo de visión (IFOV) cubre más territorio al final de la línea de barrido (donde el ángulo de visión es muy oblicuo) que en la mitad (Alzate, 2001).

Algunos distribuidores también venden las imágenes georeferenciadas. La georeferenciación no es solamente una técnica de restauración, sino un método de reorientación de los datos para satisfacer deseos específicos y requerimientos del proyecto del usuario. La mayoría de las veces es preferible que el mismo usuario georeferencie la imagen. Esto debido a razones como: ciertas correcciones son muy difíciles o imposibles de realizar en imágenes ya georeferenciadas. Entre otras podría mencionarse los efectos del bandeamiento, baja en la línea de barrido, efectos topográficos y de iluminación. Si la orientación geométrica de los efectos es alterada, entonces las técnicas de restauración estándar serían inútiles. Dado que la severidad de esos efectos no es conocida antes de recibir la imagen, si uno mismo georeferencia la imagen puede garantizar que se tenga el control sobre el proceso de corrección o restauración (Alzate, 2001).

Si el mismo usuario georeferencia una imagen se garantiza el control acerca de las incertidumbres producidas por el proceso de georeferenciación. También es importante que el propio usuario sea quien escoja el sistema de referencia que se acomode a la cartografía existente (Alzate, 2001).

4.3. Realce Visual, Despliegue a Color de una Imagen

El despliegue a color de los datos de percepción remota es de importancia para una interpretación visual efectiva (Alzate, 2001). Existen dos métodos del despliegue de color:

- Las composiciones a color para generar color con datos multibanda.
- Despliegue de pseudos color para asignar diferentes colores a la escala de grises de una imagen

4.3.1. Composición a Color

Una imagen a color puede ser generada componiendo tres bandas seleccionadas con el uso de tres colores primarios. Imágenes de diferente color pueden ser obtenidas dependiendo de la selección de las tres bandas y de la asignación de los tres colores primarios a cada una de ellas (Alzate, 2001).

Cuando tres colores primarios: azul, verde y rojo son asignados a las mismas regiones del espectro electromagnético de azul, verde y rojo, casi los mismos colores de la escala natural pueden ser reproducidos y esta se denomina una *composición a color natural* (Figura 4-3) (Alzate, 2001).

Sin embargo en percepción remota las imágenes multibanda no están siempre divididas dentro de las mismas regiones espectrales de los filtros de los tres colores primarios. En adición las regiones invisibles como las del infrarrojo son usadas muy a menudo y requieren ser desplegadas en color. Como una composición a color con una banda del infrarrojo no es de color natural, es llamada una *composición en falso color* (Figura 4-3) (Alzate, 2001).

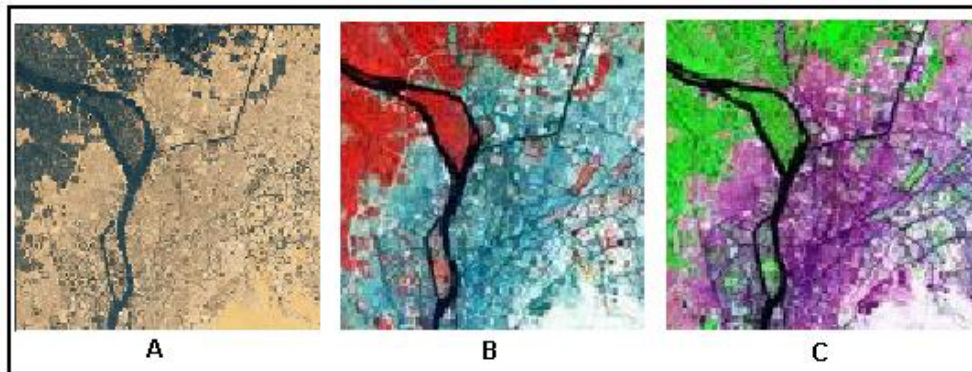


Figura 4-3. Composición de color de imagen Landsat 7 ETM de El Cairo, Egipto. Donde se observan combinaciones para: *A color verdadero*, *B y C composición en falso color*. Modificado de: <http://www.eduspace.esa.int/eduspace/subdocument/default.asp?document=521&language=es>

En particular la composición a color con la asignación del azul a la banda verde, del verde a la banda roja y del rojo a la banda del infrarrojo cercano es muy popular y es llamada *composición a color infrarrojo* (Alzate, 2001).

Este proceso permite visualizar, en forma simultánea, imágenes de distintas regiones del espectro electromagnético, facilitando la delimitación y discriminación visual de algunas coberturas (Alzate, 2001).

4.3.2. Despliegue del Pseudo Color

Diferentes colores pueden ser asignados a la escala de gris, subdividida de una banda de una imagen. Esta asignación es llamada pseudos color. Por ejemplo una imagen de pseudos color de una banda del infrarrojo termal podrá dar un mapa de temperatura, si a diversos intervalos de números digitales (ND) se les asigna un color diferente. Esta técnica de procesamiento es también conocida como *intervalos de intensidad* (density slicing) (Alzate, 2001).

La diferencia fundamental entre estas dos últimas es que, mientras la primera se aplica a tres bandas, entonces es un tratamiento multiespectral, la segunda es aplicada únicamente a una banda, donde los ND se clasifican, de acuerdo con la cobertura que representan, asignando un color distinto a cada una de estas coberturas, produciéndose así una clasificación unibanda (Alzate, 2001).

4.4. Transformaciones Especiales de Imágenes Satelitales

4.4.1. Operaciones entre Bandas

Las operaciones entre bandas proporcionan información adicional a la que existe. Habitualmente emplean las bandas menos correlacionadas, con el fin que el aporte de estas técnicas de procesamiento sea más significativo (Alzate, 2001).

- *Adición*: la operación de suma se lleva a cabo entre los píxeles de dos imágenes. Esta suma promediada, se emplea para obtener una nueva imagen con menor influencia de ruido, pues el promedio disminuye los valores altos. Habitualmente, para esta aplicación, se emplean bandas cercanas espectralmente (dos del infrarrojo o dos del visible) (Alzate, 2001).
- *Sustracción*: se usa para resaltar cambios de regiones entre dos imágenes de la misma área. Para normalizar el resultado puede adicionársele a la diferencia 255 y dividir entre 2. De esta forma lo que no cambia va a mantenerse gris medio (Alzate, 2001).
- *Cociente*: a pesar de que se este analizando el mismo material de la superficie de la tierra, los valores radiométricos pueden sufrir variaciones debidas a los cambios de la pendiente del terreno, del aspecto (dirección hacia donde miran esas pendientes), las sombras o los cambios estacionarios en la iluminación del sol, su ángulo e intensidad. Transformaciones como los cocientes de banda pueden reducir los efectos de esas condiciones ambientales. Esta técnica proporciona, además, información única no disponible en bandas individuales, que es útil para discriminar entre los suelos y la vegetación. En el cociente de bandas, una banda es dividida entre otra. Sin embargo realizar este cálculo no es simple cuando se tienen valores de cero en los píxeles de las bandas. Cuando el denominador del cociente es un valor de cero (la banda 2 tiene valores de cero), el problema se evita dando a cualquier píxel de valor cero, el valor de 1. también existe la opción de agregar un valor pequeño (0.1) al denominador si es igual a cero. Decidir a cuales bandas realizarles el cociente no siempre es fácil, por esto se deben hacer varias pruebas y escoger el cociente que más convenga (Alzate, 2001).

4.5. Extracción de Información

La clasificación es el proceso de desarrollar mapas interpretados a partir de imágenes de sensores remotos. Los resultados de la clasificación marcan la calidad final del proyecto desarrollado (Alzate, 2001).

Existen dos aproximaciones básicas para el proceso de clasificación: clasificación supervisada y no supervisada. Con la clasificación supervisada se provee una descripción estadística de la manera en la cual las coberturas de uso esperadas deberían aparecer en la imagen, después un procedimiento denominado clasificador, es usado para evaluar la probabilidad de que cada píxel pertenezca a una de esas clases (Alzate, 2001).

Con la clasificación no supervisada es usado un enfoque muy diferente. Aquí un tipo especial de clasificador es usado para descubrir los patrones de reflectancia en la imagen, basado en que ellos representan las principales clases de cobertura y uso. Entonces se determina la identificación de cada clase por una combinación de experiencia y trabajo de campo (Alzate, 2001).

En ambos casos el proceso de clasificación puede ser visto como aquel que determina el conjunto al cual cada píxel pertenece. En el caso de la clasificación supervisada los conjuntos son conocidos (o se asume que son conocidos) antes que el proceso se inicie. Esta clasificación es por ello un proceso de toma de decisiones basado en la información disponible. Con la clasificación no supervisada, sin embargo, las clases son desconocidas, por eso el proceso se considera de segmentación de clases más que de toma de decisiones (Alzate, 2001).

Como ya se mencionó anteriormente, cada material de la naturaleza tiene su propia interacción con la energía electromagnética. Esta interacción varía de una longitud de onda a otra dando lo que se conoce como un patrón de respuesta espectral. La base de la clasificación es encontrar algunas áreas del espectro electromagnético, en las cuales la naturaleza de esta interacción sea diferente para los materiales dentro de la imagen. Esto se define como *firma espectral*. Esto es, un patrón de respuesta espectral que es característico de un material (Alzate, 2001).

4.5.1. *Clasificación Supervisada*

Parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, lo cual permite delimitar sobre la imagen unas áreas de entrenamiento que se consideran representativas. Tales áreas sirven para entrenar al computador en el reconocimiento de las diferentes categorías. A partir de ellas el computador calcula los valores radiométricos que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de una imagen a una de esas categorías en función de sus valores (Alzate, 2001).

La cartografía convencional o las fotografías pueden ser de ayuda para la localización precisa de estas áreas, las cuales deben ser lo suficientemente homogéneas y representativas de la clase que definen (Alzate, 2001).

4.5.2. *Clasificación No Supervisada*

Está dirigida a definir clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún muestreo previo del área en estudio. En este método se asume que los valores radiométricos de los píxeles forman una serie de agrupaciones. Estos grupos corresponderán a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo que definen diversas clases temáticas. Desgraciadamente estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases de información que se pretende deducir, entonces toca interpretar o dar sentido temático a las categorías (Alzate, 2001).

4.5.3. *Métodos Mixtos*

Los dos métodos, supervisado y no supervisado, cuentan con ventajas y desventajas. El primero resulta muchas veces subjetivo, pues se pueden establecer categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo no garantiza que las clases deducidas tengan significado en el contexto en el que realiza el estudio, además de ser de difícil verificación (Alzate, 2001).

Con el fin de evitar estos inconvenientes se pueden emplear unas alternativas que los combinan (Alzate, 2001). Estas alternativas son:

- Empleo del supervisado para guiar el no supervisado. En este caso se usa el conocimiento previo para orientar la búsqueda de grupos homogéneos. Por ejemplo puede aplicarse el método no supervisado en áreas de la imagen con una cobertura conocida. También se puede inducir valores radiométricos medios de las categorías de

interés, obtenidos en las áreas de entrenamiento y usarlos como centros iniciales del grupo. El proceso de búsqueda así se reduce notoriamente y se forman grupos con significado temático (Alzate, 2001).

- Se pueden usar separadamente sobre la misma imagen y luego sintetizar las medidas extraídas por ambos. Las categorías se complementan en cuanto a significado espectral y temático (Alzate, 2001).

CAPÍTULO V

5. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema único diseñado para entrar, almacenar, recuperar, manipular y analizar capas de datos geográficos para producir información interpretable, mediante una colección de Hardware, Software, Información Geográfica y personal capacitado (Geoinformación, 2007).

Existe una gran variedad de software diseñado para este fin. Entre algunos de los mas versátiles se encuentran: ArcGIS[®] 9.1, ENVI[®] 4.2 y ERDAS IMAGINE[®] 8.5, los cuales fueron los seleccionados para la realización de este trabajo de investigación debido a su disponibilidad. Las características principales de estos programas son las siguientes:

5.1. ArcGIS[®] 9.1

ArcGIS es un conjunto integrado de “software” de Sistemas de Información Geográfica que trabaja como un motor compilador de información geográfica alfanumérica (Bases de Datos) y gráfica (Mapas). Su arquitectura está elaborada de tal manera que sus herramientas entregan sistemas inteligentes de información geográfica. ArcGIS usa modelos de datos inteligentes SIG para representar la geografía y proporciona todas las herramientas necesarias para crear y trabajar con datos geográficos. Incluye herramientas para todas las actividades SIG: edición y automatización de datos, mapeo y actividades basadas en mapas, administración de datos, análisis geográfico y organización de datos y aplicaciones para Internet (Esri, 2002).

5.1.1. Características

- Visualización de los datos.

Con ArcGIS se pueden construir los mapas dinámicos e inteligentes que permiten visualizar patrones, tendencias y singularidades en los datos. ArcGIS incluye formas fáciles de levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permiten elaborar mapas de calidad rápidos y como el usuario desee. Los mapas terminados se pueden guardar, imprimir, exportar y ubicar en otros documentos o usos (Geoinformación, 2007).

Las Capacidades de ArcGIS están enfocadas a visualizar y gestionar información geográfica. En detalle son (Geoinformación, 2007):

- Trabajo con Mapas
 - Definición de Sistemas de Coordenadas.
 - Exploración de Capas de Información.
 - Despliegue de Mapas.
 - Edición de Mapas.
 - Impresión de Mapas.
 - Trabajo con Bases de Datos.
- Gestión de datos
 - Creación y acceso a Geodatabase.
 - Definición y trabajo con Metadata.
 - Agregar Base de Datos Espacial.
 - Reportes
- Edición de datos
 - Creación de Archivos Shape.
 - Selección de Datos.
 - Uso de Snapping.
 - Movimiento de los Elementos.
 - Edición de Base de Datos.
 - Agregar Barra de Herramientas.
 - Agregar Scripts.
- Geoprocesamiento de datos
 - Agregar Datos.
 - Combinación de Datos.
 - Unión de Datos.
 - Intersección de Datos.
 - Disolución de Datos.
 - Recorte de Datos.
 - Ensamblaje de Datos.
 - Fusión de Datos.
 - Área de Influencia.

El “ArcGIS Desktop” es un conjunto de aplicaciones integradas: “ArcMap”, “ArcCatalog” y “ArcToolbox”. Usando estas aplicaciones juntas, se puede realizar cualquier tarea SIG, desde una simple hasta una muy avanzada, incluyendo cartografía, administración de datos, análisis geográficos, edición de datos y geoprocésamiento. El “ArcGIS Desktop” es un sistema amplio, integrado, escalable, diseñado para satisfacer las necesidades de una gran gama de usuarios SIG (Esri, 2002).

A. ArcMap

ArcMap es la aplicación central del “ArcGIS Desktop”. Es la aplicación SIG usada para todas las actividades basadas en cartografía, incluyendo análisis de mapas y edición (Figura 5-1). En esta aplicación se trabaja con mapas. Los mapas tienen un diseño de página que contiene una ventana geográfica, o una vista con una serie de capas, leyendas, barras de escalas y otros elementos (Esri, 2002). Sus principales aplicaciones son (Geoinformación, 2007):

- Permite la visualización, consultas, y generación de “Layout” o salidas gráficas en formato de Mapas.
- Realización de Geoprocésamiento.
- Edición de Base de Datos.
- Edición de Cartografía.
- Etiquetado y Simbología de Información.
- Importar/Exportar información en diferentes formatos, CAD, EXCEL, ACCESS, TAB, DWG, Otros.

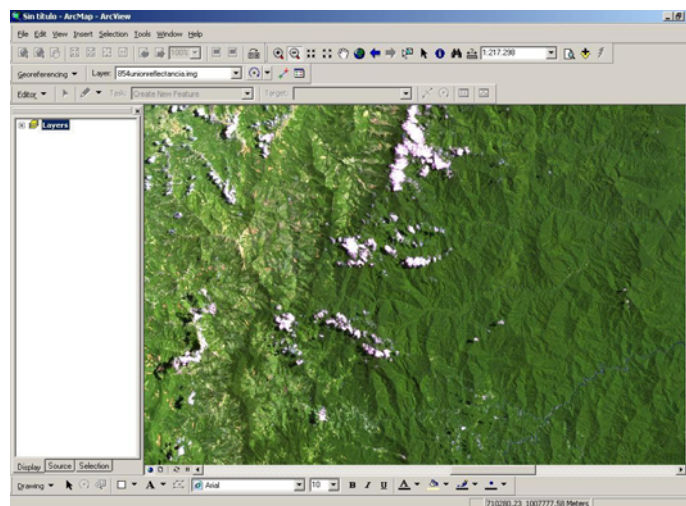


Figura 5-1. Aplicación ArcMap de ArGIS

B. ArcCatalog

La aplicación *ArcCatalog* ayuda a organizar y administrar todos los datos SIG (Figura 5-2). Incluye herramientas para explorar y encontrar información geográfica, para grabar y ver metadatos, para una rápida visión de cualquier conjunto de datos y para definir la estructura del esquema de sus capas de datos geográficos (Esri, 2002). Sus principales aplicaciones son (Geoinformación, 2007):

- Explorador y administrador de datos GIS.
- Creación de archivos “shapefile”, “geodatabase” y archivos dbase.
- Visualización rápida de datos.
- Permite la creación y edición de metadata.
- Búsqueda de información.

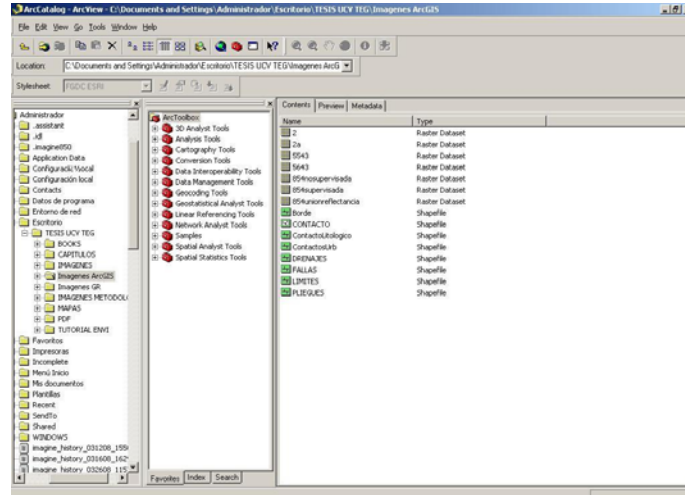


Figura 5-2 Aplicación ArcCatalog de ArGIS

C. ArcToolbox

ArcToolbox es una aplicación sencilla que contiene muchas herramientas SIG usadas para el geoprocésamiento (Esri, 2002) (Figura 5-3). El geoprocésamiento es usado en muchas actividades GIS, algunas de éstas son proximidades, sobreposición de capas de información, conversión de datos, reproyección, unión y separación de información. Los usuarios utilizan el geoprocésamiento para generar nueva y enriquecida información, con esto se puede modelar y analizar mejor la data (Geoinformación, 2007). Sus principales aplicaciones son:

- Herramienta de análisis.
- Herramientas cartográficas.

- Herramientas de conversión.
- Herramienta de gestión de data.
- Herramienta de “geocoding”.
- Herramienta de análisis estadístico.

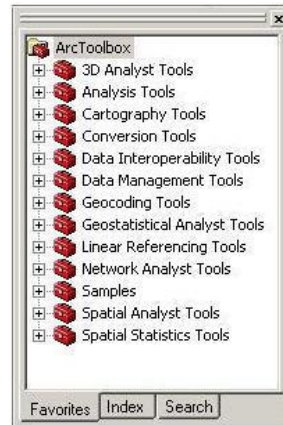


Figura 5-3. Herramientas del ArcToolbox de ArcGIS

ArcMap, *ArcCatalog* y *ArcToolbox* han sido diseñadas para trabajar juntas con el fin de desempeñar todas las actividades SIG. Por ejemplo, se puede buscar y encontrar un documento mapa en *ArcCatalog*, luego abrirlo en *ArcMap* haciendo un doble clic en el Catálogo. Luego editar y mejorar sus datos usando las herramientas disponibles en el ambiente de edición de *ArcMap*. También se pueden buscar datos de otro sitio a través de las conexiones de bases de datos de *ArcCatalog*. Una vez encontrado los datos de interés, pueden ser arrastrados y dejados como una capa en *ArcMap*. También se puede arrastrar y dejar datos de *ArcCatalog* sobre las herramientas en *ArcToolbox*. Una vez creada una nueva información geográfica usando estas tres aplicaciones, se pueden grabar metadatos para los conjuntos de datos resultantes usando *ArcCatalog* (Esri, 2002).

5.2. ENVI[®] 4.2 (INNOVA CAD VISION, 2001)

ENVI es un sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multispectral de los datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites. Proporciona un entorno novedoso y de fácil uso para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas.

Con su procesamiento de imágenes, basado en ficheros y bandas, ENVI permite trabajar con ficheros de imágenes enteros, bandas individuales, o ambas. Cuando se abre un fichero de entrada, cada banda espectral está disponible para todas las funciones

del sistema. Con múltiples ficheros de entrada abiertos, puede fácilmente seleccionar bandas de diferentes ficheros para procesarlas juntas. ENVI también incluye herramientas para extraer espectros, usar librerías espectrales, o para analizar conjuntos de imágenes de alta resolución espectral como AVIRIS, GERIS, y GEOSCAN.

ENVI está completamente escrito en IDL (“Interactive Data Language”), Lenguaje de Datos Interactivo. IDL es un potente lenguaje de programación estructurado, basado en matrices, que proporciona un procesamiento de imágenes integrado, grandes capacidades de visualización y herramientas GUI fáciles de usar. Se requiere IDL para ejecutar ENVI, y ENVI recibe gran parte de su flexibilidad de la potencia de IDL.

ENVI usa un formato de datos raster generalizado, consistente en un simple "fichero binario plano" y un pequeño fichero ASCII (texto) de cabecera asociado. Este formato de fichero permite a ENVI usar casi cualquier fichero de imagen, incluyendo aquellos que contienen su información de cabecera insertada en el propio fichero de datos.

Los datos raster generalizados se almacenan como una serie binaria de bytes en formatos Band Sequential (BSQ), Band Interleaved by Pixel (BIP), o Band Interleaved by Line (BIL). BSQ es el formato más simple, con cada línea de datos seguida inmediatamente por la siguiente línea de la misma banda espectral. Es el formato óptimo para el acceso espacial (X,Y) a cualquier parte de una simple banda espectral. El formato BIP proporciona óptimas prestaciones para el procesamiento espectral. BIL es un formato con prestaciones intermedias entre el procesamiento espacial y espectral. Es el formato de fichero recomendado para la mayor parte de las tareas de procesamiento de ENVI.

- VENTANAS Y PANTALLAS ENVI

Mientras se trabaja con ENVI, aparecen en pantalla diferentes ventanas y cajas de diálogo que le permiten manipular y analizar la imagen. Las más importantes de estas pantallas son un grupo de tres ventanas que visualizan la imagen, permitiendo moverse dentro de ella y ampliar diferentes zonas. Este grupo de ventanas se denomina colectivamente como el *Grupo de Visualización* (Figura 5-4), que consiste en:

- *La Ventana Principal*
Aquí es donde toda o parte de su imagen se visualiza a la máxima resolución.
- *La Ventana de Scroll*
Si la imagen completa no cabe en la Ventana Principal, aparece la Ventana de Scroll, donde se visualiza una copia reducida de la imagen completa, permitiéndole seleccionar el área a visualizar en la Ventana Principal.
- *La Ventana de Zoom*
Visualiza una versión aumentada del área seleccionada en la Ventana Principal.

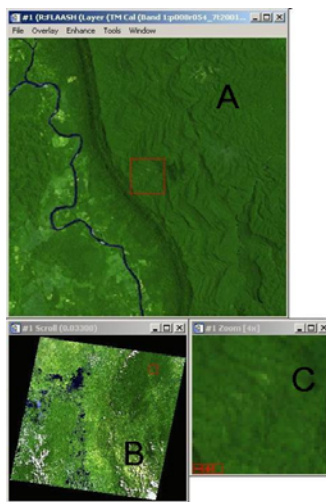


Figura 5-4. Grupo de visualización. A (ventana principal), B (ventana de scroll) y C (ventana de zoom)

○ LISTA DE BANDAS DISPONIBLES

ENVI proporciona acceso, tanto a ficheros de imágenes, como a bandas espectrales individuales sobre esos ficheros. La Lista de Bandas Disponibles (*Available Bands List*) es un cuadro de diálogo especial, que contiene la lista de todas las bandas disponibles de todos los ficheros abiertos. Esta lista es usada para cargar imágenes tanto en color como en escala de grises.

5.3. ERDAS IMAGINE® 8.5 (IDAS, 2008)

ERDAS IMAGINE® 8.5 es uno de los productos de imagen geográfica de ERDAS, Inc. que integra teledetección y funcionalidad SIG dentro de un solo sistema de cartografía, análisis y visualización. El software "raster-base" está diseñado para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales y fotografía aérea, incorporando el

resultado dentro de un ambiente funcional de SIG y generando mapas que pueden ser usados como herramientas en investigación.

Desde sus inicios, ERDAS IMAGINE ha sido usado por numerosas aplicaciones, incluyendo administración de recursos naturales, telecomunicaciones, planeación urbana y cartografía de hábitat. La claridad del producto, la interfaz fácil de usar presenta a los usuarios con un complejo conjunto de herramientas poderosas para el análisis y adecuación espacial. Además, las utilidades del software son extensas e incluyen lo necesario para realizar tareas organizando desde corrección geométrica y adecuación de imagen, hasta avanzados procesos y análisis de imágenes multiespectrales e hiperspectrales en ambientes de dos y tres dimensiones ("2-D / 3-D").

CAPÍTULO VI

6.1. Metodología de Manejo de Imágenes Landsat 7 ETM

El principal objetivo del procesamiento digital de imágenes es permitir manipular y analizar los datos de imágenes, las cuales antes de ser usadas, requieren correcciones que tienden a remover los efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales.

El primer paso consiste en la obtención del conjunto de imágenes y el archivo formato ASCII (metadata), el cual contiene un conjunto de datos relativos a la imagen como fecha de adquisición, elevación del Sol, azimuth, etc. Estos archivos son descargables vía Internet desde el sitio Web: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> perteneciente a la Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility. Para el procesamiento de las imágenes en este estudio, no fue necesario el uso de las imágenes correspondientes a las bandas 61, 62 y 8 pues el rango en el espectro electromagnético en el que se encontraban no aportaba información útil.

Las imágenes empleadas en este trabajo, que cubrían la zona en estudio, fueron las identificadas en la grilla de la Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility, con los números P008R054 y P007R054.

Una vez adquirido el conjunto de imágenes en formato TIFF y la metadata, se realizan los siguientes pasos:

• Corrección de Radiancia

Los valores de los píxeles en imágenes satelitales representan la radiancia de la superficie en forma de números digitales (ND), los cuales son calibrados para ajustarlos en un cierto rango de valores. La calibración de estos valores para la imagen LANDSAT ETM, se realiza mediante el uso del paquete informático ENVI[®] 4.2. Los pasos a realizar son los siguientes:

1. En la barra de menú principal, se selecciona la opción **Basic Tools**. Luego en el menú desplegable que aparece, se sitúa el puntero del ratón en la opción **Preprocessing**, en el siguiente menú desplegable se sitúa el puntero en la opción **Calibration Utilities**, seleccionando finalmente la opción **Landsat TM** del ultimo menú en aparecer (Figura 6-1).

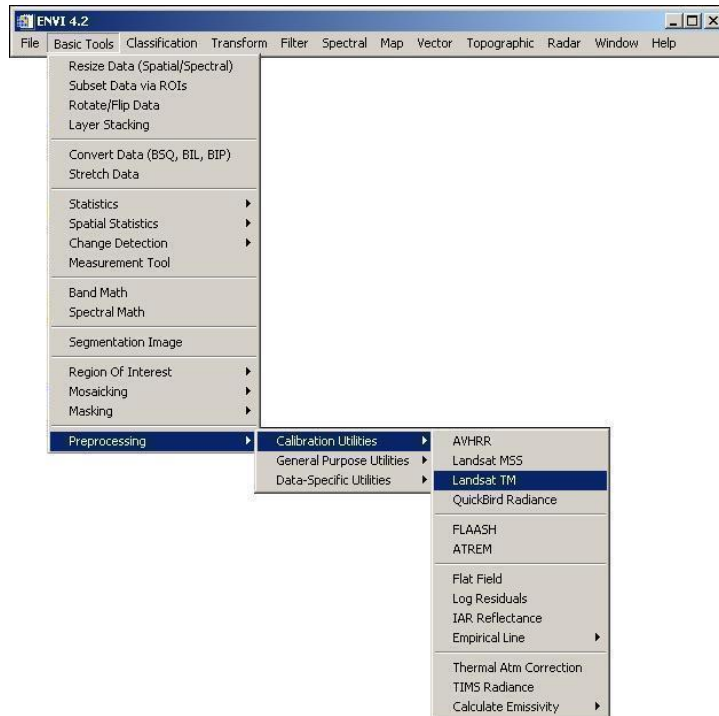


Figura 6-1

2. A continuación aparece una ventana cuya barra de título tiene como nombre **TM Calibration Input File**. Pulsar con el ratón sobre el botón de acción **Open**, y en el menú desplegable que aparece, seleccionar la opción **New File**. En la ventana que aparece se busca y se selecciona uno de los archivos TIFF, pertenecientes a una de las bandas (Figura 6-2). Este paso se repite tantas veces como imágenes TIFF se tengan (Figura 6-3).

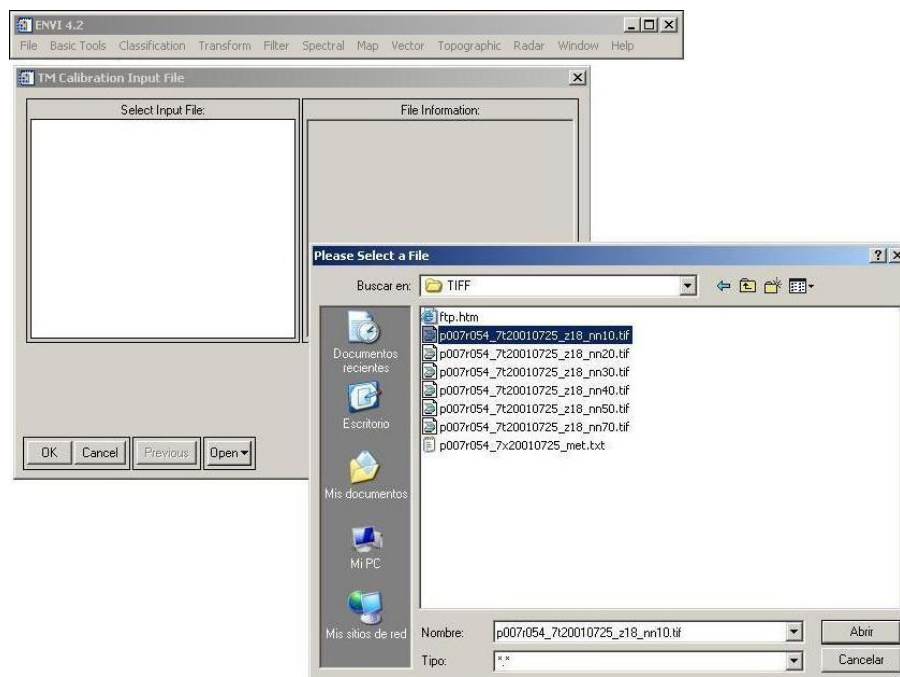


Figura 6-2

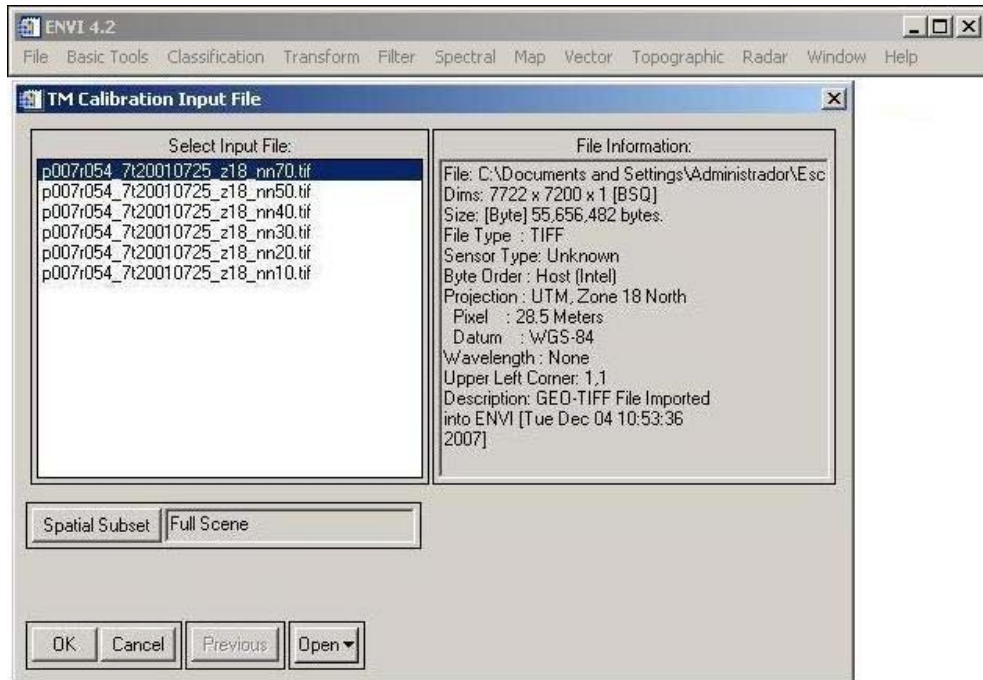


Figura 6-3

3. En la ventana de título **TM Calibration Input File**, hacer doble clic en el primer archivo TIFF cargado. Seguidamente aparece la ventana **TM Calibration Parameters**, donde se introducen los datos asociados a la imagen tales como fecha de adquisición y elevación del Sol. Además se selecciona la casilla de verificación de **Radiance** y se introducen los valores máximos y mínimos de radiancia. Estos valores son propios de cada imagen. A continuación se selecciona la casilla de verificación para la opción **Output Result To File** y se pulsa el botón de acción **Choose**, en donde se elige la ruta y el nombre del archivo a generar (Figura 6-4). Igualmente este procedimiento se repite tantas veces como imágenes se tenga. Estos datos y valores asociados a la imagen, se encuentran en el archivo de formato ASCII (metadata), se abre generalmente con un block de notas.

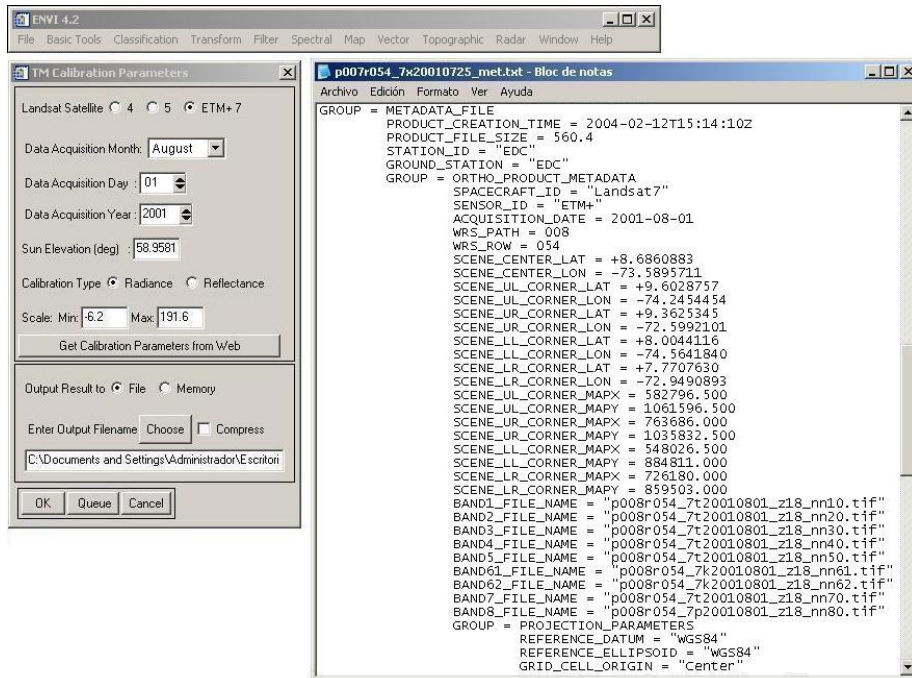


Figura 6-4

• Fusión de Bandas

Cada imagen TIFF representa a una imagen obtenida en una banda del sensor. Una vez obtenidas todas las imágenes con radiancia corregida, se procede a apilarlas en una sola imagen, mediante la función Layer Stacking del ENVI® 4.2. En este procedimiento se deben de colocar las bandas en orden creciente, debido a que es importante seguir la secuencia original de las bandas.

1. En la barra de menú principal, se selecciona la opción **Basic Tools**. Luego en el menú desplegable que aparece, se selecciona la opción **Layer Stacking** (Figura 6-5).
2. En la ventana de título **Layer Stacking Parameters** que aparece, pulsar el botón de acción **Import File** (Figura 6-6).

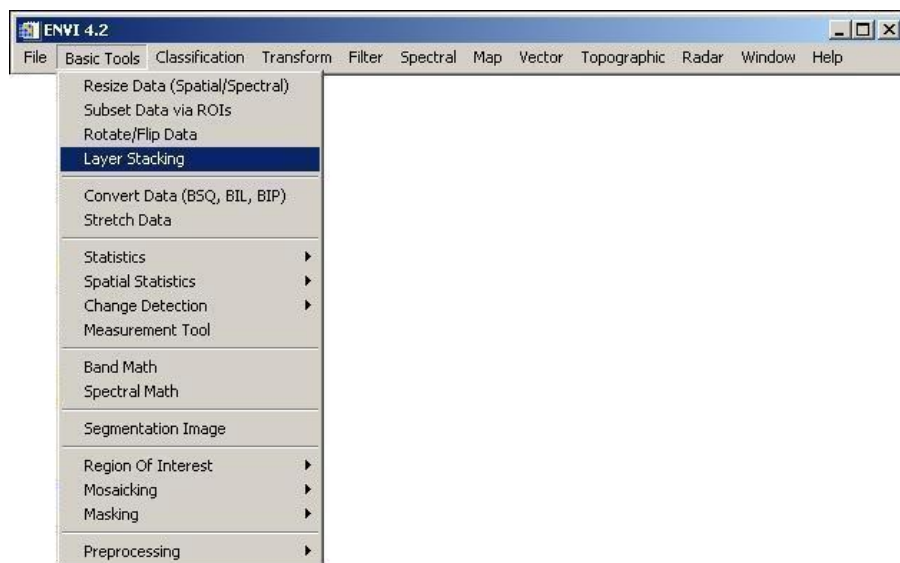


Figura 6-5

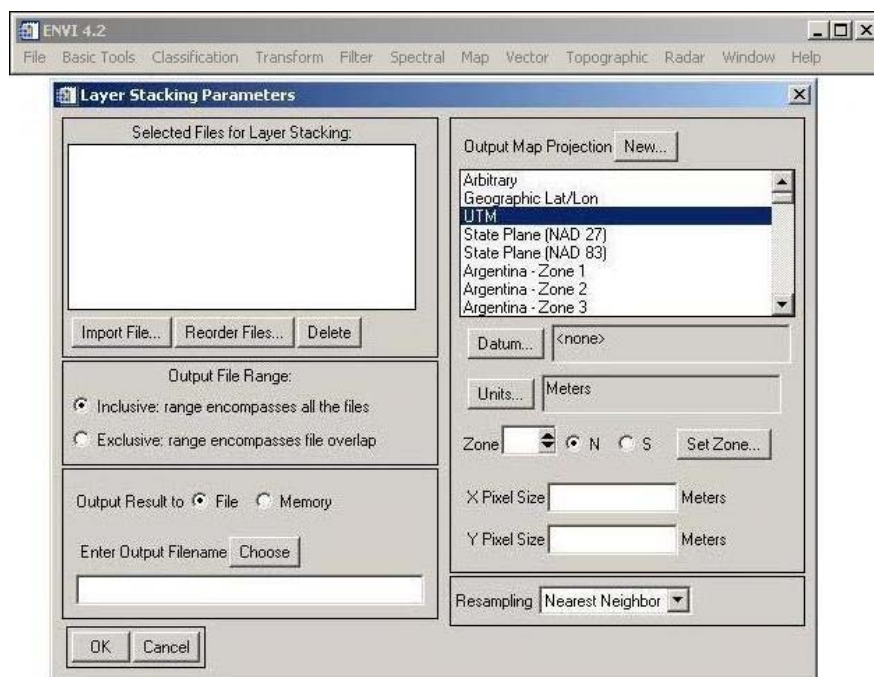


Figura 6-6

3. Se muestra la ventana de título **Layer Stacking Input File**. En ella se selecciona el archivo de salida de la corrección de radiancia, correspondiente a la banda de menor valor y se pulsa el botón de acción **Ok**. Este procedimiento se realiza con cada uno de los archivos de salida de la corrección de radiancia en estricto orden de menor a mayor (Figura 6-7).

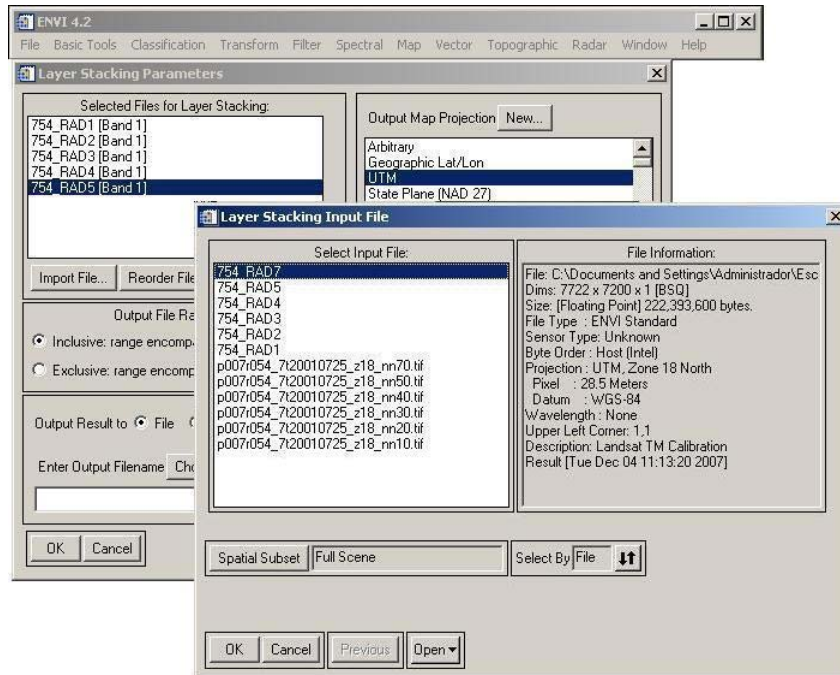


Figura 6-7

4. A continuación se pulsa el botón de acción **Choose**, en donde se elige la ruta y el nombre del archivo a generar, luego se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-8).

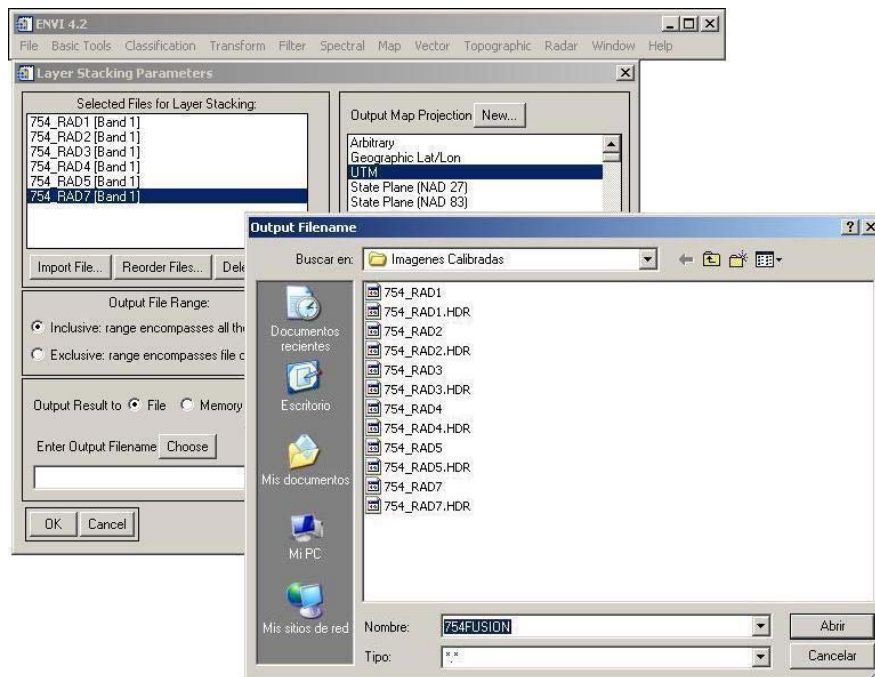


Figura 6-8

- **Conversión a Formato BIL**

Los archivos de salida generados en el paso anterior se encuentran en formato de archivo BSQ (formato secuencial de bandas), sin embargo el formato utilizado por la mayoría de las aplicaciones de procesamiento del ENVI® 4.2 es de extensión BIL (formato de bandas

intercalados por línea). Por esta razón se debe realizar una conversión previa de BSQ a BIL. Para ello se procede de la siguiente manera:

- 1 En la barra de menú principal, se selecciona la opción **Convert Data (BSQ, BIL, BIP)** (Figura 6-9).



Figura 6-9

- 2 Aparece la ventana de título **Convert File Input File**, donde se selecciona la imagen generada en el paso anterior y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-10).

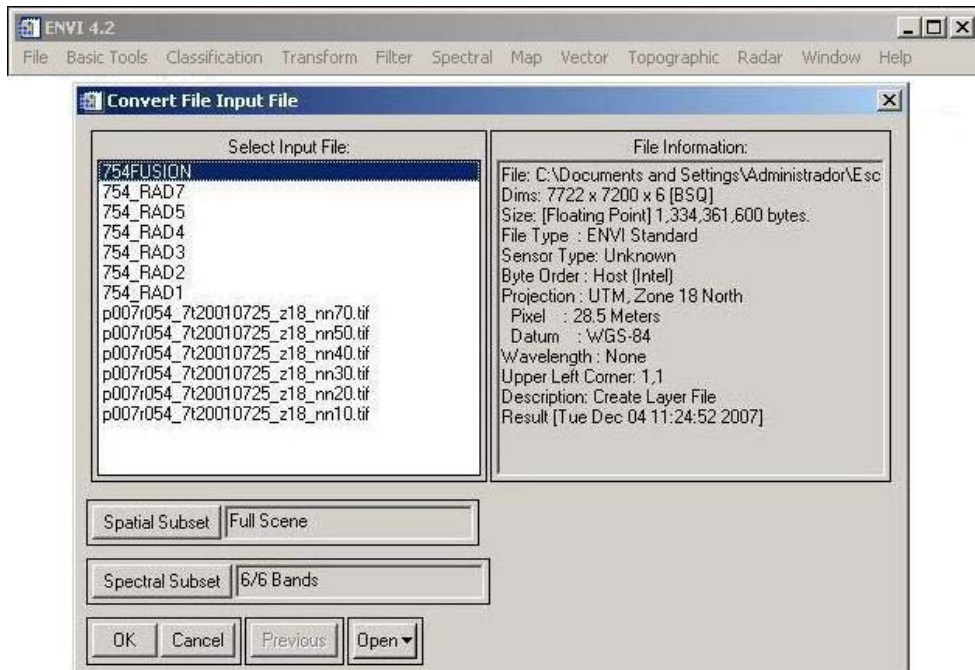


Figura 6-10

- 3 A continuación, en la ventana de título **Convert File Parameters**, se selecciona la casilla de verificación **Output Interleave BIL** y se pulsa el botón de acción **Choose**, en donde se elige la ruta y el nombre del archivo a generar, luego se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-11).

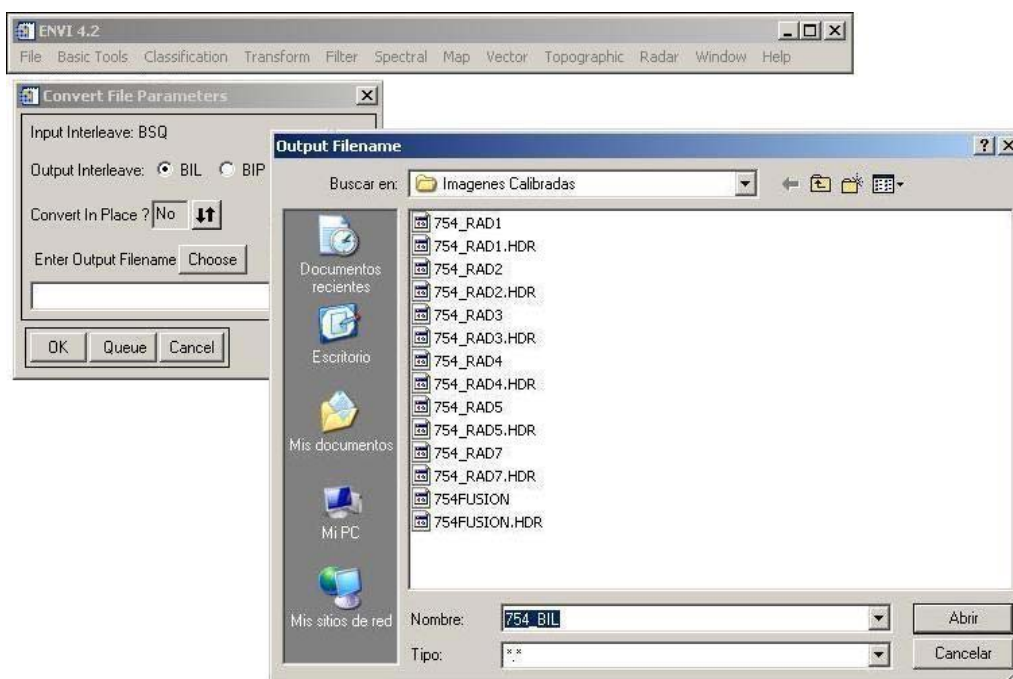


Figura 6-11

• Corrección Atmosférica (FLAASH)

El comando de corrección atmosférica utilizado por el ENVI[®] 4.2 es llamado FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). Mediante esta aplicación se elimina de la radiancia recibida por el sensor los efectos de absorción y dispersión de la energía electromagnética, causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión, además se convierte la radiancia en valores de reflectividad de la superficie. Para la aplicación de esta función se requiere de parámetros de entrada, contenidos en la metadata. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se crea un archivo extensión .TXT (un block de notas), donde se introducen los valores de frecuencia de onda ordenados en una columna. Los valores correspondientes a esta columna son los siguientes: **0.485; 0.57; 0.66; 0.84; 1.65** y **2.215**, escritos en ese orden, los cuales representan valores promedio entre el mínimo y el máximo valor de longitud de onda para cada banda.
2. En la barra de menú principal, se selecciona la opción **Basic Tools**. Luego en el menú desplegable que aparece, se sitúa el puntero del ratón en la opción **Preprocessing**, en el

siguiente menú desplegable se sitúa el puntero en la opción **Calibration Utilities**, seleccionando finalmente la opción **FLAASH** del ultimo menú en aparecer (Figura 6-12).

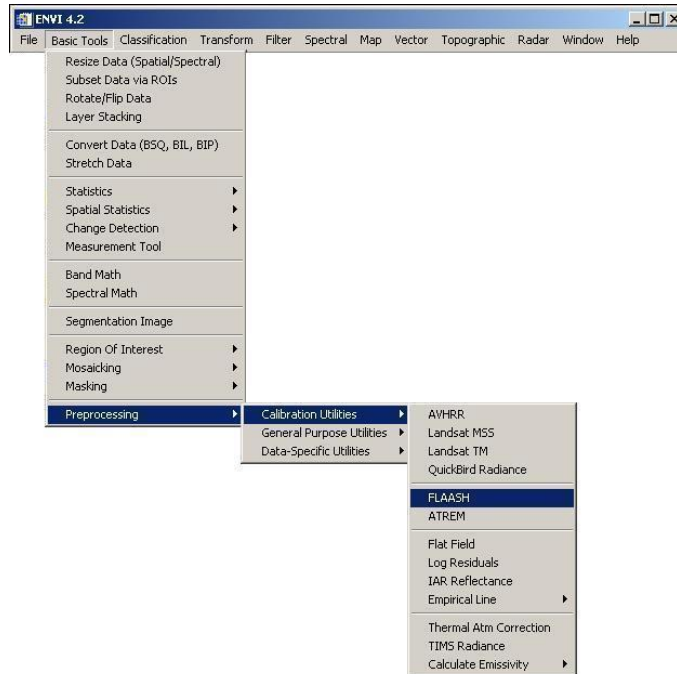


Figura 6-12

3. En la ventana de título **FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters**, se pulsa el botón de acción **Input Radiance Image**. Luego al mostrarse la ventana de título **FLAASH Input File** se selecciona el archivo BIL generado anteriormente (Figura 6-13).
4. Al mostrarse la ventana de título **Enter ASCII Filename Containing Wavelength....**, se busca y se selecciona el archivo TXT que contiene los valores de frecuencia de onda creadas en el paso 1 (Figura 6-14). Seguidamente se muestra una ventana donde aparecen estos valores (Figura 6-15).

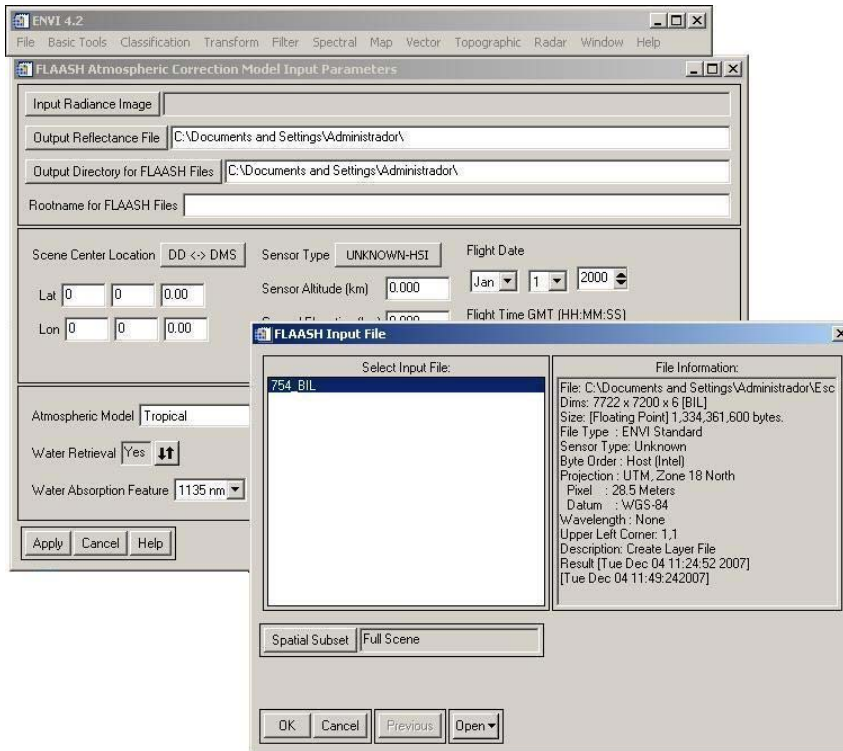


Figura 6-13

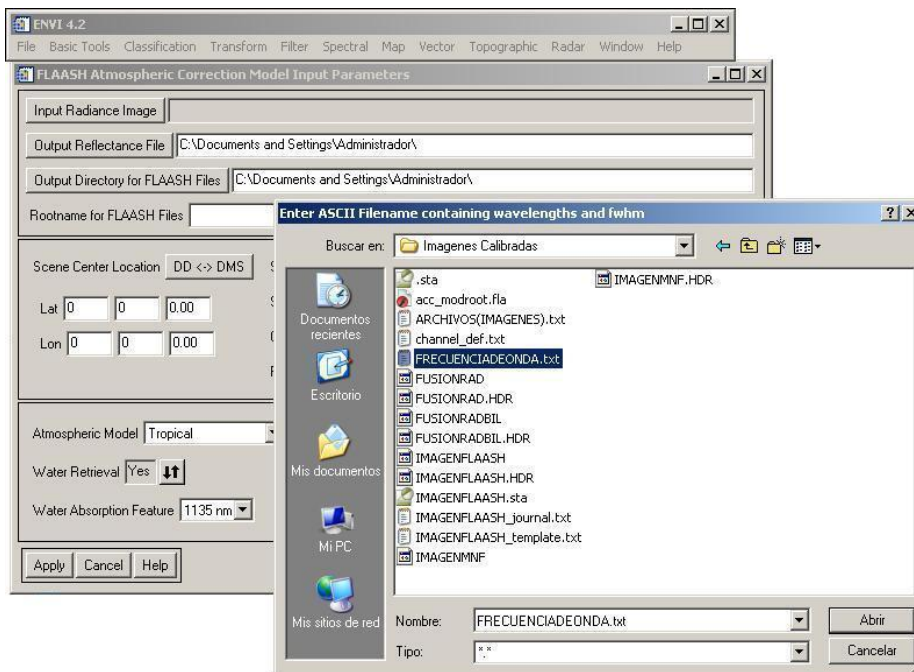


Figura 6-14

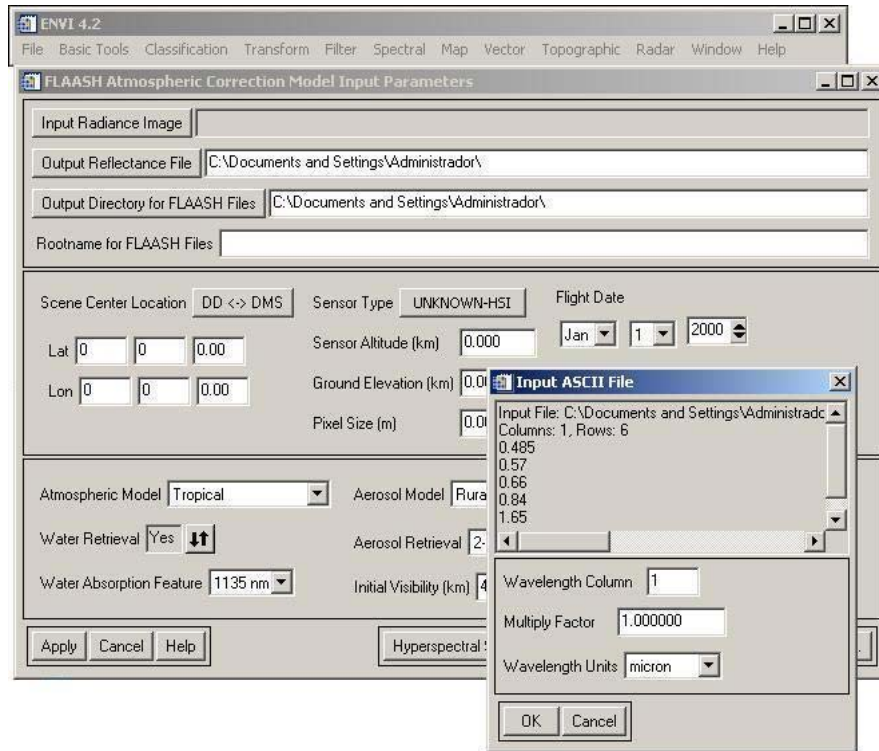


Figura 6-15

- Se muestra una ventana de título **Radiance Scale Factors** donde se selecciona la opción **Use single scale factor for all bands** en la casilla de chequeo. Luego se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-16).

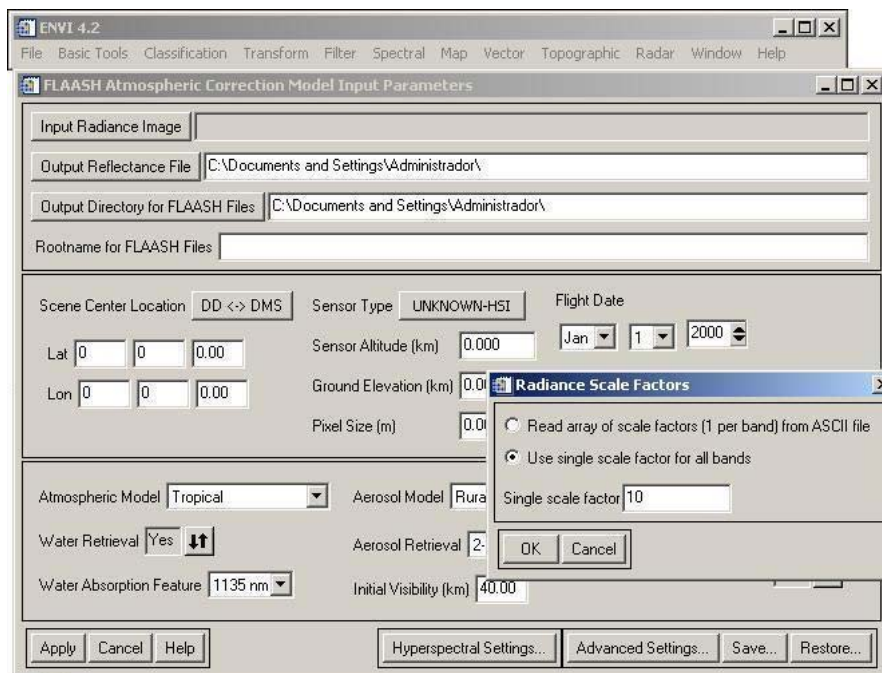


Figura 6-16

6. Seleccionar el botón de acción **Output Reflectance File**. Se introduce el nombre bajo el cual es guardado el nuevo archivo de salida. Después se selecciona el botón de acción **Output Directory for FLAASH File**, y se selecciona la carpeta que va a contener el archivo de salida. Luego en el cuadro de texto para la opción **Rootname for FLAASH File**, se introduce el nombre del archivo de salida sin incluir la extensión. A continuación en la opción **Sensor Type** se pulsa el botón de menú **UNKNOWN-MSI**, situar el puntero del ratón en la opción multiespectral, y del menú desplegable que aparece, seleccionar la opción **Landsat TM7** (Figura 6-17).

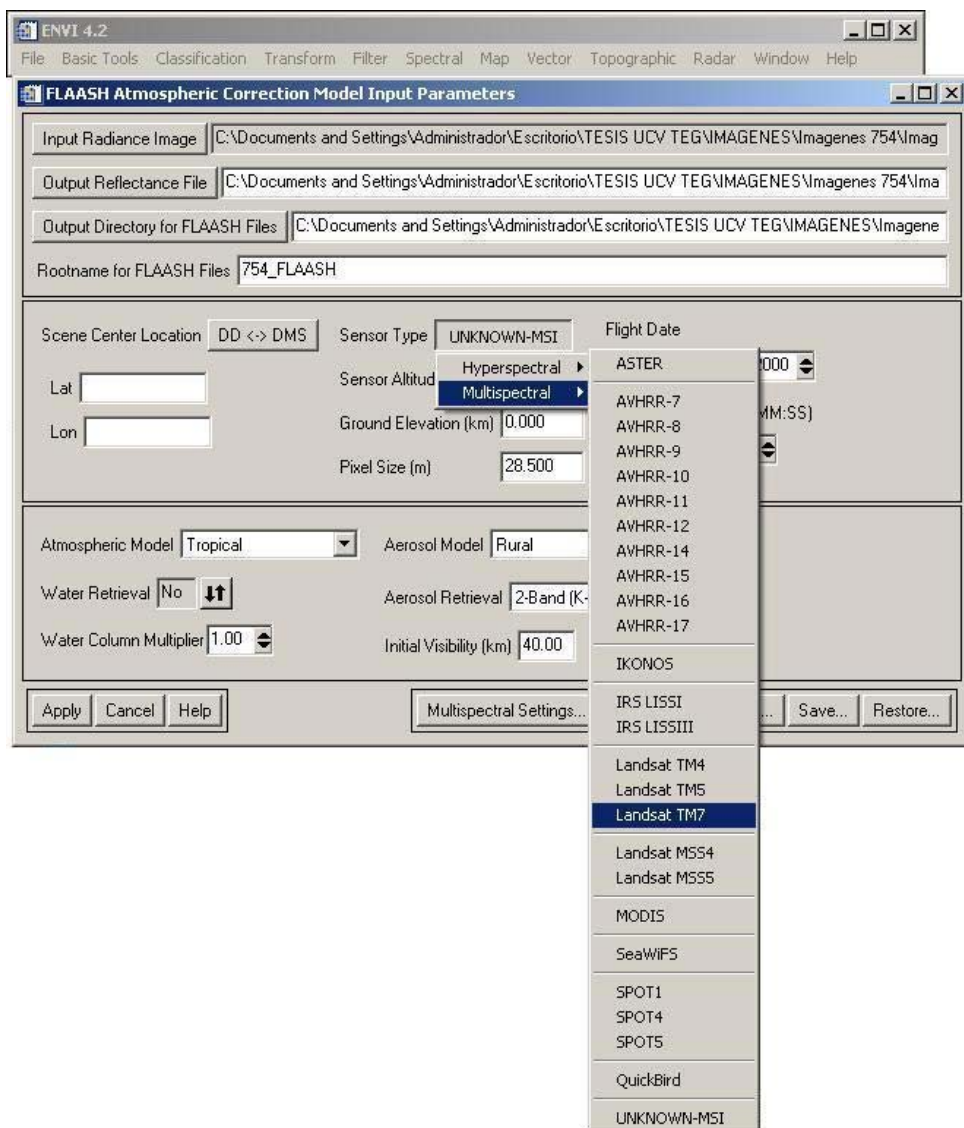


Figura 6-17

7. Pulsar el botón de acción **Multiespectral Settings**. Se muestra la ventana de título **Multiespectral Settings** y se selecciona la pestaña **Kaufman-Tanre Aerosol Retrieval**, donde se selecciona para la opción **KT Upper Channel**, la banda 7 y para

KT Lower Channel la banda 3. Seguidamente se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-18).

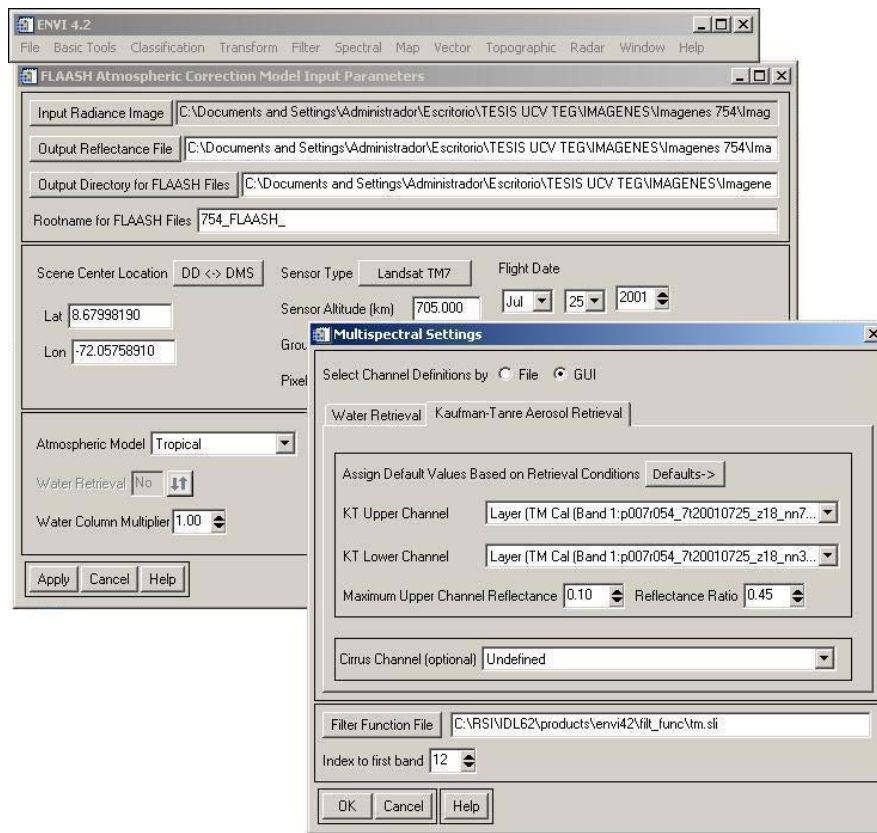


Figura 6-18

8. Una vez introducido los parámetros se pulsa el botón de acción **Apply**, mostrando una ventana de progreso (Figura 6-19).

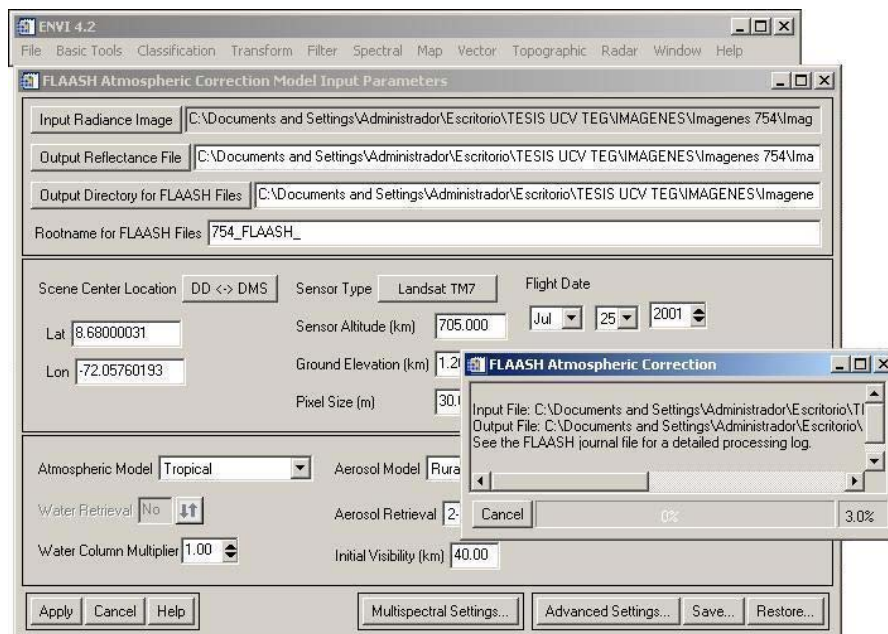


Figura 6-19

- **Corrección de Fracción Mínima de Ruido (MNF)**

El efecto de ruido en las imágenes suceden debido a interferencias mecánicas en el sistema, degradando la señal registrada o eliminando la información radiométrica contenida. La corrección de Fracción Mínima de Ruido permite la disminución del ruido en la data espectral.

El comando de corrección de fracción mínima de ruido utilizado por el ENVI[®] 4.2 es la función **MNF Rotation**, la cual determina la dimensionalidad espectral de los datos. Previo a la corrección, es necesario extraer de la imagen las nubes y sus sombras, debido a que representan valores extremos en la imagen. Para esto se procede a generar un archivo “shapefile” en ArcGis[®] en el cual se procede a vectorizar las nubes y sus sombras.

La realización de este proceso requiere una imagen de extensión IMG. Este archivo es el resultado de la fusión de las imágenes de extensión TIF. Para generar este archivo se utiliza el paquete ERDAS IMAGINE[®] 8.5, de la siguiente manera:

1. *Conversión TIFF a IMG*

- 1.1 En la barra de menú principal se presiona el botón que corresponde a la opción **Import**
- 1.2 En la ventana de título **Import/ Export** que aparece, en el cuadro de selección **Type** se selecciona la opción TIFF y en el cuadro de selección **Media**, se selecciona la opción **File**.
- 1.3 En la opción **Input File** se elige el archivo TIFF perteneciente a la primera banda. En la opción **Output File** se coloca la ruta y el nombre del archivo de salida IMG. A continuación se presiona el botón de acción **Ok** (Figura 6 -20).

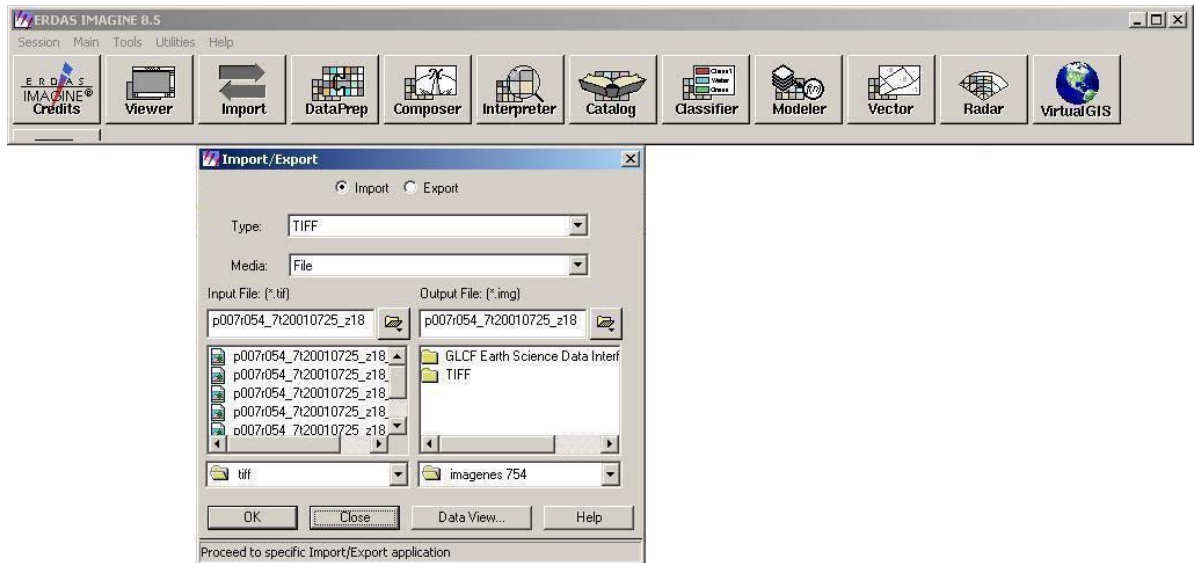


Figura 6-20

1.4 Se repite el paso 1.3 para cada una de las imágenes TIFF.

2. Unión de Imágenes IMG

2.1 En la barra de menú principal se presiona el botón que corresponde a la opción **Interpreter**, en el menú desplegable se selecciona la opción **Utilities** y a continuación la opción **Layer Stack** (Figura 6 -21).

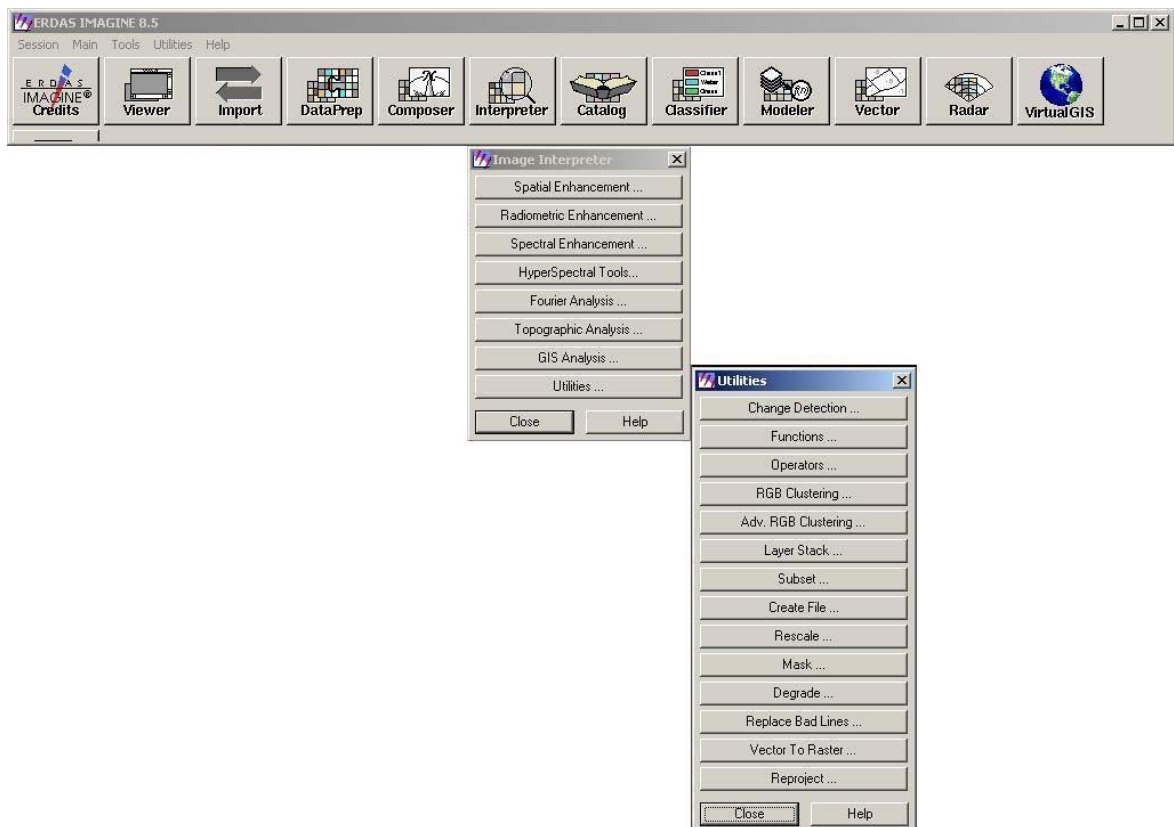


Figura 6-21

2.2 En la opción **Input File** se selecciona cada archivo IMG creado. Esta selección se realiza en orden de bandas. En la opción **Layer** se selecciona la opción **1** para la primera imagen y para el resto de imágenes se selecciona del cuadro de lista la opción **All**. Para cada archivo IMG y su correspondiente Layer seleccionado, se presiona el botón de acción **Add**.

2.3 En la opción **Output File** se coloca la ruta y el nombre del archivo de fusión de salida y se presiona el botón de acción **Ok** (Figura 6 -22).

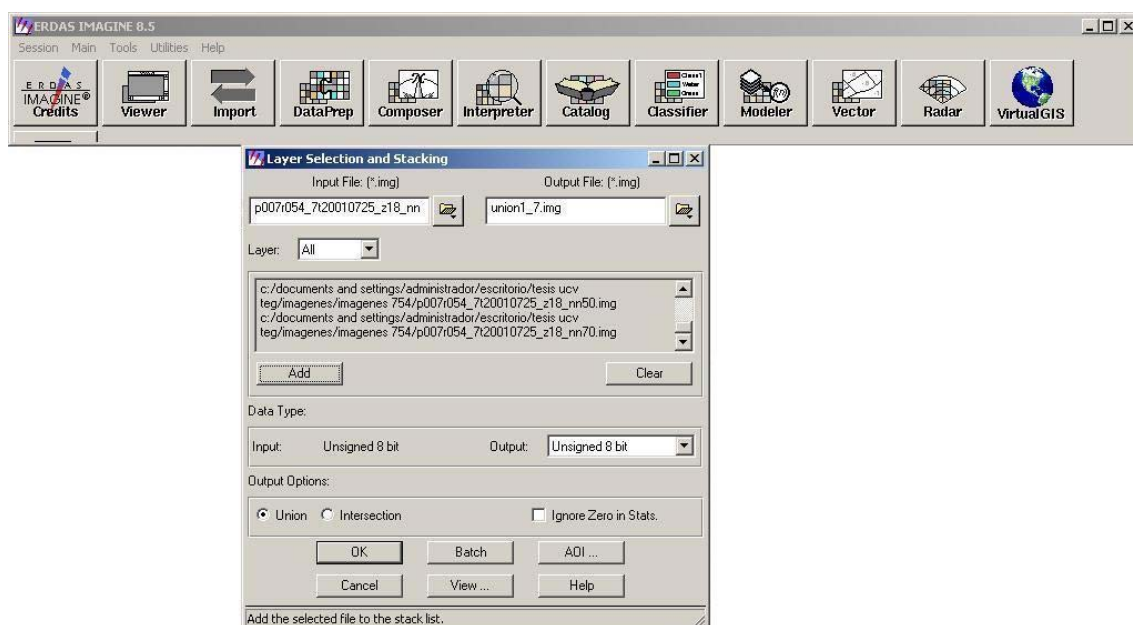


Figura 6-22

3. Creación del Archivo Shapefile en ArcGIS® 9.1

3.1 Abrir el archivo de extensión IMG que contiene la fusión de las imágenes. Al realizar esta acción, aparece una ventana adicional de título **ArcCatalog- ArcView**, la cual se debe activar.

3.2 La ventana **ArcCatalog- ArcView** presenta tres módulos. Situar el puntero en el modulo situado al extremo derecho. A continuación pulsar el botón derecho del ratón y en el menú desplegable seleccionar la opción **New** y luego **Shapefile** (Figura 6 -23).

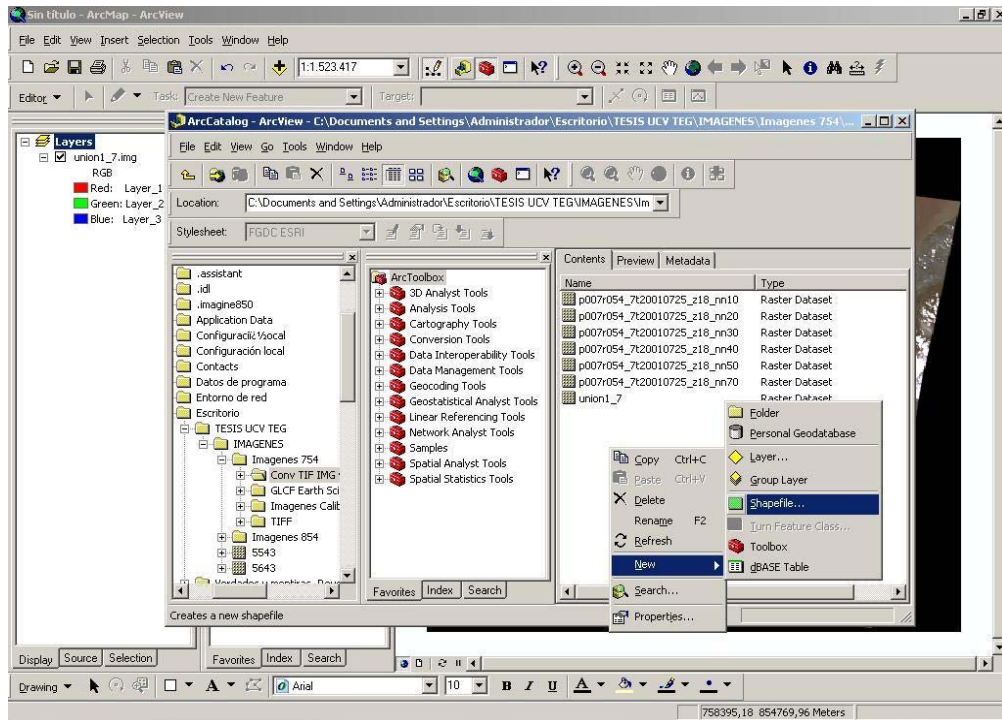


Figura 6-23

3.3 Aparece una ventana de título **Create New Shapefile**, donde se coloca en la opción **Name** el nombre del archivo de salida y en la opción **Feature Type** seleccionar del cuadro de lista el tipo **Polygon**. A continuación pulsar el botón de acción **Ok** (Figura 6 - 24).

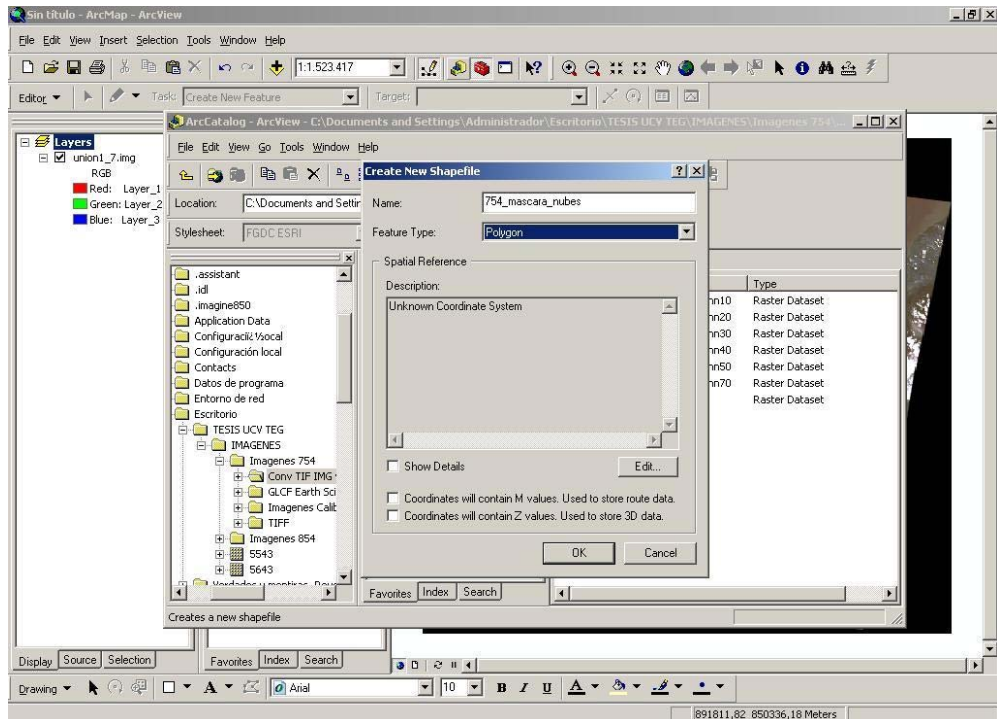


Figura 6-24

3.4 Se muestra la ventana de título de **Properties of Spatial Reference** y se pulsa el botón de acción **Select** (Figura 6 -25).

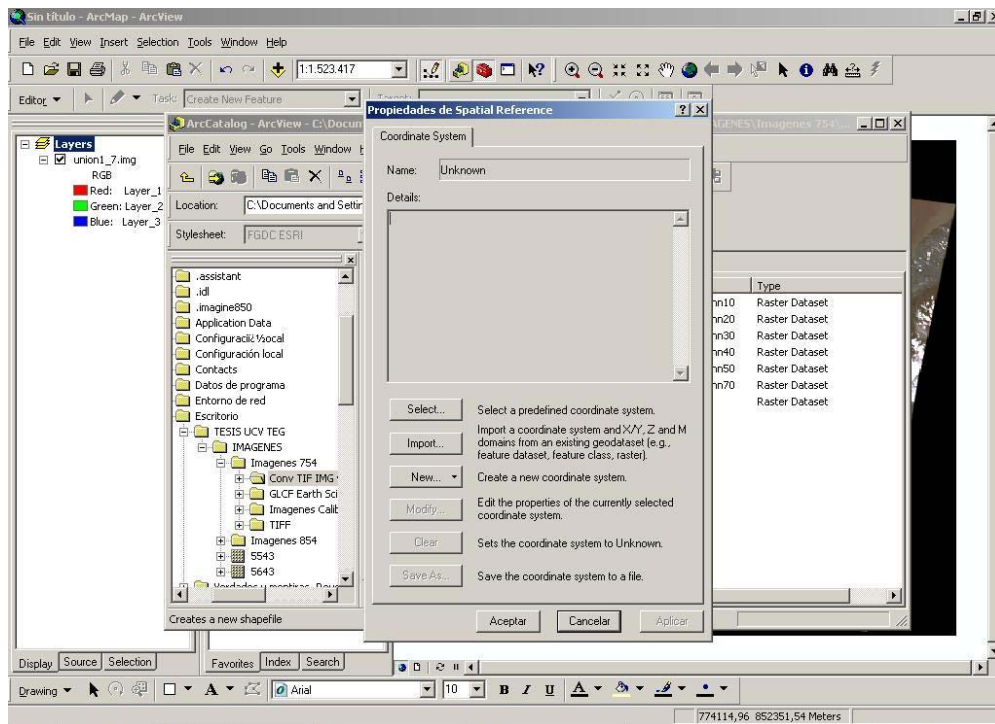


Figura 6-25

3.5 En la ventana de título **Browse for Coordinate System**, se selecciona el sistema acorde a la imagen. Para la imágenes utilizadas en este trabajo se selecciona el sistema WGS 1984 UTM Zone 18 N. Seguidamente se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6 -26).

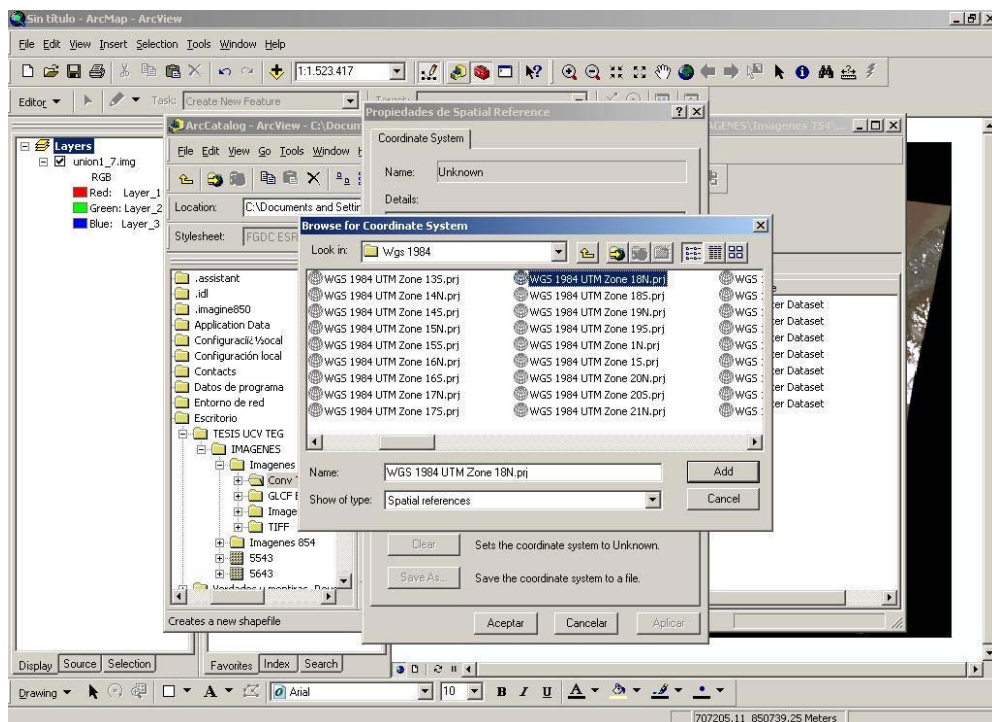



Figura 6-26

3.6 En la columna ubicada del lado izquierdo en la ventana principal del ArcGIS® 9.1, aparece el nuevo archivo creado, el cual se selecciona para realizar los polígonos que van a cubrir las nubes y sombras.

3.7 Para la creación de estos polígonos se debe pulsar el botón **Editor** ubicado en la barra de herramientas y en el menú desplegable seleccionar la opción **Start Editing**.

3.8 Luego se pulsa sobre el icono  y empieza el proceso de delimitar el borde de las nubes y de sus respectivas sombras, creando un polígono cerrado (Figura 6-27).

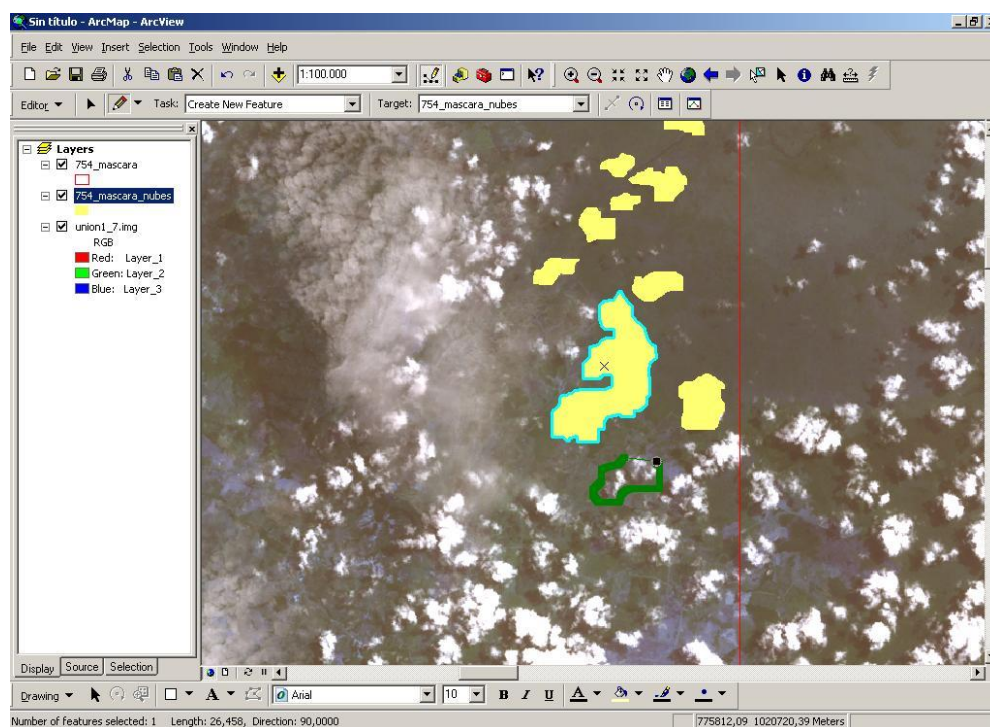


Figura 6-27

El archivo generado se importa al paquete ENVI® 4.2, donde posteriormente se genera una máscara que se adjunta a la imagen generada luego de realizar la corrección atmosférica (FLAASH), de manera de eliminar estos elementos (nubes y sombras) al momento de realizar la corrección MNF.

El procedimiento de creación del archivo de la máscara es el siguiente:

4. Construcción de la Mascara

4.1 En la barra de menú principal del ENVI® 4.2, seleccionar el comando **File** y en el menú desplegable seleccionar **Open Image File** para abrir el archivo de salida correspondiente a la corrección atmosférica (FLAASH) (Figura 6-28).

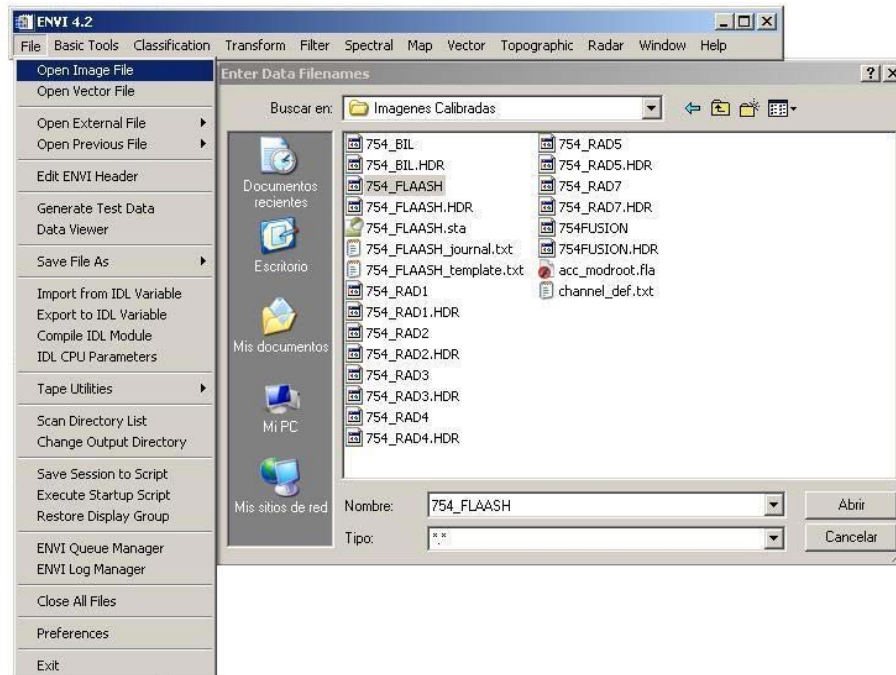


Figura 6-28

4.2 En la barra de menú principal, seleccionar el comando **File** y en el menú desplegable seleccionar **Open Vector File**. En la ventana de título **Select Vector Filenames**, se busca y se selecciona el archivo shapefile creado anteriormente en ArcGis (Figura 6-29).

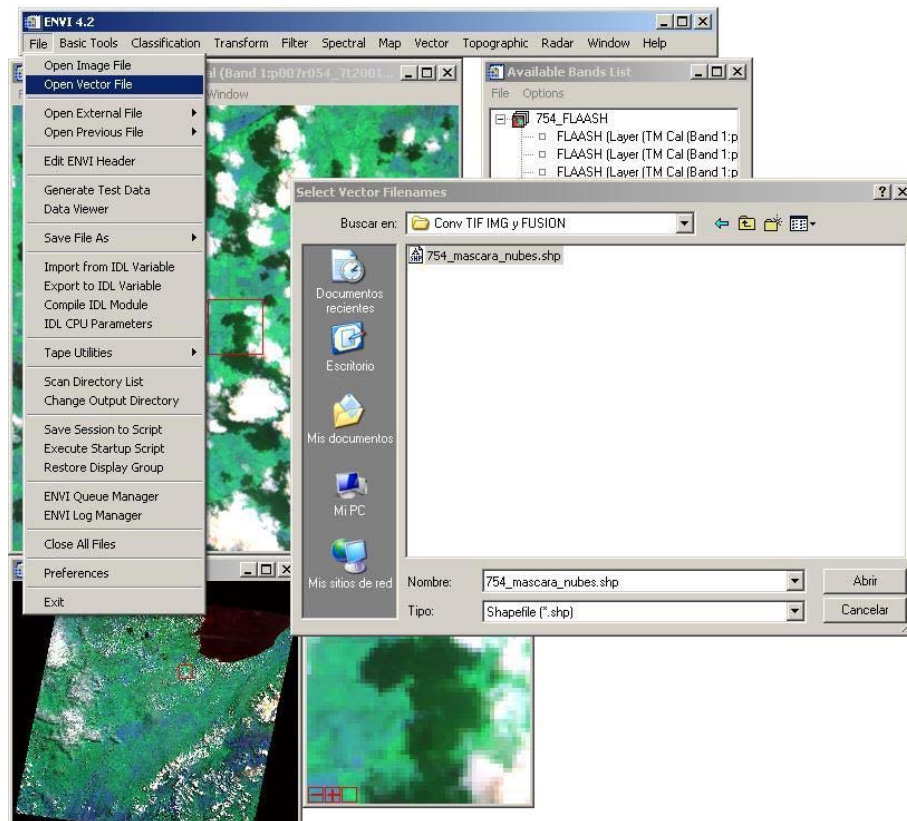


Figura 6-29

4.3 Aparece una ventana de título **Import Vector Files Parameters**, en la opción **Enter Output Filename (.evf)**, pulsar el botón de acción **Choose**, donde se selecciona la ruta y el nombre del archivo de salida y se pulsa sobre el botón de acción **Ok** (Figura 6-30).

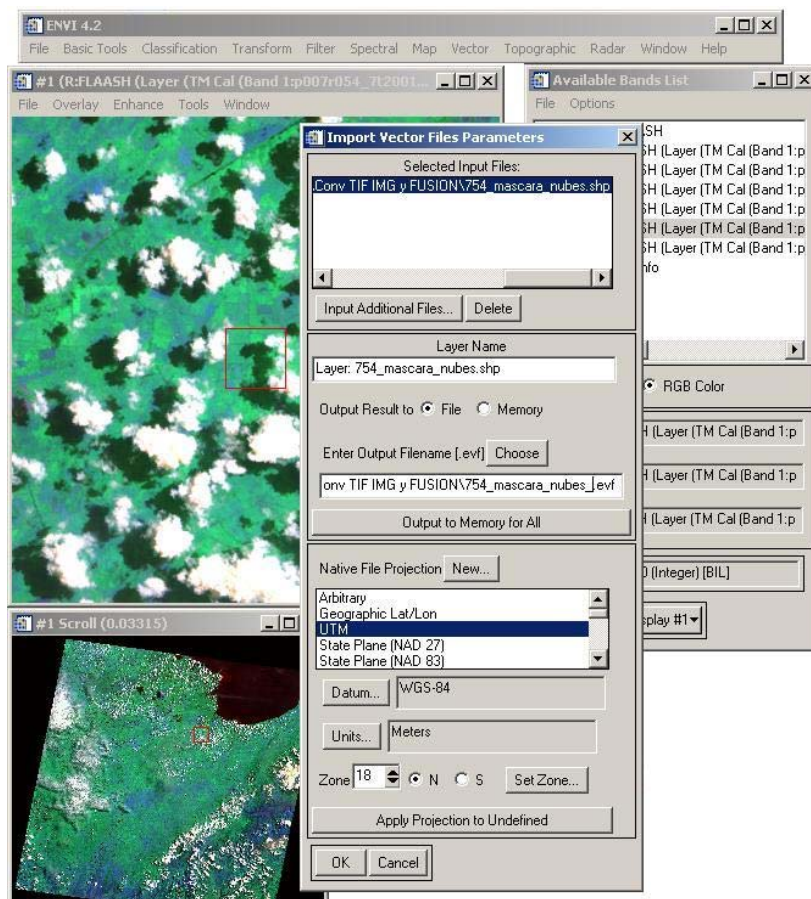


Figura 6-30

4.4 Seguidamente aparecen dos nuevas ventanas de títulos **Load Vector** y **Available Vector List**, se verifica que la opción **display # 1** y el nombre del archivo shapefile estén seleccionados, de manera que el archivo shapefile se abra en la misma ventana que la imagen, luego se pulsa el botón de acción **Ok** de la ventana **Load Vector** (Figura 6-31).

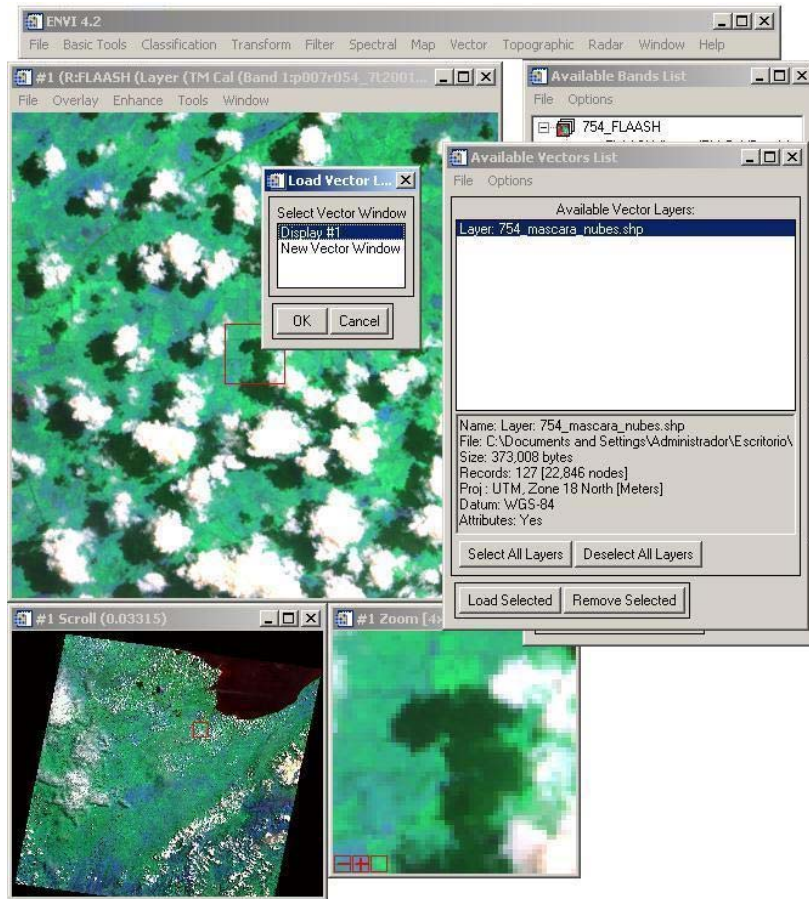


Figura 6-31

4.5 En la ventana de título **#1 Vector Parameters** que aparece, se selecciona la opción **File** y en el menú desplegable que se muestra pulsar la opción **Export Active Layer To ROIs** (Figura 6-32).

4.6 Aparece la ventana de título **Export EVF Layers to ROI**. En ella se selecciona la opción **Convert all records of an EVF layer to one ROI** y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-33).

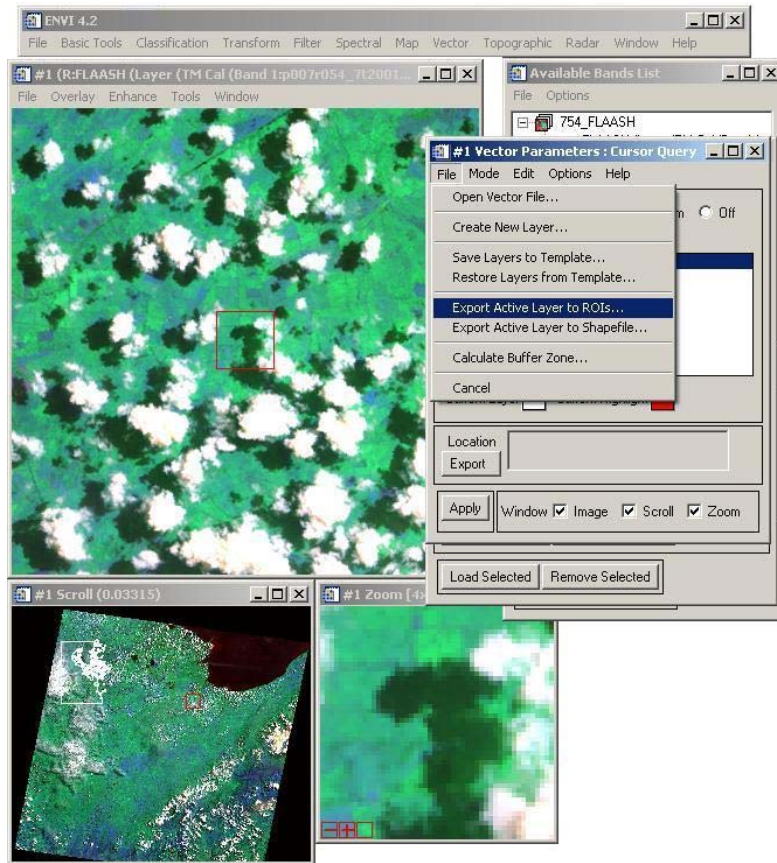


Figura 6-32

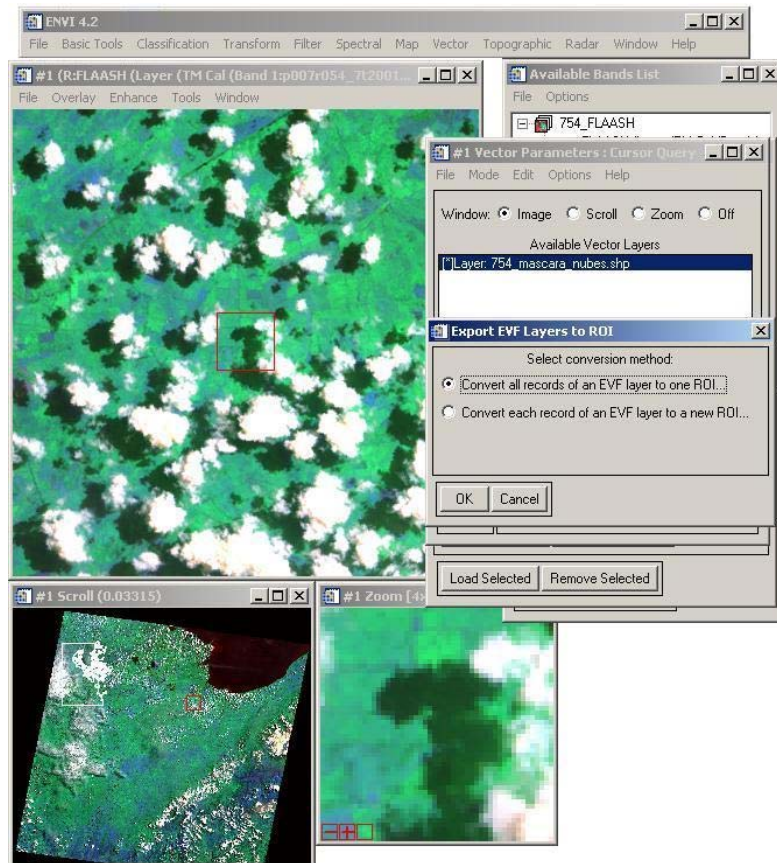


Figura 6-33

4.7 En el menú principal se selecciona la opción **Basic Tools**, en el menú desplegable se seleccionan las opciones **Masking** y **Build Mask** (Figura 6-34). Después en la ventana de título **Mask Definition** se verifica que este seleccionada la opción **Display #1** y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-35).

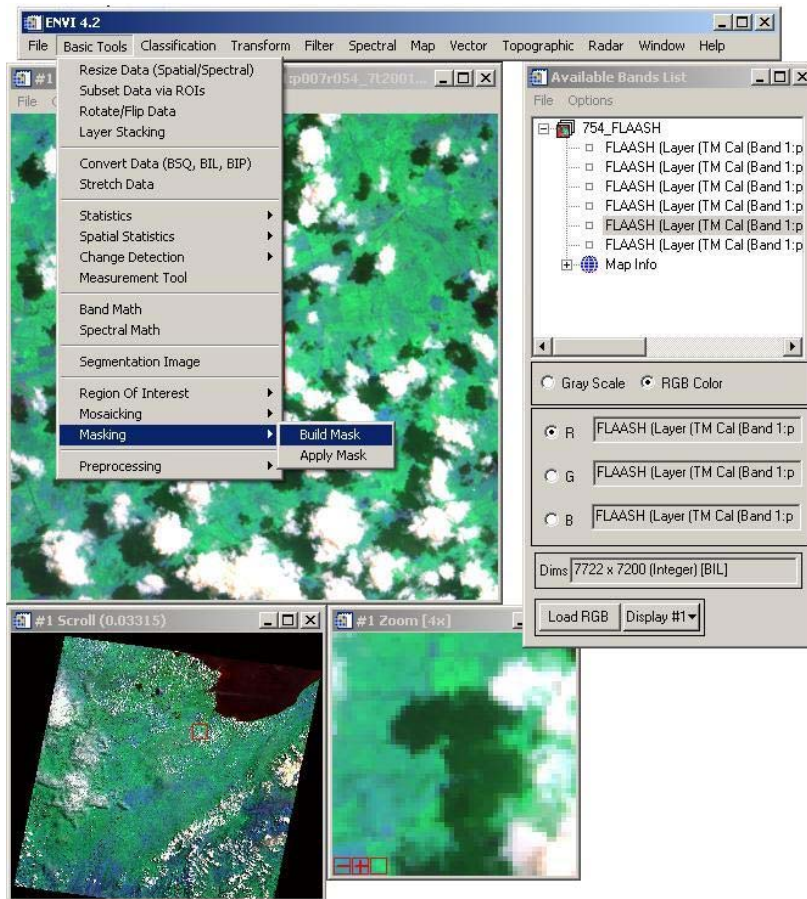


Figura 6-34

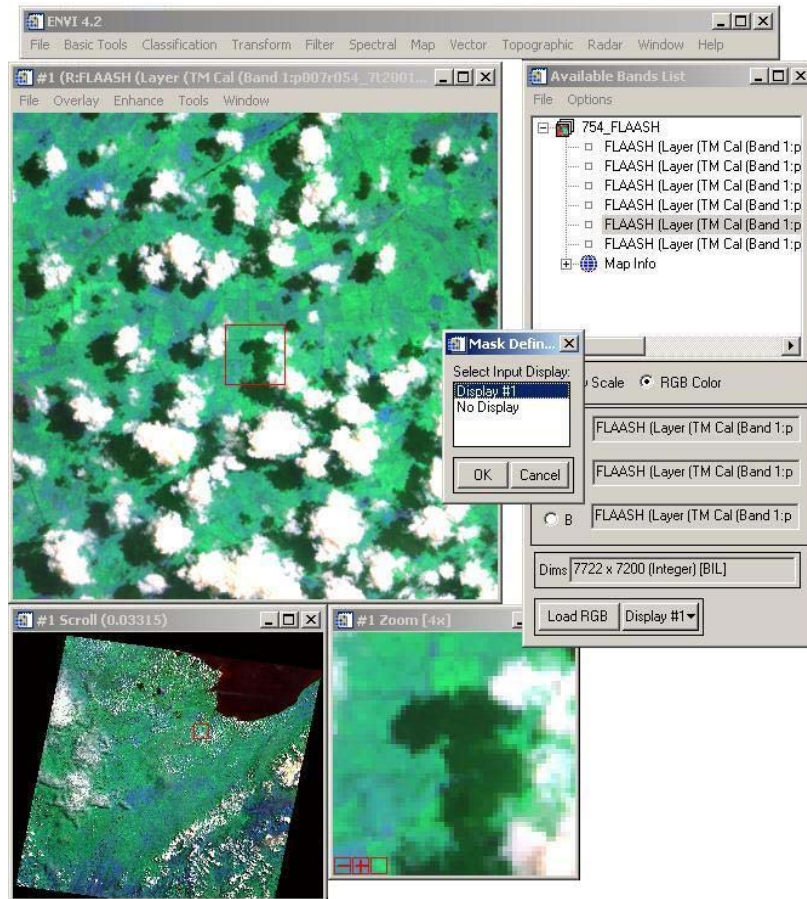


Figura 6-35

- 4.8 Aparece la ventana de título **#1 Mask Definition**, en ella se pulsa el comando **options** y en el menú desplegable se selecciona la opción **Import ROIs** (Figura 6-36).
- 4.9 En la ventana de título **Mask Definition Input ROIs** se verifica que aparezca seleccionado el archivo y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-37).

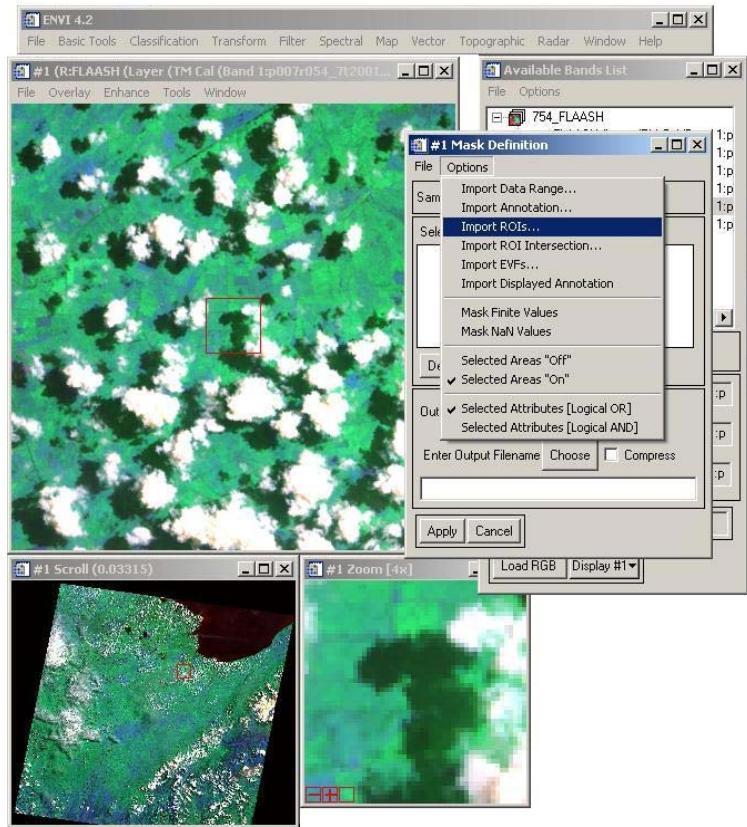


Figura 6-36

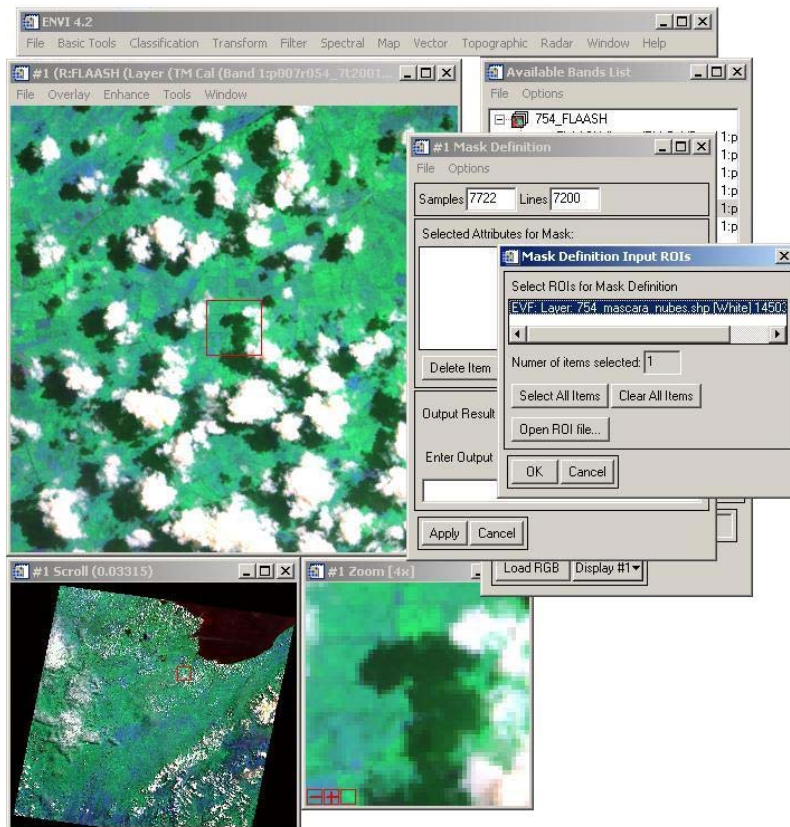


Figura 6-37

4.10 En la ventana de título #1 **Mask Definition** pulsar el comando **Options** y seleccionar la opción **Selected Areas "Off"** (Figura 6-38).

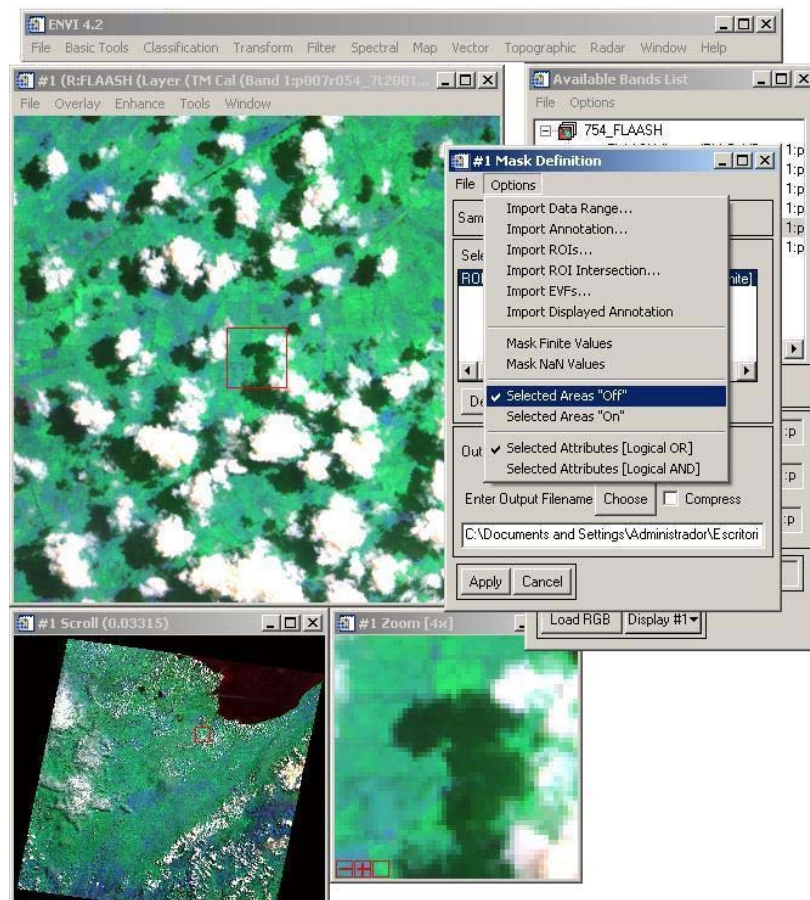


Figura 6-38

Una vez realizado estos pasos, se procede a realizar la corrección de fracción mínima de ruido (MNF).

5. Corrección MNF

5.1 En el menú principal del ENVI[®] 4.2 se selecciona el comando **Spectral** y en el menú desplegable que aparece, se seleccionan las opciones **MNF Rotation**, luego **Forward MNF** y **Estimate Noise Statistics from Data** (Figura 6-39).

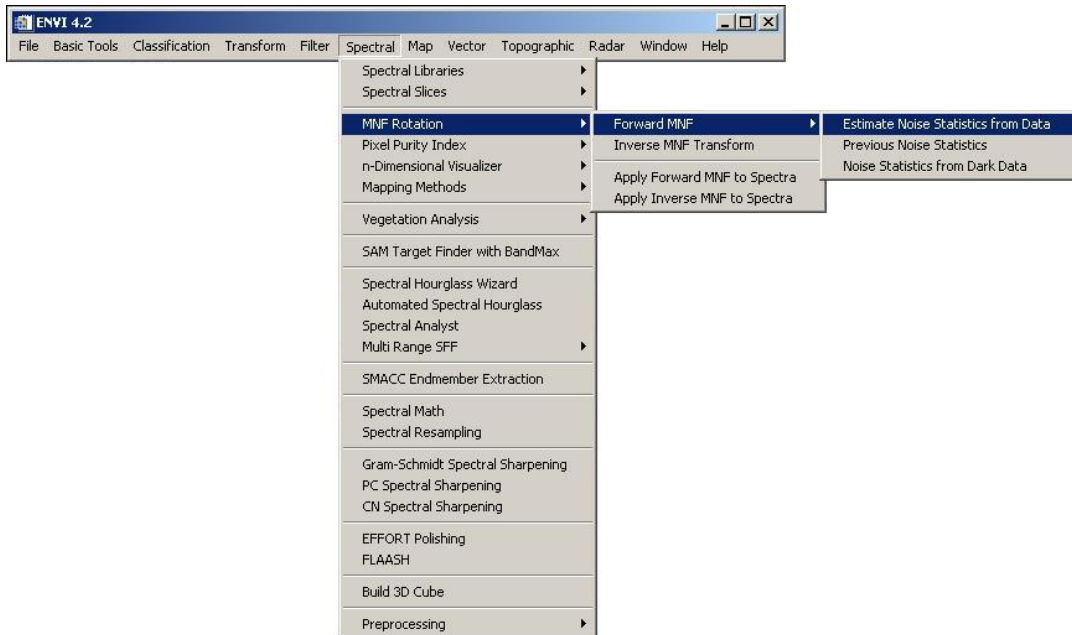


Figura 6-39

5.2 Aparece la ventana de título **MNF Transform Input File** y se selecciona el archivo de salida de la corrección atmosférica, luego se pulsa la opción **Spatial Subset**, y en la ventana de título **Select Spatial Subset**, se pulsa el botón **Image**. A continuación aparece la ventana de título **Subset by Image**, donde se procede a delimitar el área donde se va a realizar la corrección MNF (Figura 6-40). Una vez definida el área se pulsa el botón de acción **Ok**.

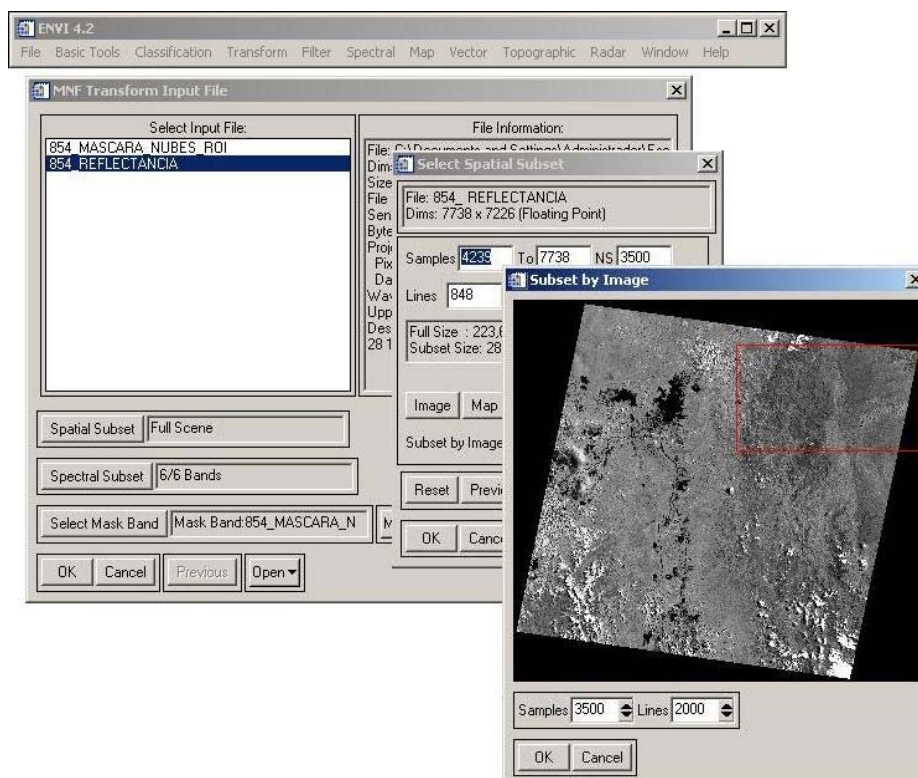


Figura 6-40

5.3 Seguidamente se pulsa la opción **Spectral Subset**, y al aparecer la ventana de título **File Spectral Subset** se seleccionan las tres primeras bandas. Seguidamente se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-41).

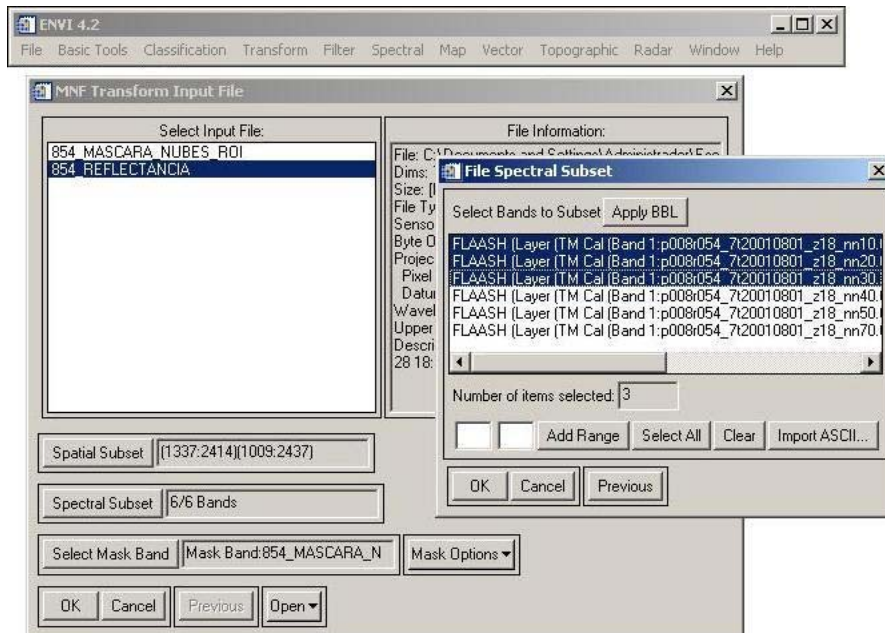


Figura 6-41

5.4 A continuación se pulsa el botón de acción **Ok** de la ventana de título **MNF Transform Input File** y aparece la ventana de título **Forward MNF Transform Parameters**, en la cual se escoge la ruta y el nombre del archivo de salida para las opciones **Output Noise Stats Filename (.sta)**, **Output MNF Stats Filename (.sta)** y **Output Filename**. Se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-42).

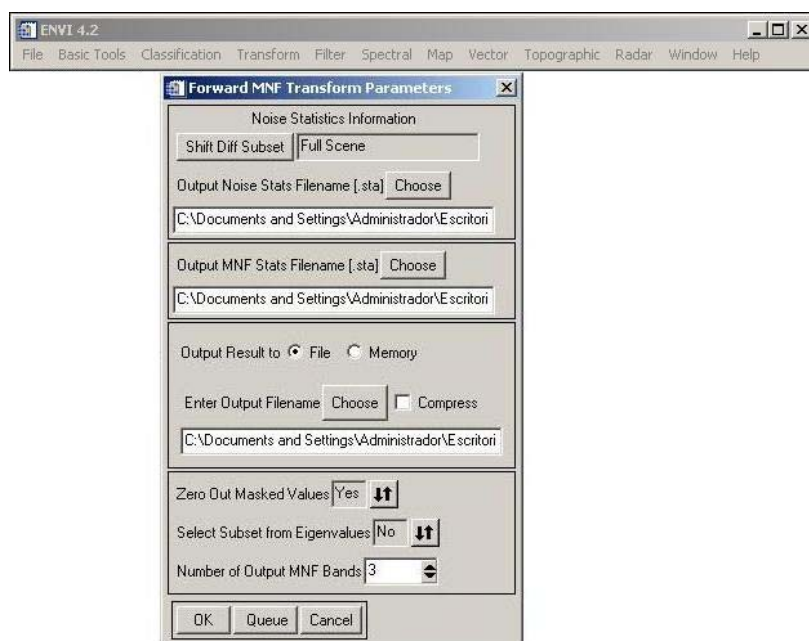


Figura 6-42

5.5 Finalizado el proceso, aparece una ventana de título **MNF Eigenvalues**, que muestra un grafico de los autovalores MNF organizados en orden decreciente de la varianza (Figura 6-43).

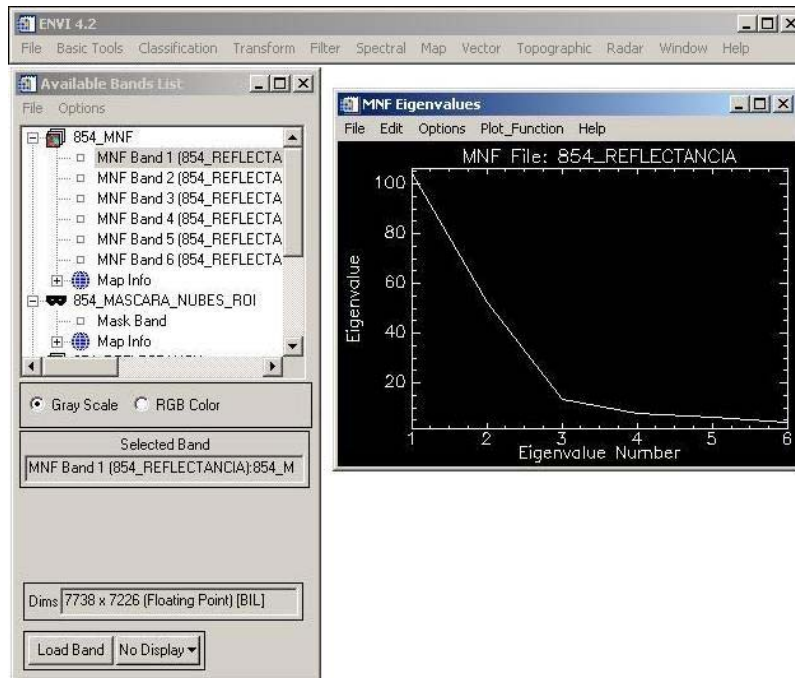


Figura 6-43

- **Índice de Pureza de Píxel (PPI)**

La herramienta Índice de Pureza de Píxel (PPI) del ENVI[®] 4.2 tiene como utilidad encontrar espectralmente píxeles puros o píxeles extremos en los datos multiespectrales. La finalidad de encontrar estos píxeles puros es para trabajar con la mayor cantidad de píxeles verdaderos y eliminar aquellos que no aportan información.

El procedimiento para realizar el PPI es el siguiente:

1. En la barra de menú principal del ENVI[®] 4.2, se selecciona el comando **Spectral** y en el menú desplegable que aparece se seleccionan las opciones **Píxel Purity Index** y luego **(FAST) New Output Band** (Figura 6-44).

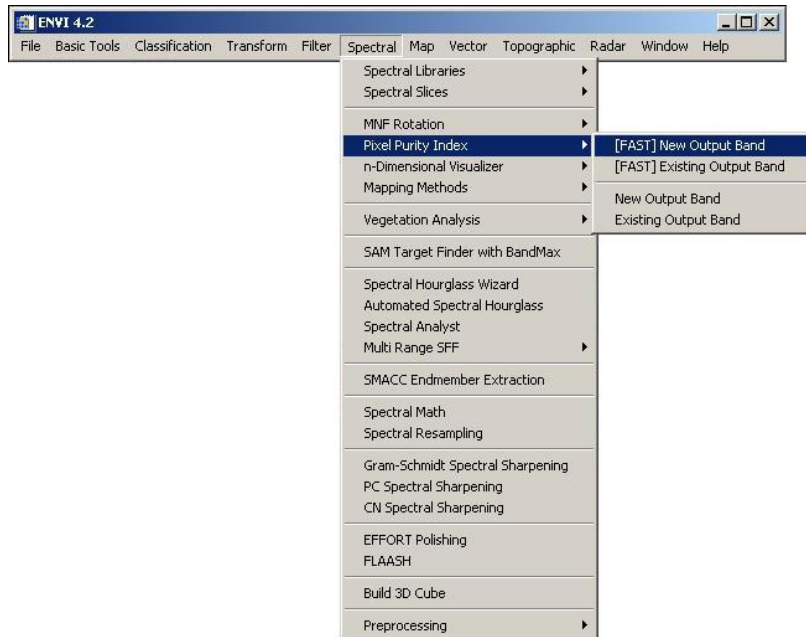


Figura 6-44

2. Luego al aparece la ventana de título **Fast Píxel Purity Index Input Data File**, se selecciona el archivo de salida de la corrección MNF, y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-45).

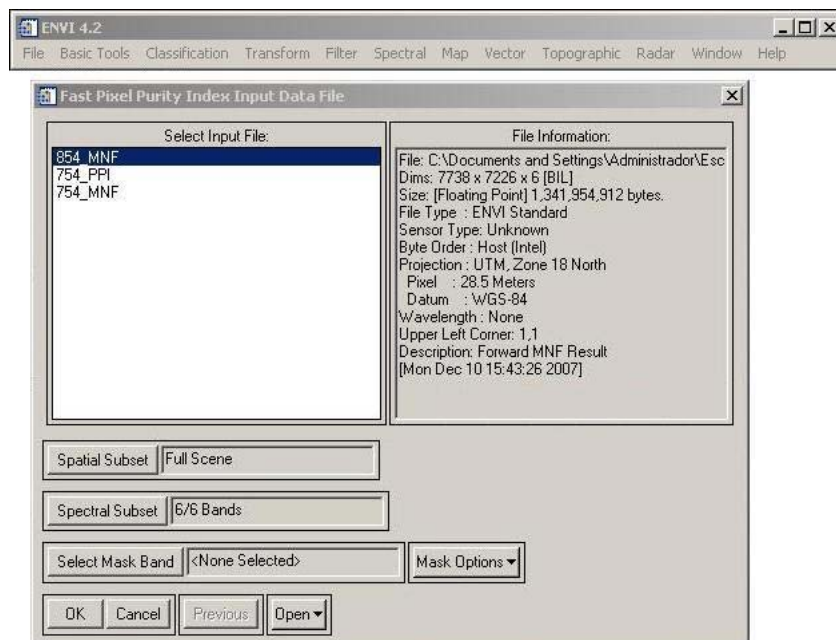


Figura 6-45

3. Durante el procedimiento se muestra un gráfico en el cual se observa el estatus de procesamiento, donde se muestra el total de número de píxeles extremos que satisfacen el criterio de tolerancia del PPI, como una función del número de iteraciones (Figura 6-46).

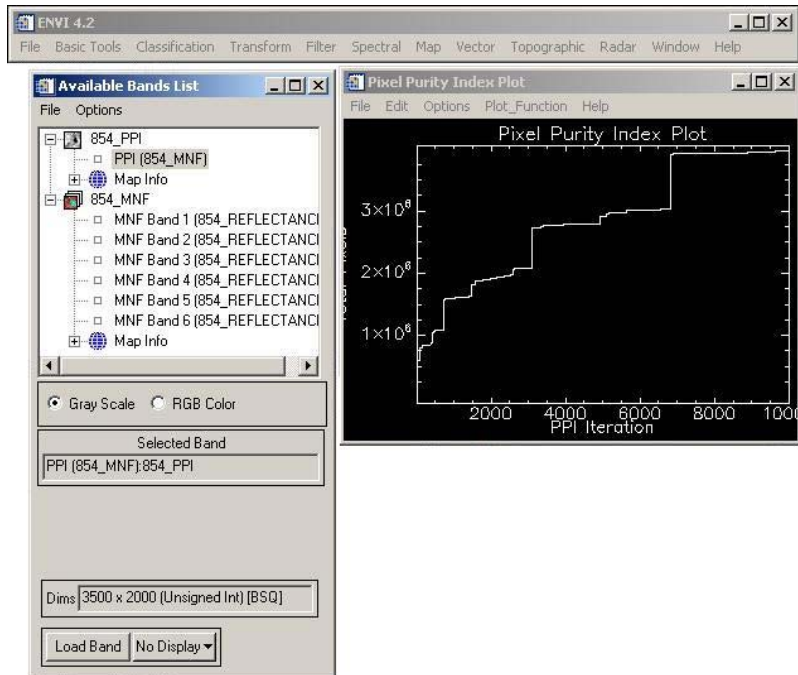


Figura 6-46

• Visualizador N Dimensional

El visualizador N dimensional es una herramienta que permite obtener los píxeles puros de la imagen, a través de la distribución del espectro de valores extremos (endmember). Para el uso de esta herramienta se debe contar con el PPI de la imagen convertido en un archivo de extensión ROI.

1. *Distribución en rangos de PPI seleccionados y su cantidad de píxeles*

1.1. Se abre el archivo de extensión PPI.

1.2. En barra de menú de la imagen, se selecciona la opción **Overlay** y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Density Slice** (Figura 6-47).

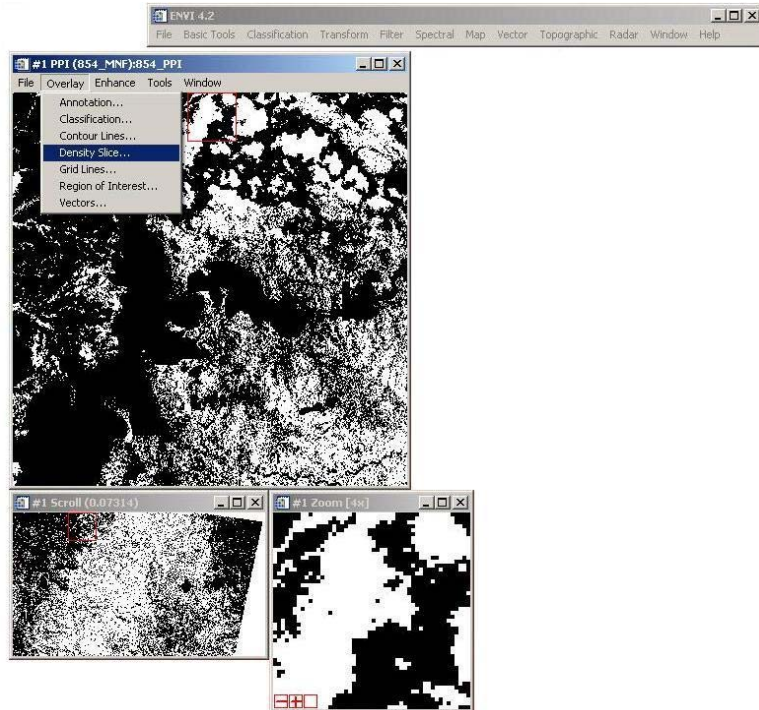


Figura 6-47

1.3. Luego en la ventana de título **Density Slice Band Choice** se selecciona la banda correspondiente al PPI (Figura 6-48).

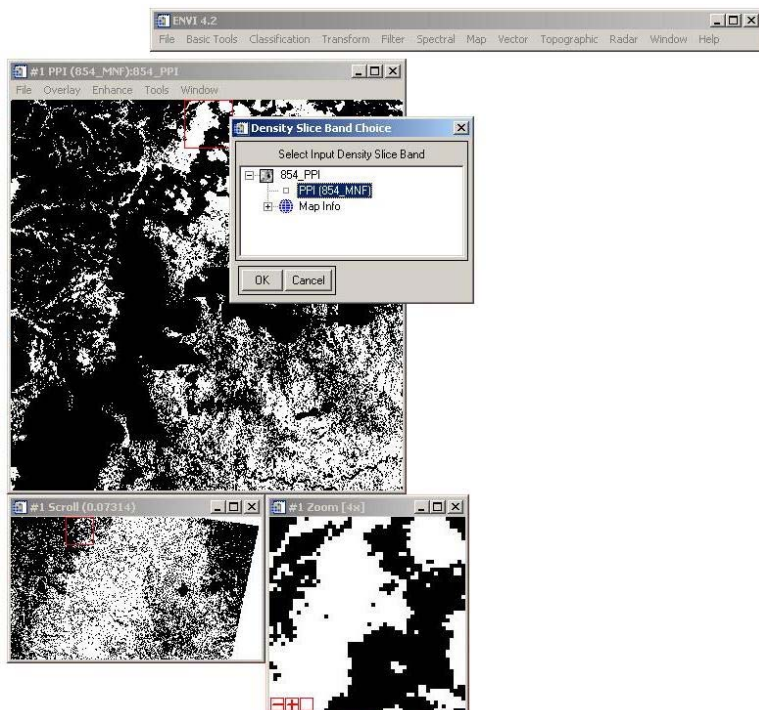


Figura 6-48

1.4. A continuación aparece una ventana de título **#1 Density Slice**, donde se muestra los rangos en cantidad de píxeles para cada banda (Figura 6-49).

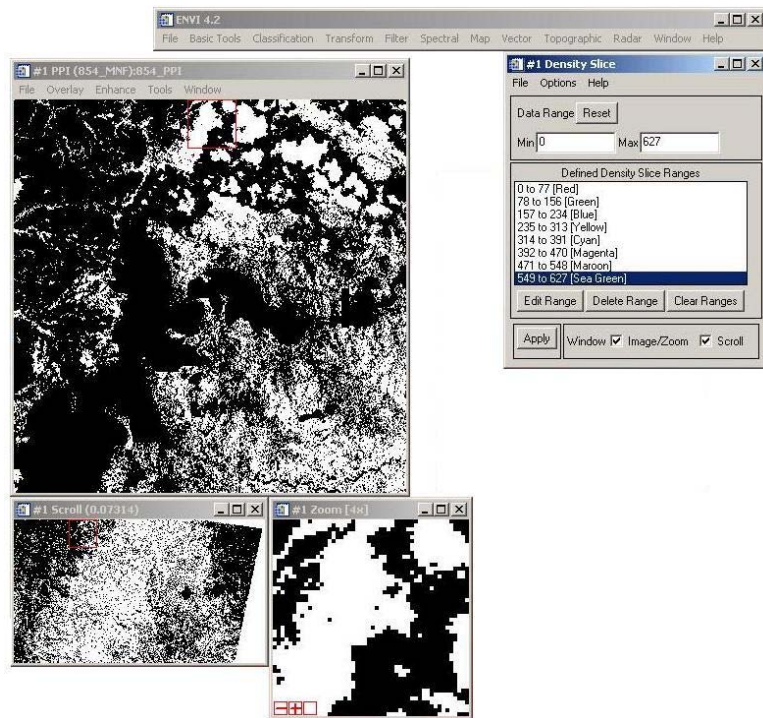


Figura 6-49

Los valores mostrados en esta ventana sirven de guía para la selección de valores mínimos y máximos en el procedimiento siguiente.

2. Conversión PPI a ROI

- 2.1. En la barra de menú de la imagen PPI, se selecciona la opción **Tools**, y del menú desplegable se selecciona la opción **Region Of Interest** y luego la opción **Band Threshold To ROI** (Figura 6-50).
- 2.2. Aparece una ventana de título **Band Threshold To ROI Input Band**, en donde se selecciona el archivo PPI y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-51).

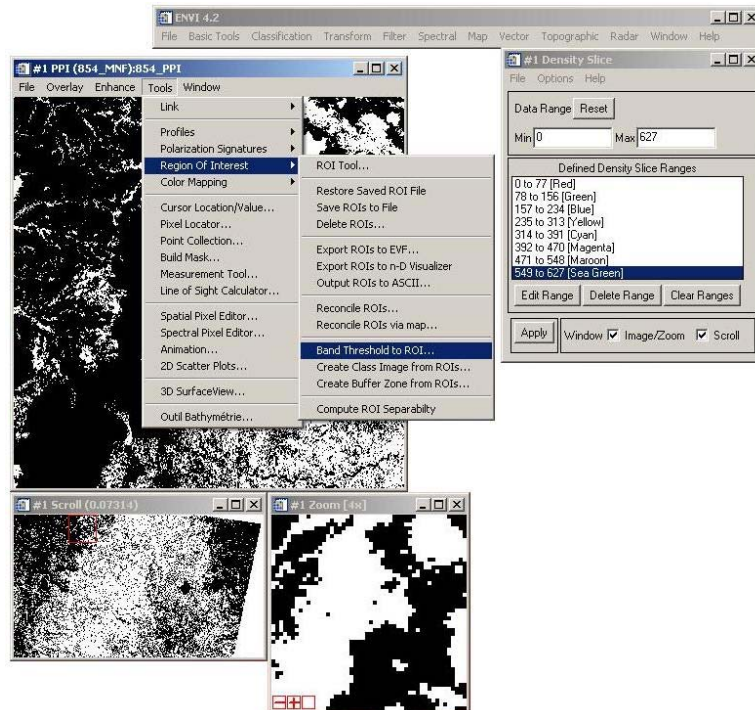


Figura 6-50

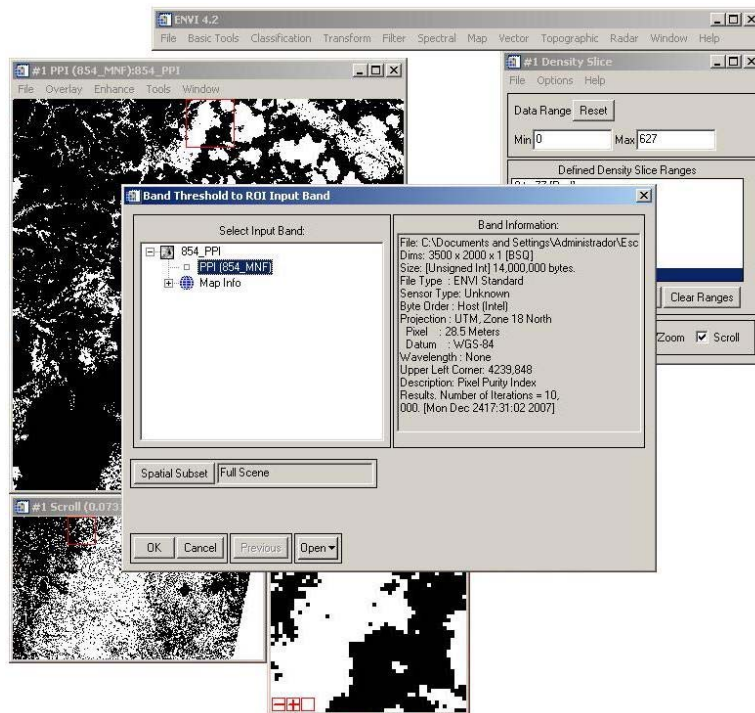


Figura 6-51

2.3. Se muestra la ventana de título **Band Threshold To ROI Parameters**, donde se ingresa los valores (mínimo y máximo) obtenidos de la operación de distribución de rango de los PPI. Seguidamente se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-52).

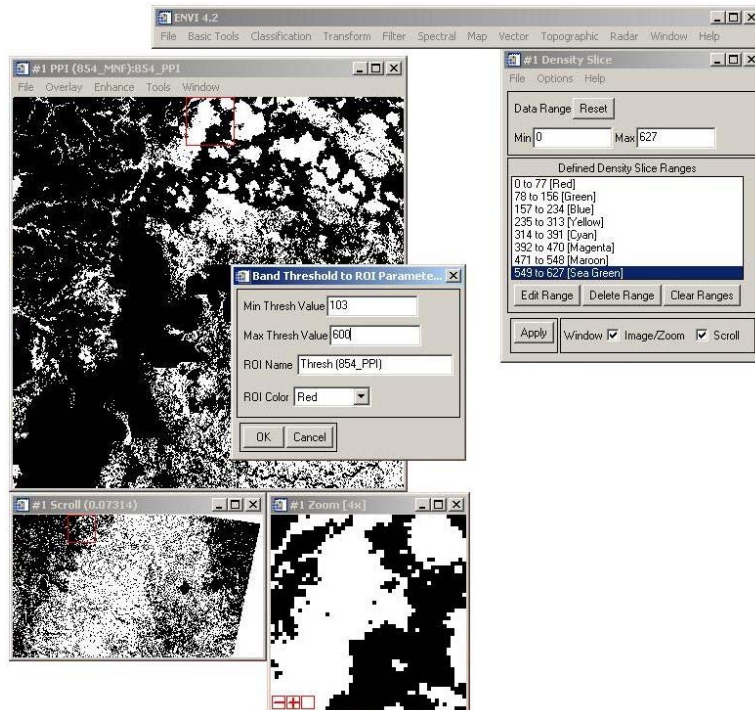


Figura 6-52

2.4. Durante el proceso se muestra una ventana de aviso que indica la cantidad de puntos encontrados. La cantidad de puntos debe estar alrededor de 10000, y se pulsa el botón de acción **Si**. En caso contrario se pulsa el botón de acción **No** y se escogen otros valores (mínimo y máximo) que se encuentren dentro de la distribución de rango de PPI (Figura 6-53).

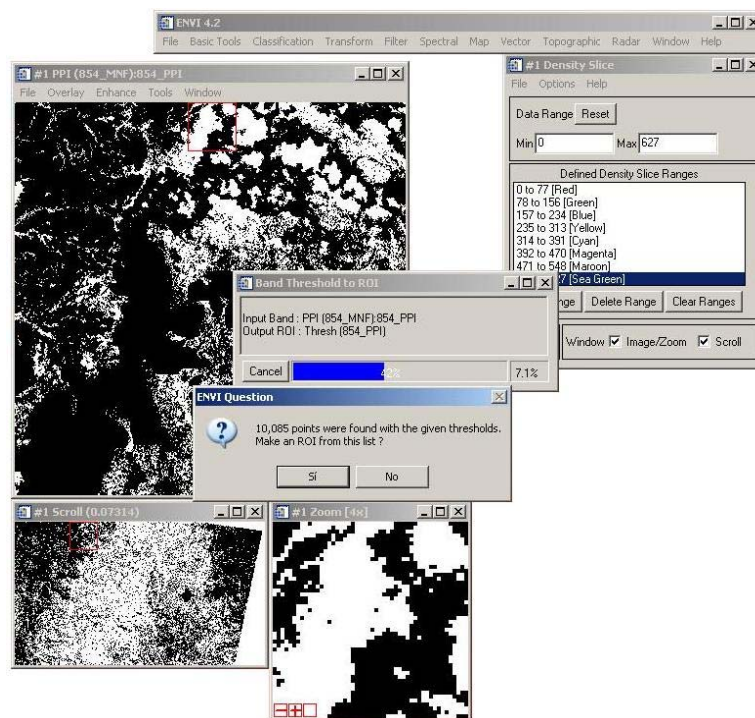


Figura 6-53

2.5. Seguidamente aparece una ventana de título #1 ROI Tool, donde se selecciona el archivo generado y se pulsa la opción **File** del menú y se selecciona **Save ROIs** (Figura 6-54). Luego se escoge el nombre y la ruta del archivo a generar (Figura 6-55).

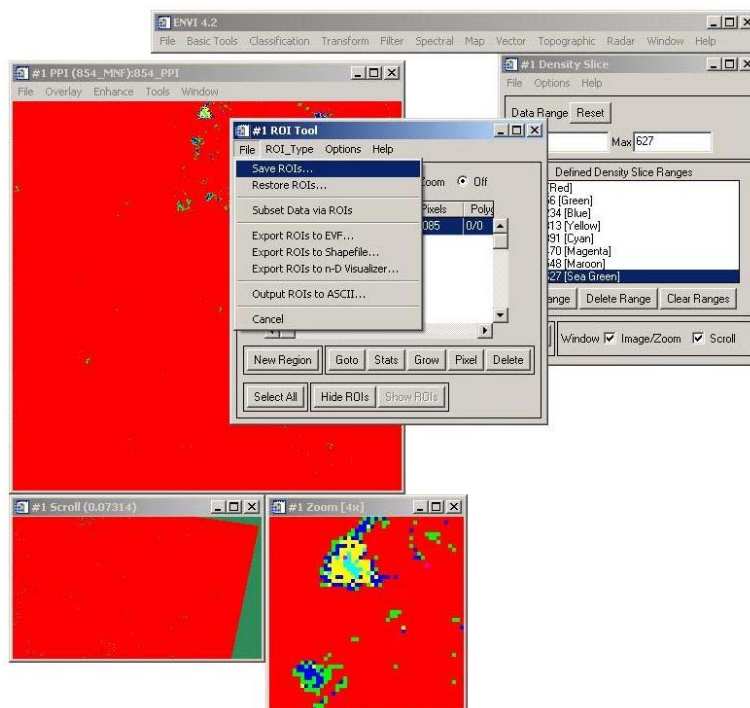


Figura 6-54

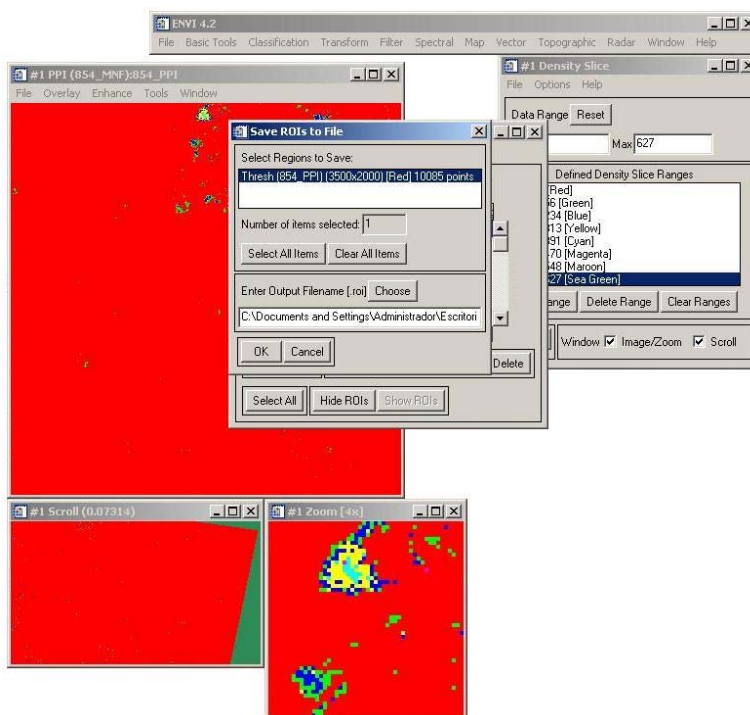


Figura 6-55

3. Visualizador N Dimensional

- 3.1. En la ventana de título **#1 ROI Tool**, se selecciona la opción **File** de la barra de menú, y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Export ROIs to n-D Visualizer** (Figura 6-56).

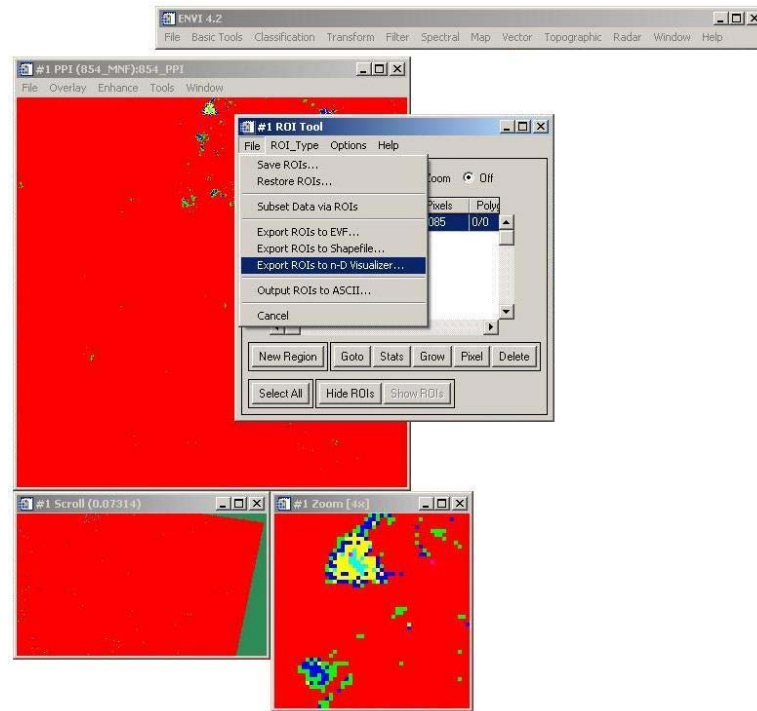


Figura 6-56

- 3.2. Aparece la ventana de título **Select Input Data File** donde se selecciona la imagen MNF y en la opción **Spectral Subset** se seleccionan las tres primeras bandas. Luego se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-57).
- 3.3. Luego se muestra la ventana de título **n-D Visualizer Input ROIs**, donde se selecciona el archivo ROI previamente exportado, y se pulsa el botón de acción **Ok** (Figura 6-58).

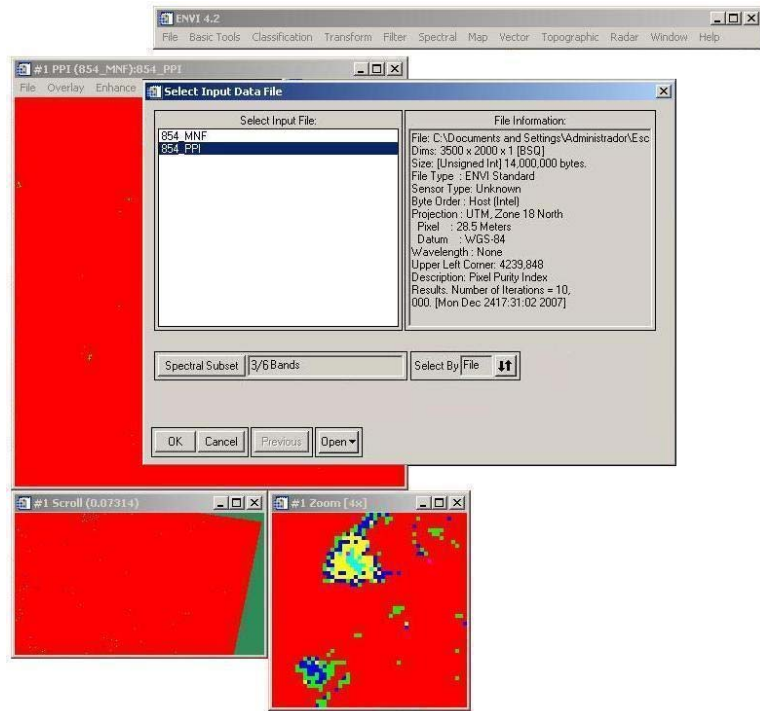


Figura 6-57

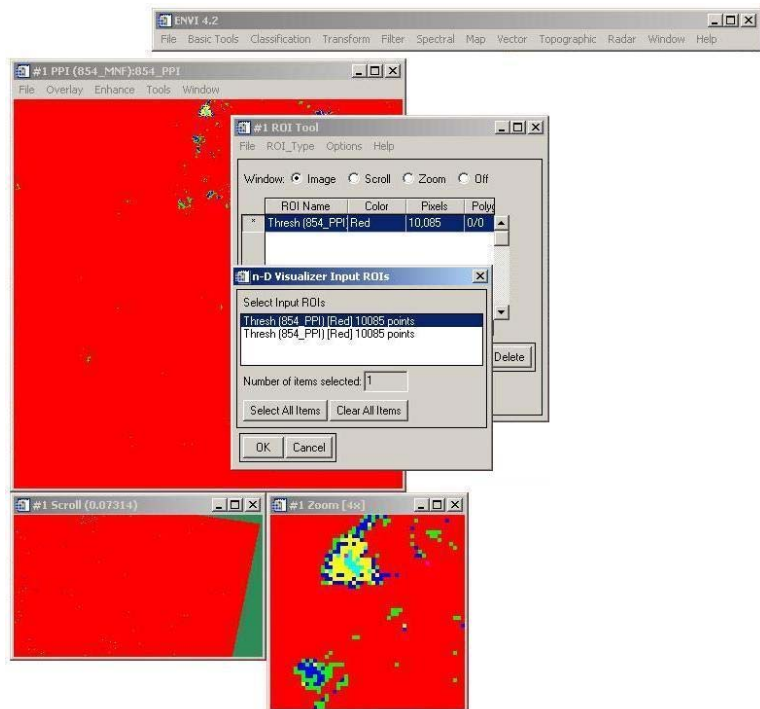


Figura 6-58

3.4. Seguidamente aparecen las ventanas de título **n-D Visualizer** y **n-D Control** (Figura 6-59). Se selecciona las 3 bandas que aparecen en el recuadro **n-D Selected Bands** y se pulsa el botón de acción **Start**.

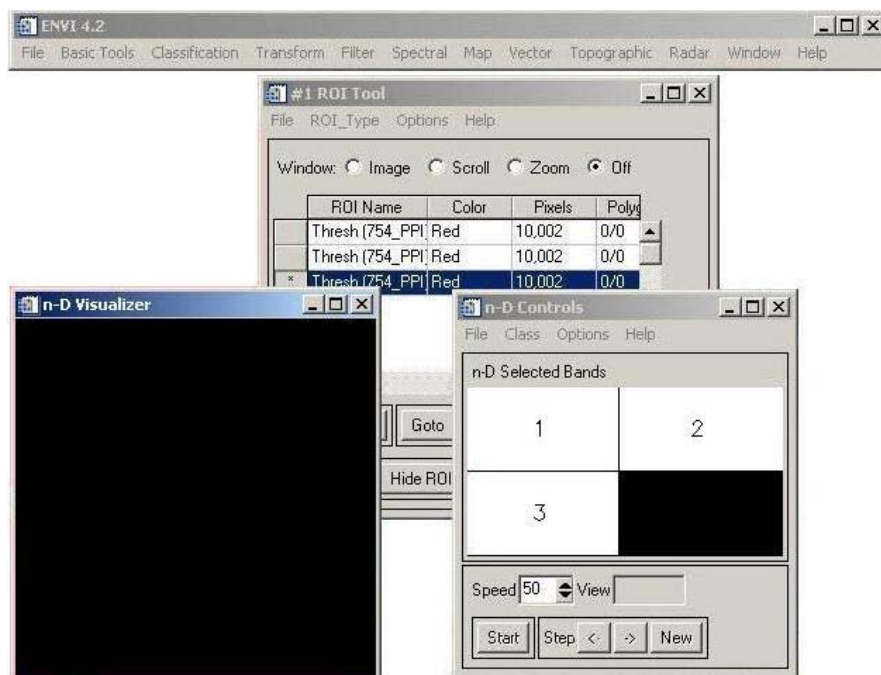


Figura 6-59

3.5. A continuación se muestra en la ventana **n-D Visualizer** la distribución de puntos (Figura 6-60).

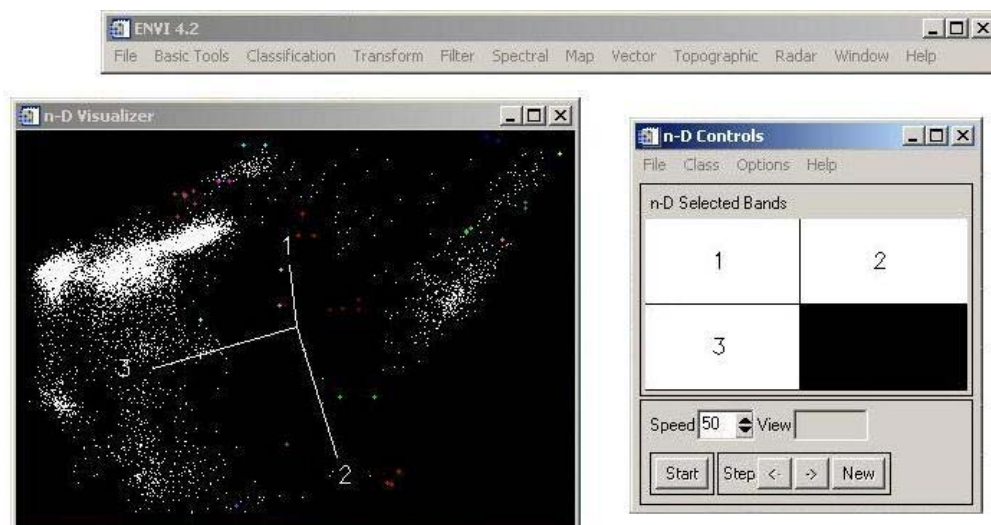


Figura 6-60

3.6. En la barra de menú de la ventana **n-D Control**, se selecciona la opción **Options** y en el menú desplegable se seleccionan las opciones **Show Axes** que muestra los ejes en la figura donde se observa la distribución de puntos, y **3D: Drive Axes** para permitir el movimiento de los ejes. Se selecciona la opción **Clear All** que muestra todos los puntos en color blanco (Figura 6-61).

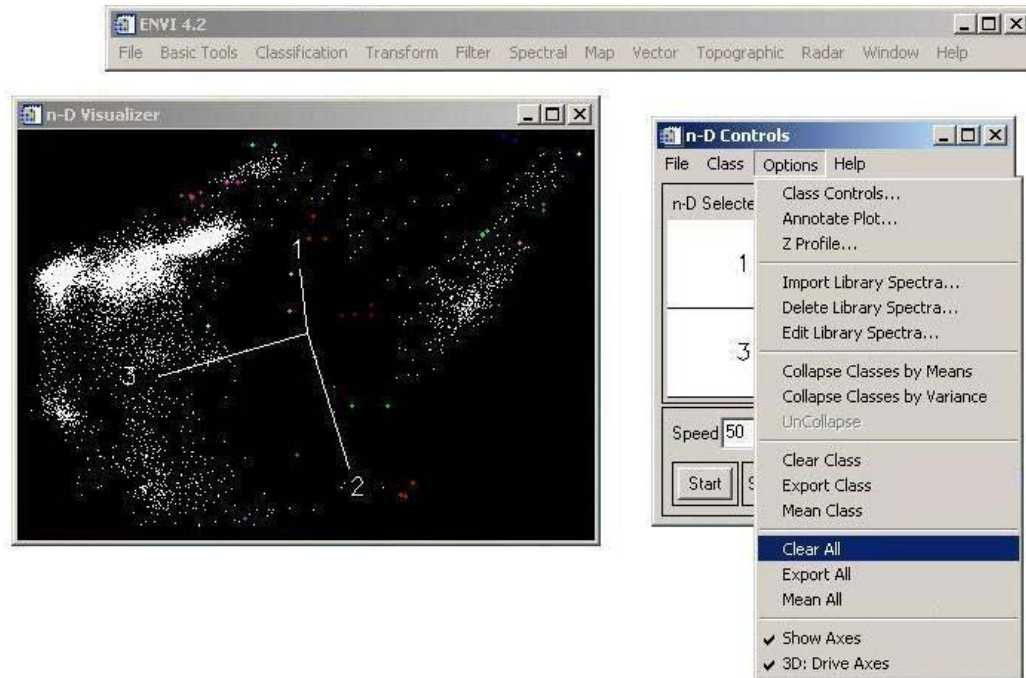


Figura 6-61

A continuación se seleccionan los puntos que se encuentran fuera de las zonas de mayor densidad, y se les asigna un color (cada color representa una clase) diferente a cada punto extremo. Es posible encontrar pequeños grupos de puntos aislados que pueden ser agrupados en una clase.

El procedimiento para la asignación de clases a los puntos extremos se realiza seleccionando un color de la opción **Class** de la barra de menú de la ventana **n-D Control** y desactivando la opción **3D: Drive Axes** de la misma ventana. Procediendo a encerrar dichos puntos considerados en un polígono del color asignado. El numero de clases y la distribución de puntos depende de la imagen con la que se este trabajando.

3.7. Una vez agrupados los puntos en clases, se selecciona de la barra de menú la opción **Options** y del menú desplegable la opción **Export All** (Figura 6-62).

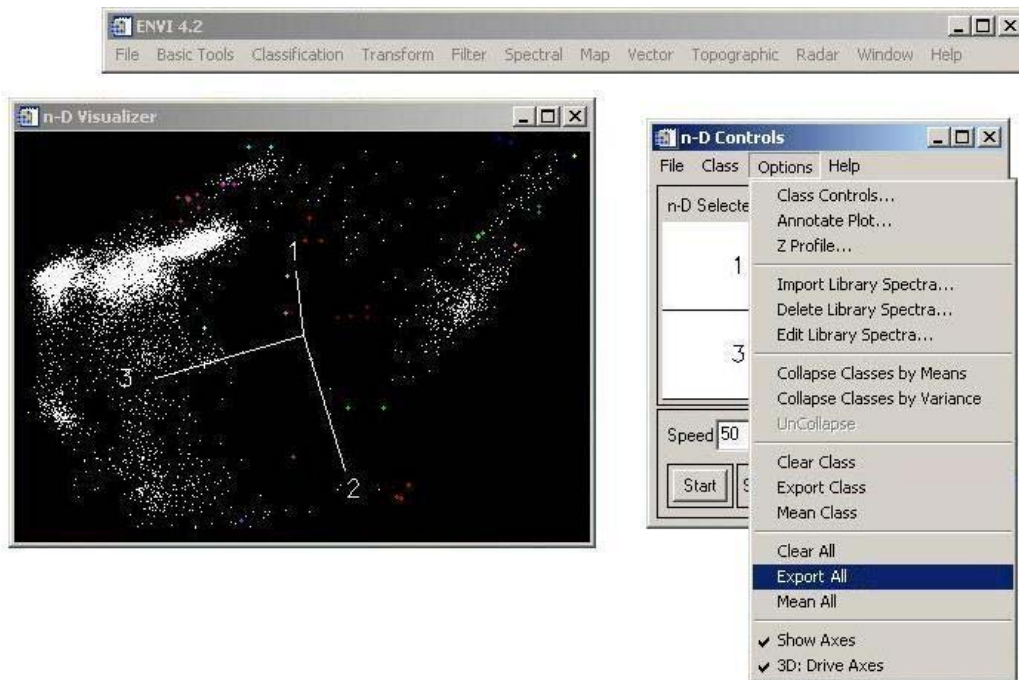


Figura 6-62

- 3.8. A continuación aparecen en la ventana de título **ROI Tool**, todas las clases asignadas. En esta ventana se selecciona el archivo ROI exportado anteriormente y se elimina pulsando el botón de acción **delete**, de manera de mostrar en la ventana únicamente las clases asignadas.
- 3.9. En la barra de menú se selecciona la opción **File** y del menú desplegable la opción **Save ROIs**, aparece una ventana de título **Save ROIs to File** donde se seleccionan todas las clases asignadas, y se elige la ruta y el nombre del archivo generado (Figura 6-63).

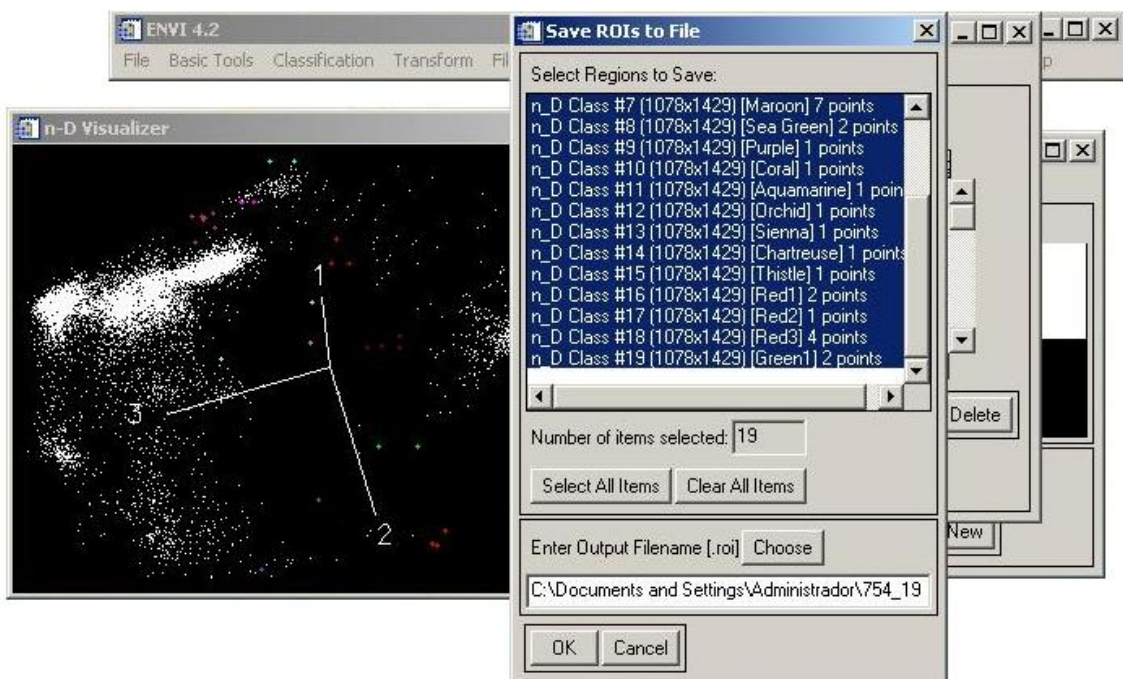


Figura 6-63

4. Spectral Angle Mapper

Esta herramienta determina el ángulo de separación de un píxel, respecto al espectro de referencia. La clase es asignada si ese ángulo es inferior a un valor predefinido, en este caso el valor del ángulo de referencia es de 10 grados. Ángulos pequeños representan mejores correspondencias al espectro de referencia (Figura 6-64).

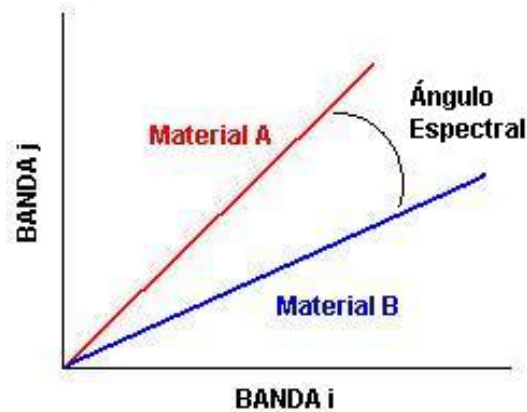


Figura 6-64

4.1 En la barra de menú principal se selecciona la opción **Spectral** y en el menú desplegable se seleccionan las opciones **Mapping Method** y **Spectral Angle Mapper** (Figura 6-65).

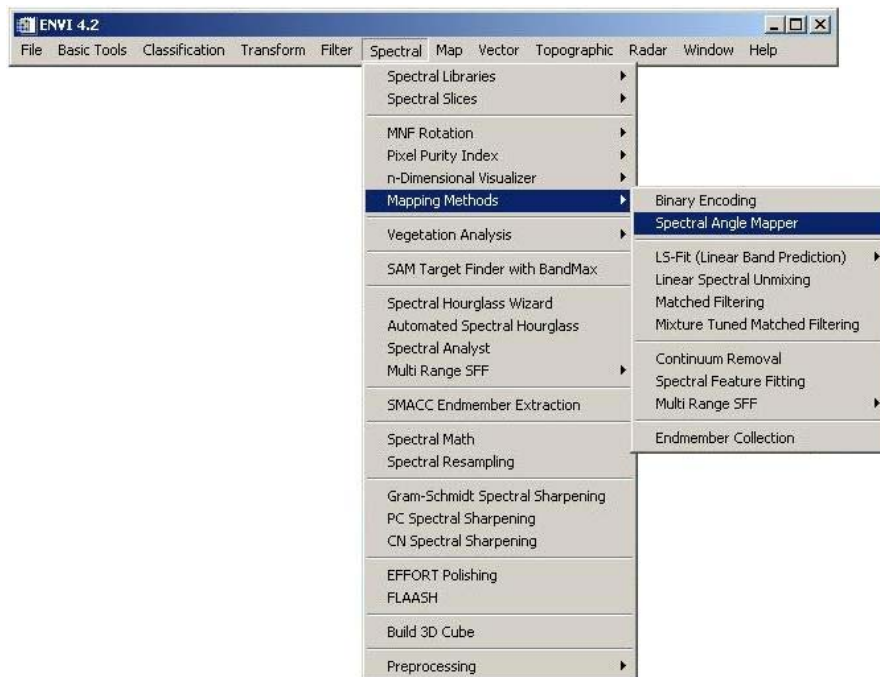


Figura 6-65.

4.2 En la ventana de título **Classification Input File**, se selecciona como archivo de entrada el archivo de salida obtenido de la corrección MNF, y en el botón de acción **Spectral Subset** se seleccionan las tres primeras bandas y se pulsa el botón de acción **OK** (Figura 6-66).

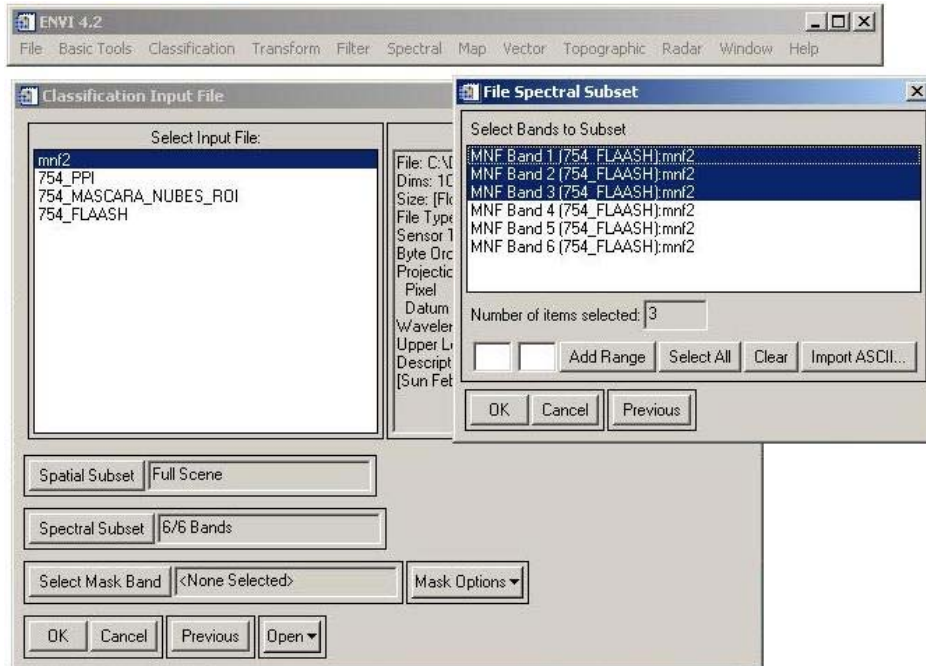


Figura 6-66.

- 4.3 Aparece la ventana de título **Endmember Collection: SAM**, donde en la barra de menú se pulsa la opción **Import** y del menú desplegable se selecciona la opción **from ROI/EVF from Input File** (Figura 6-67).

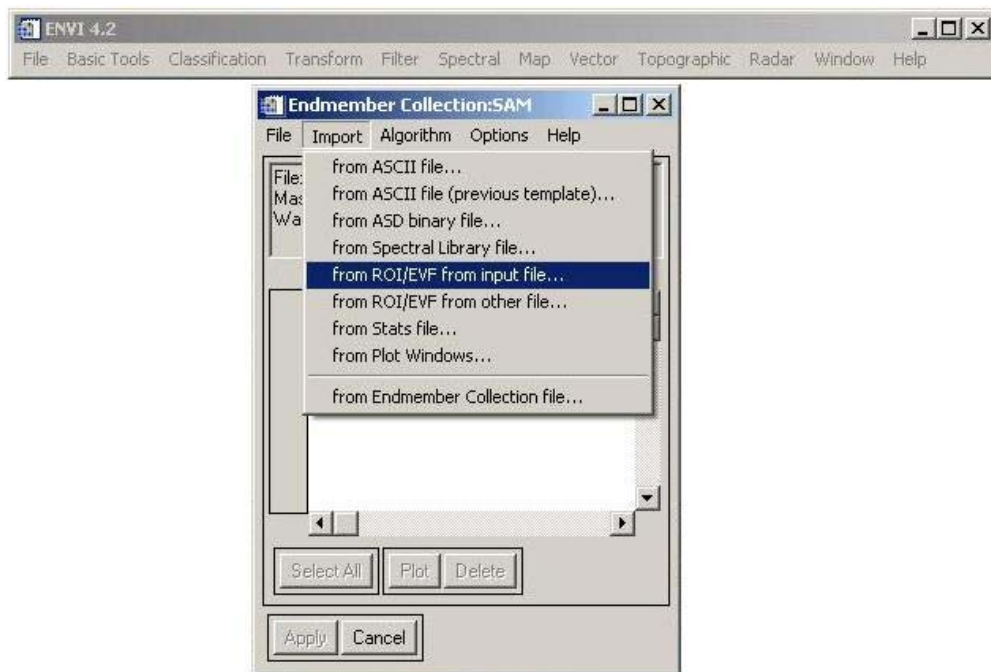


Figura 6-67.

- 4.4 Se muestra la ventana **Select Regions for Stats Calculation** donde se pulsán los botones de acción **Select All Items** y luego el botón **OK** (Figura 6-68).

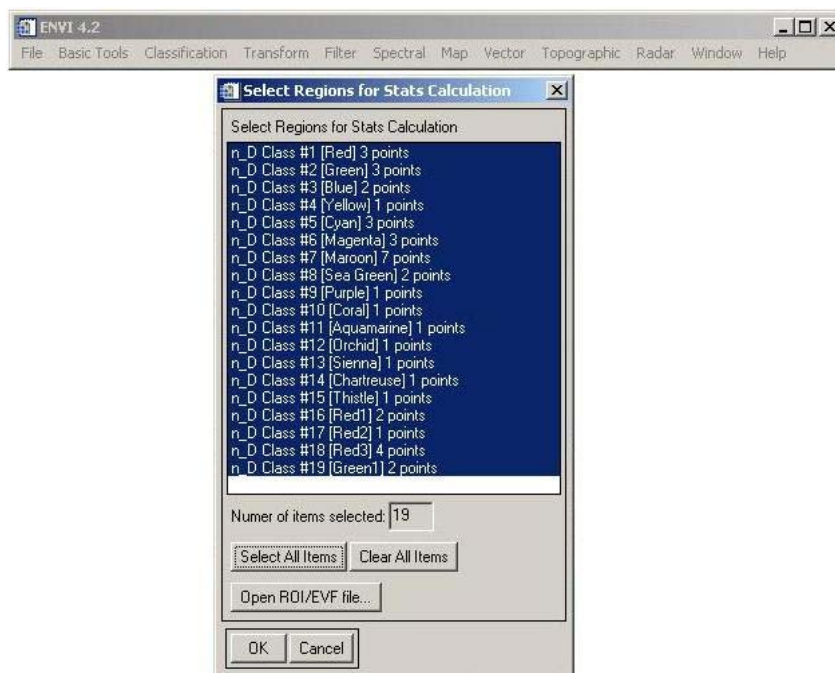


Figura 6-68.

- 4.5 Aparece la ventana **Endmember Collection**, donde se muestran todas las clases. Se selecciona la primera clase y se pulsa el botón de acción **Apply** (Figura 6-69).

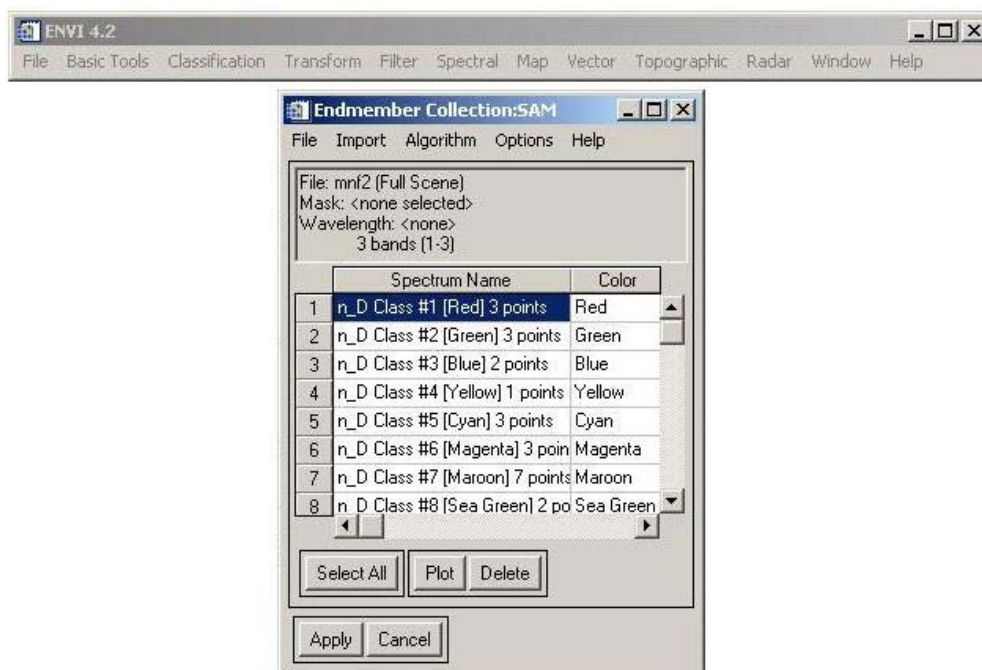


Figura 6-69.

- 4.6 Aparece la ventana de título **Spectral Angle Mapper Parameters**, se verifica el valor del ángulo máximo (radianes) requerido. Se introduce la ruta y el nombre del archivo de salida. Se pulsa el botón de acción **Preview**, en la misma ventana se muestra una vista preliminar de la cantidad de puntos incluidos en ese rango. Es recomendable que el número de puntos en representados sean pocos. Si se cumple con el requisito anterior se

pulsa el botón de acción **OK** (Figura 6-70). Este procedimiento se repite para cada una de las clases.

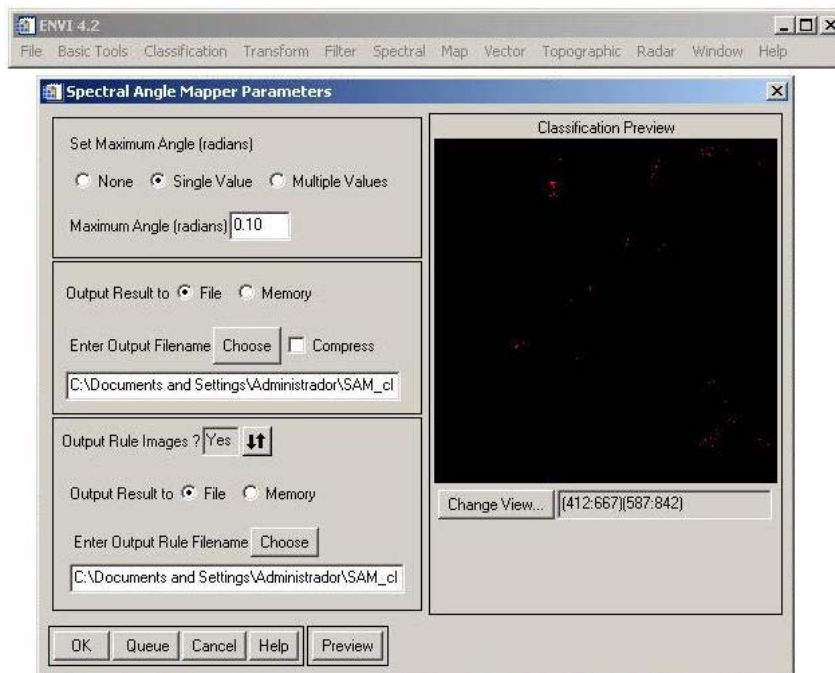


Figura 6-70

• Clasificación No Supervisada

Define las clases espectrales presentes en la imagen, realizando una búsqueda automática de valores homogéneos. La intervención del usuario se centra más en la interpretación de los resultados que en la agrupación de estas clases.

En esta clasificación el algoritmo de procesamiento reconoce automáticamente clases espectrales sin conocimiento previo del área. La separación de estas clases lo realiza el programa usualmente mediante métodos estadísticos o geométricos.

La clasificación no supervisada, se realiza en ERDAS IMAGINE[®] 8.5 y para ello se requiere convertir previamente la imagen con la corrección atmosférica (FLAASH) a formato IMG.

1 Conversión del archivo FLAASH a IMG

1.1 En el programa ENVI[®] 4.2 se abre la imagen con corrección atmosférica FLAASH. En la ventana de título **Available Band List** se seleccionan las tres primeras bandas para los tres cañones y se presiona el botón de acción **Load**. Luego en el menú principal de la ventana de la imagen se pulsa la opción **File** y en menú desplegable se seleccionan las opciones **Save Image As** y luego la opción **Image File** (Figura 6-71).

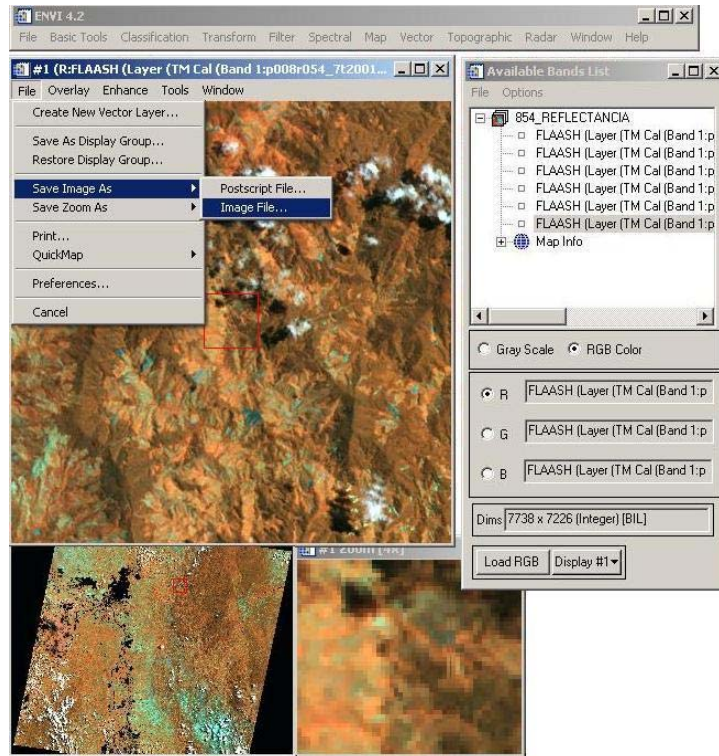


Figura 6-71

1.2 Aparece la ventana de título **Output Display Image File**. En el cuadro de selección de **Output File** se escoge la opción **ERDAS IMAGINE**. Además se escoge la ruta y el nombre del archivo de salida y se pulsa el botón de acción **OK** (Figura 6-72)

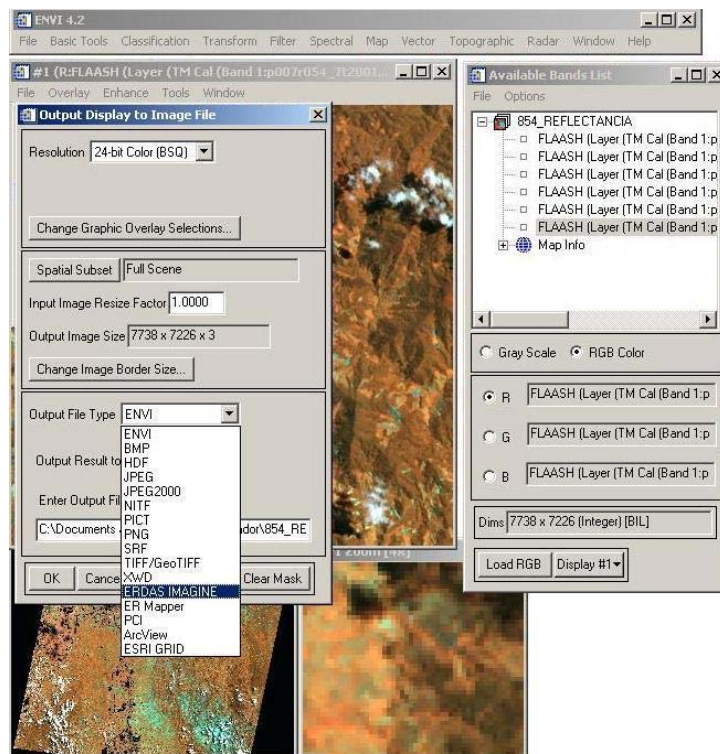


Figura 6-72

1.3 El procedimiento se repite para las tres bandas restantes.

2 Unión de Imágenes

En el ERDAS IMAGINE® 8.5 se realiza la función **Layer Stacking** con las dos imágenes obtenidas en el proceso anterior.

2.1 En la barra de menú principal se pulsa la opción **Interpreter** y en el menú desplegable se seleccionan las opciones **Utilities** y luego **Layer Stacking** (Figura 6-73).

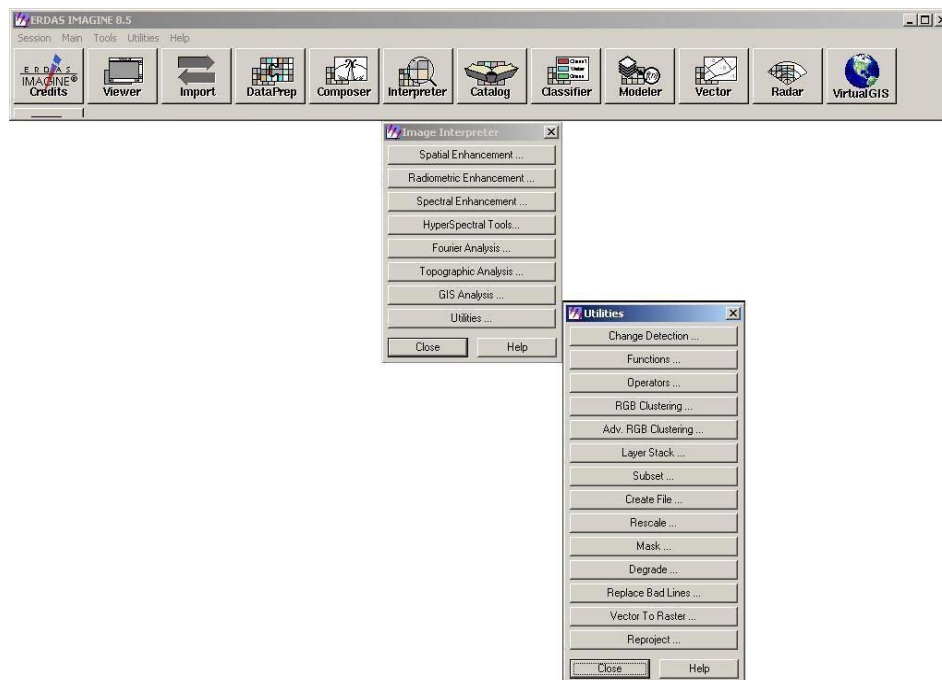


Figura 6-73

2.2 Se muestra la ventana de título **Layer Selection and Stacking**. En la opción **Input File** se selecciona la imagen generada con las tres primeras bandas y en la opción **Layer** se coloca la opción **All**, del cuadro de selección, y se pulsa el botón de acción **Add**. Este procedimiento se realiza nuevamente con la imagen generada con las tres últimas bandas. En la opción **Output File** se escoge la ruta y el nombre del archivo de salida y se pulsa el botón de acción **OK** (Figura 6-74).

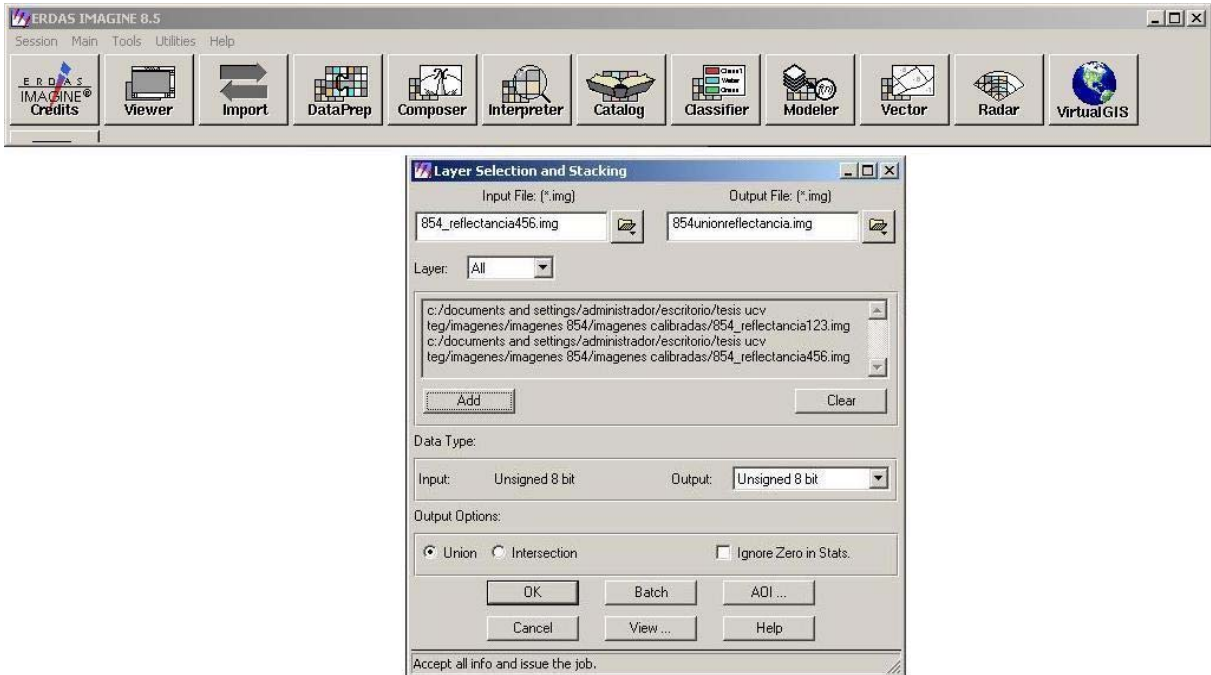


Figura 6-74

3 Clasificación No Supervisada

3.1 En la barra de menú principal se pulsa la opción **Classifier** y en el menú desplegable se seleccionan la opción **Unsupervised Classification** (Figura6-75).

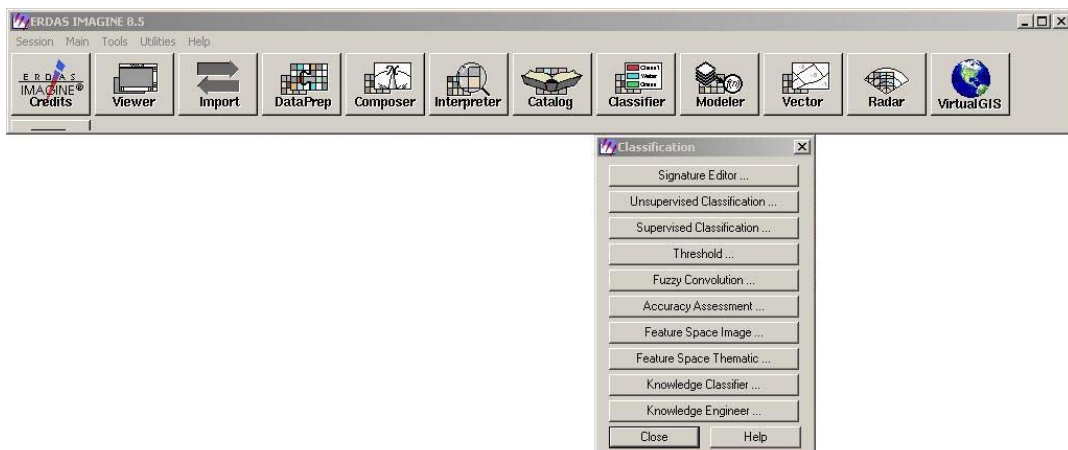


Figura 6-75

3.2 Se muestra la ventana de título **Unsupervised Classification (Isodata)**, y en la opción **Input Raster** se introduce el archivo generado en el procedimiento anterior (Unión de imágenes). En la opción **Output Cluster Layer** se escoge la ruta y el nombre del archivo imagen de salida y en la opción **Output Signature Set** el nombre y ruta de salida del archivo que contiene las clases obtenidas (Figura 6-76).

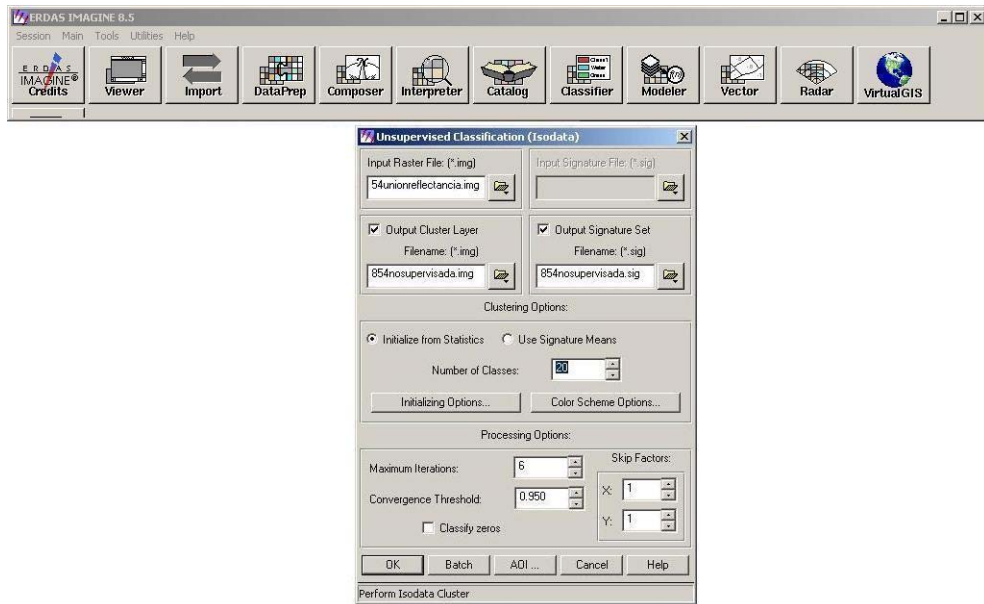


Figura 6-76

3.3 Se pulsa el botón de acción **OK**, comenzando el análisis estadístico representando su avance en una barra de progreso (Figura 6-77).



Figura 6-77

3.4 Una vez finalizado el proceso, en la ventana de título **Viewer #1** se abre el archivo generado anteriormente (Figura 6-78).

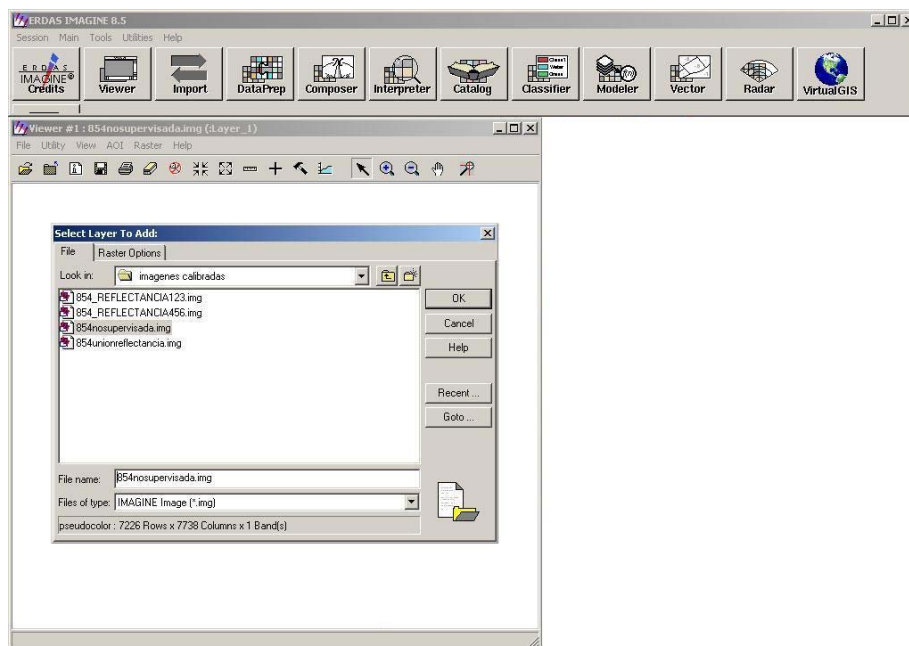


Figura 6-78

3.5 Sobre la ventana de título **Viewer #1** se pulsa el botón derecho del Mouse y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Fit Image to Window** (Figura 6-79)

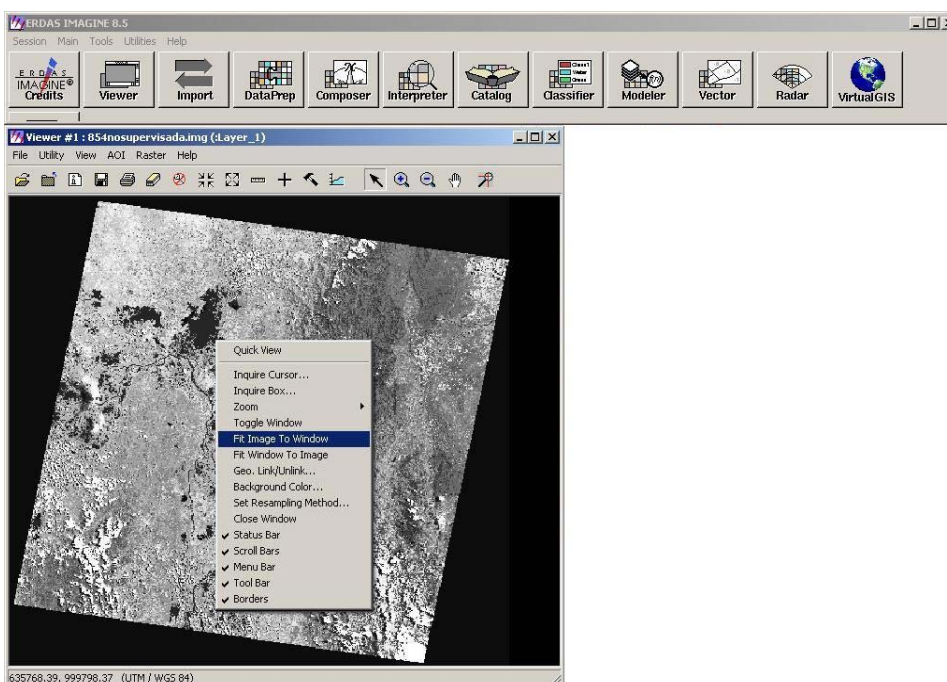


Figura 6-79

3.6 En el menú de la ventana de título **Viewer #1** se pulsa la opción **Raster** y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Attributes** (Figura 6-80)

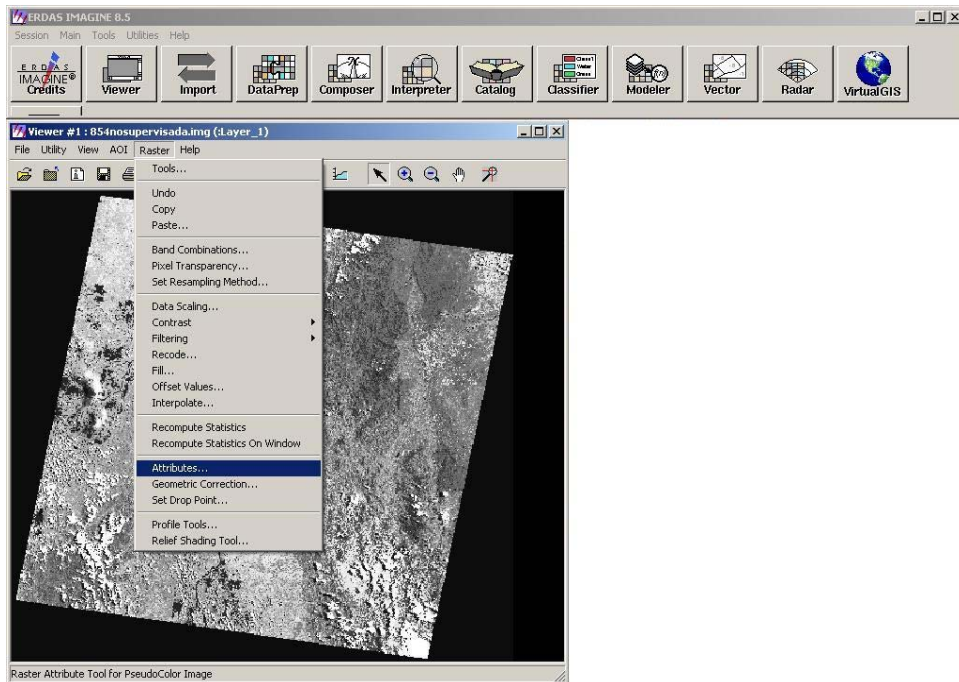


Figura 6-80

3.7 Seguidamente aparece una ventana que contiene todas las clases obtenidas donde se procede a realizar la interpretación (Figura 6-81).

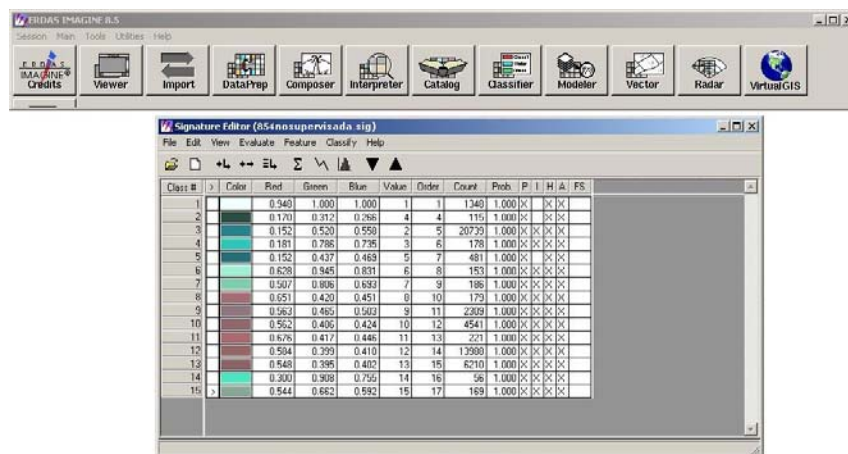


Figura 6-81

• Clasificación Supervisada

Permite también definir las clases espectrales presentes en la imagen, discriminando visualmente por el usuario los diferentes elementos temáticos o elementos de características similares. Esta clasificación se lleva a cabo cuando existen regiones de la imagen en las que el usuario dispone de información que permite la identificación de una clase de interés.

La clasificación supervisada se realiza mediante funciones contenidas en el ERDAS IMAGINE® 8.5

1. Se abre la imagen obtenida en el procedimiento 2 *Unión de Imágenes*.
2. En el menú principal pulsar la opción **Classifier** y en el menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Signature Editor**, donde se creará el archivo que contendrá las clases (Figura 6-82).

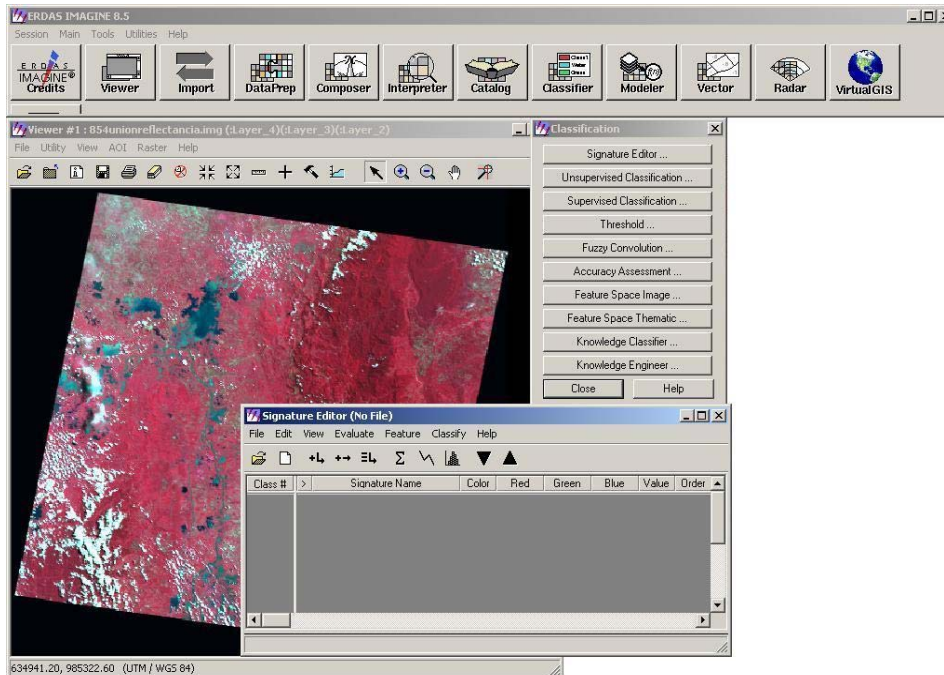


Figura 6-82

3. En el menú de la ventana de título **Viewer #1** se pulsa la opción **Raster** y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Tools**. Aparece una ventana de menú de herramientas de título **Raster**, donde se selecciona el icono que corresponde a formas poligonales (Figura 6-83).

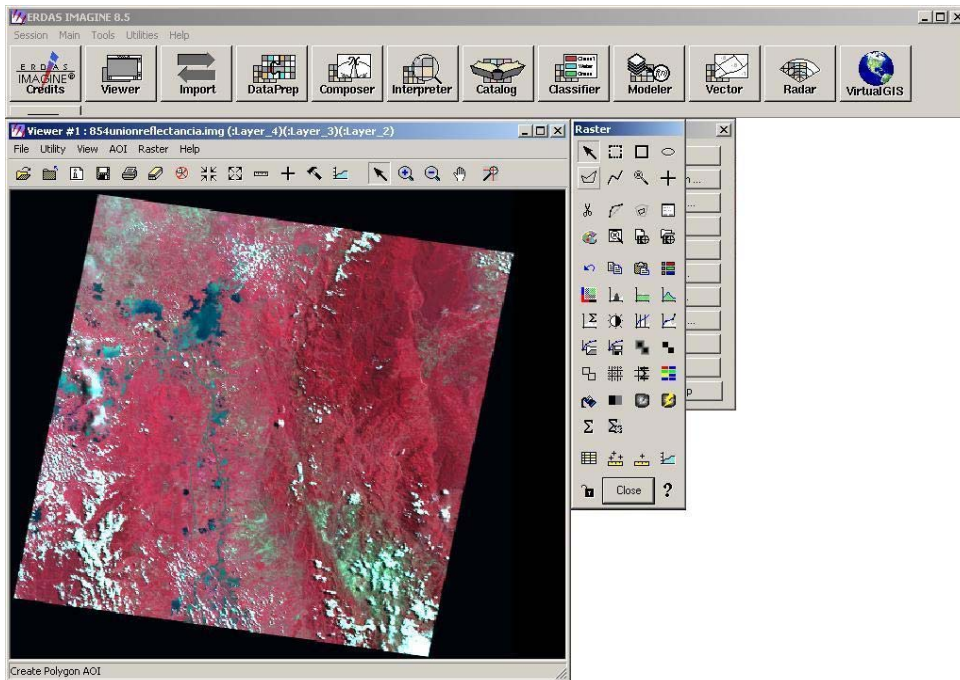


Figura 6-83

4. Seguidamente se procede a encerrar una zona de la que se tenga información, en un polígono (Figura 6-84).

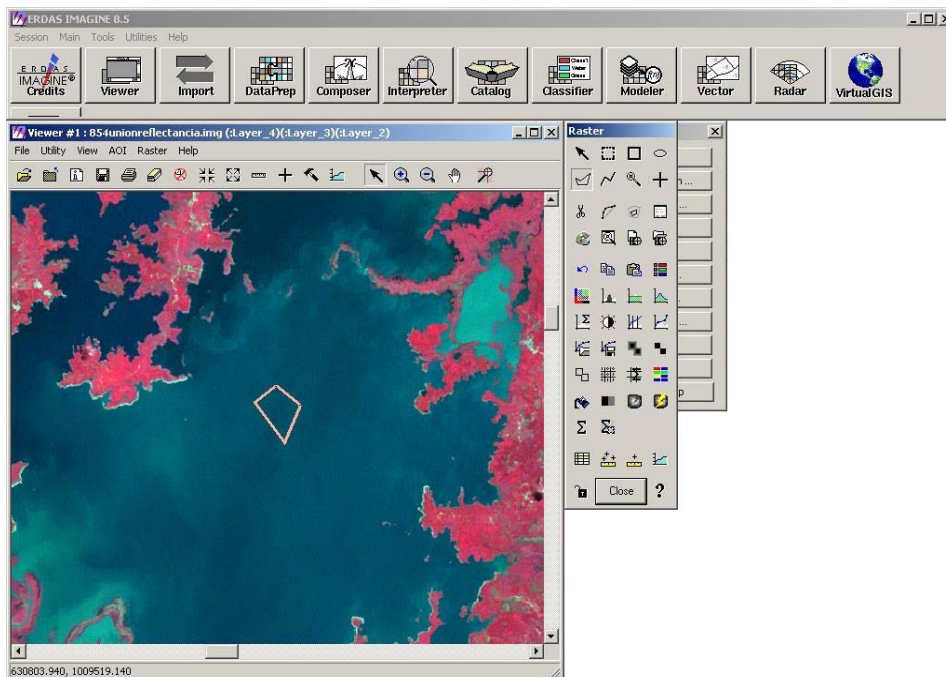



Figura 6-84

5. A continuación se pulsa el icono  de la ventana de título **Signature Editor** y se edita el nombre de la clase generada (Figura 6-85).

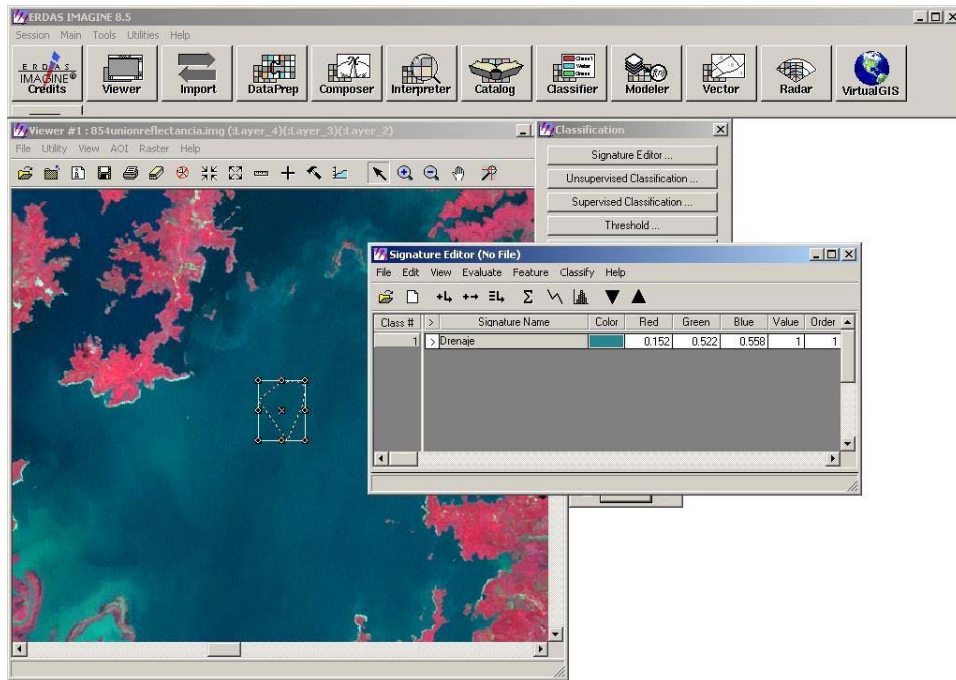


Figura 6-85

6. El procedimiento se repite para cada clase de la que se tenga información (Figura 6-86). Una vez finalizada la designación de clases, se guarda en un archivo que contendrá todas estas clases editadas.

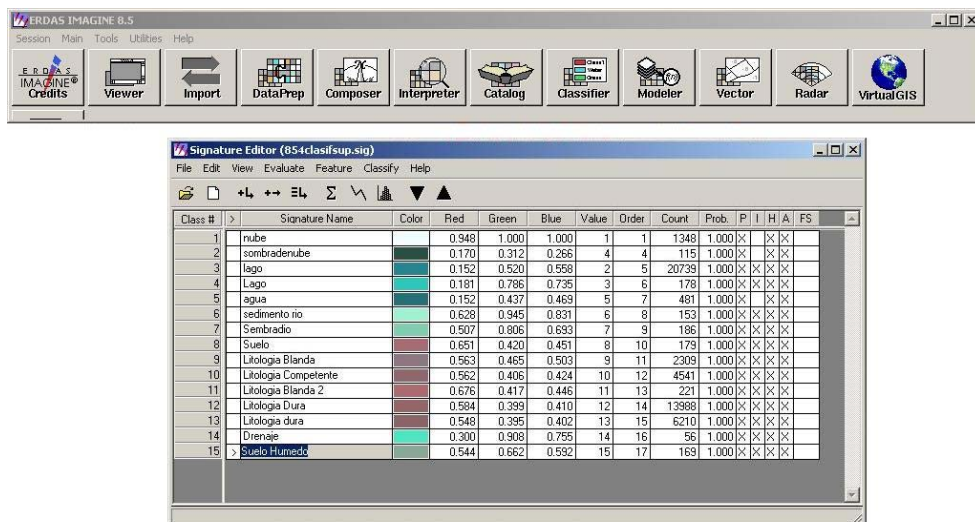


Figura 6-86

7. En la barra de menú principal se pulsa la opción **Classifier** y en el menú desplegable se seleccionan la opción **Supervised Classification**. Aparecerá la ventana de título **Supervised Classification**, donde se introduce el nombre del archivo generado en el procedimiento de *Unión de imágenes* en la opción **Input Raster**. En la opción **Input Signature File** se introduce el archivo generado en el paso anterior (el cual contiene las clases designadas). En la opción **Classified File** se introduce el nombre y ruta de salida del archivo imagen que se generará (Figura 6-87).

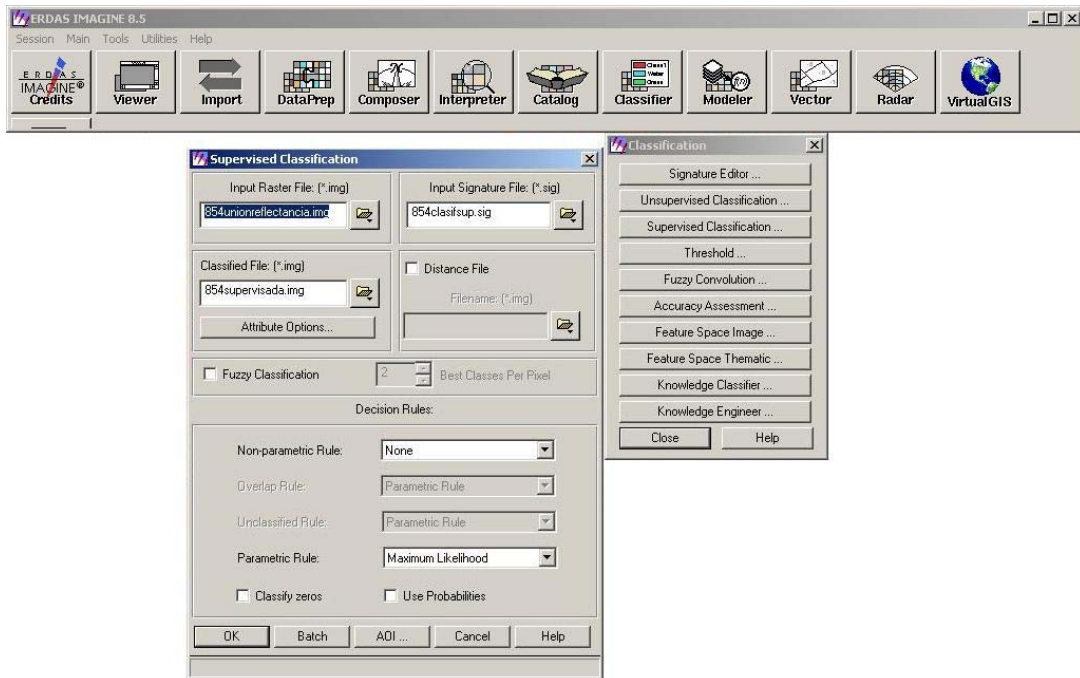


Figura 6-87

8. Luego se pulsa el botón de acción **OK**, comenzando el análisis estadístico representando su avance en una barra de progreso (Figura 6-88).

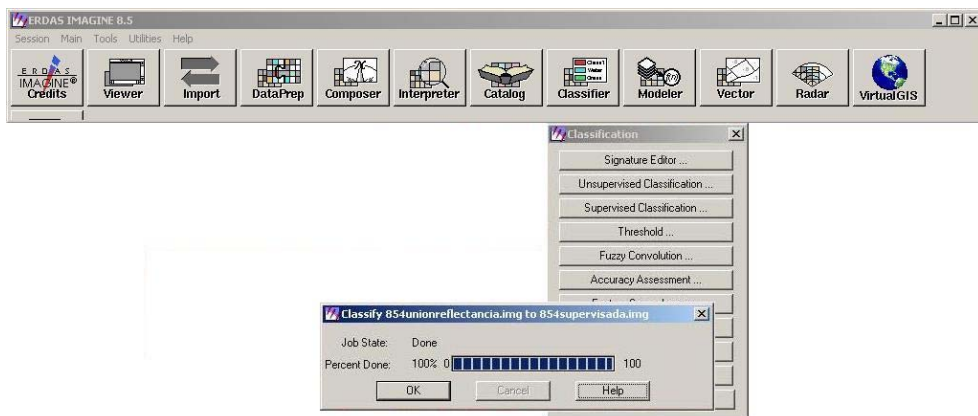


Figura 6-88

6.2 ELABORACIÓN DEL MAPA

Una vez completado el manejo y análisis de los distintos productos obtenidos del procesamiento de imágenes, además de la recopilación y comparación de los mapas geológicos disponibles de la zona de estudio, se procede a la elaboración del mapa.

El mapa se elabora usando el programa ArcGIS® 9.1 específicamente en sus aplicaciones ArcMap y ArcCatalog.

El mapa se realiza mediante la creación de “Shapefiles”, correspondiendo un shapefile por cada categoría (drenaje, estructuras, litología, toponimia, etc.), de manera de facilitar el manejo de información. La creación de un shapefile se encuentra detallada en el paso 3 (*Creación del Archivo Shapefile en ArcGIS® 9.1*), del procedimiento **Corrección de Fracción Mínima de Ruido (MNF)**.

En este trabajo se crean los siguientes “Shapefiles”:

- *Shapefile de Drenaje* (Figura 6-89)
- *Shapefile de Limite Internacional* (Figura 6-89)
- *Shapefile de Estructuras (Pliegues, Fallas, Corrimientos, etc.)* (Figura 6-90)
- *Shapefile de Formaciones presentes* (Figura 6-91)

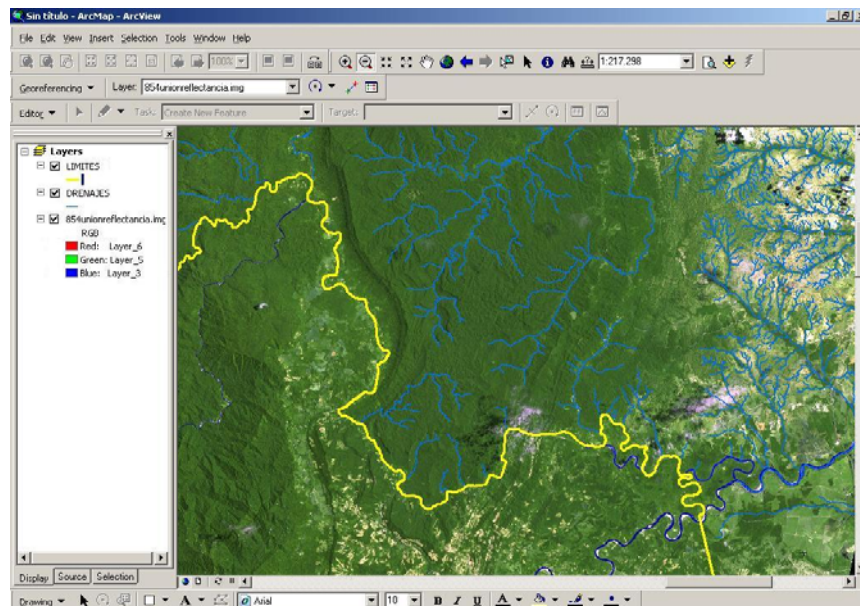


Figura 6-89

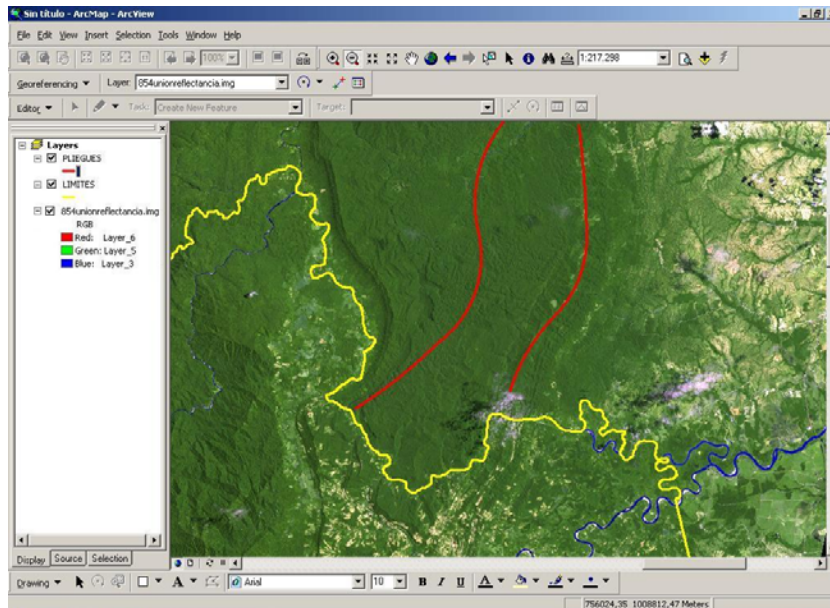


Figura 6-90

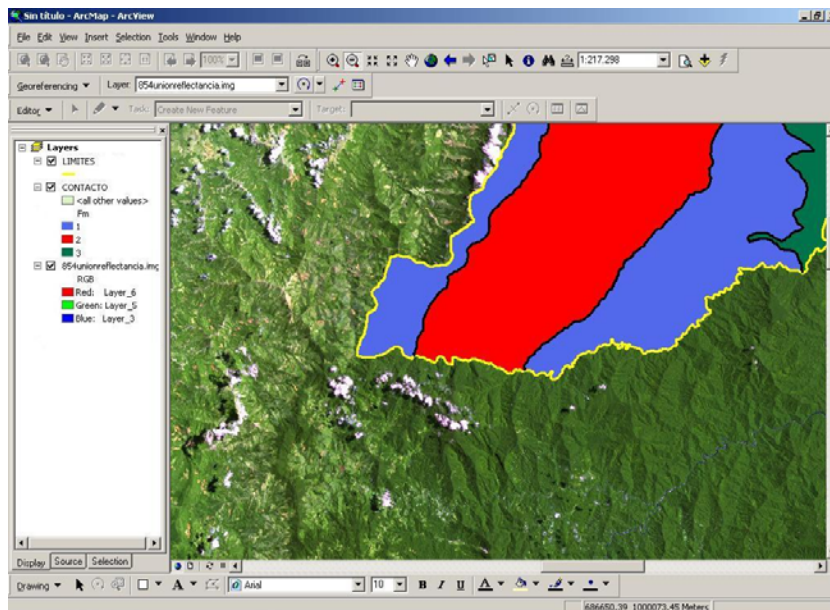


Figura 6-91

CAPITULO VII

7. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

- **Producto MNF**

El producto MNF utilizando la combinación de bandas RGB135 (Cañón rojo: Banda 1, Cañón verde: Banda 3, Cañón azul: Banda 5), muestra diferencias de tono entre la litología que aflora en la zona destacada en tonos violeta oscuro correspondiente a rocas de edad Paleoceno-Mioceno, y material de tipo aluvial mostrado en tonos rojizos y violeta claro (Figura 7-1).

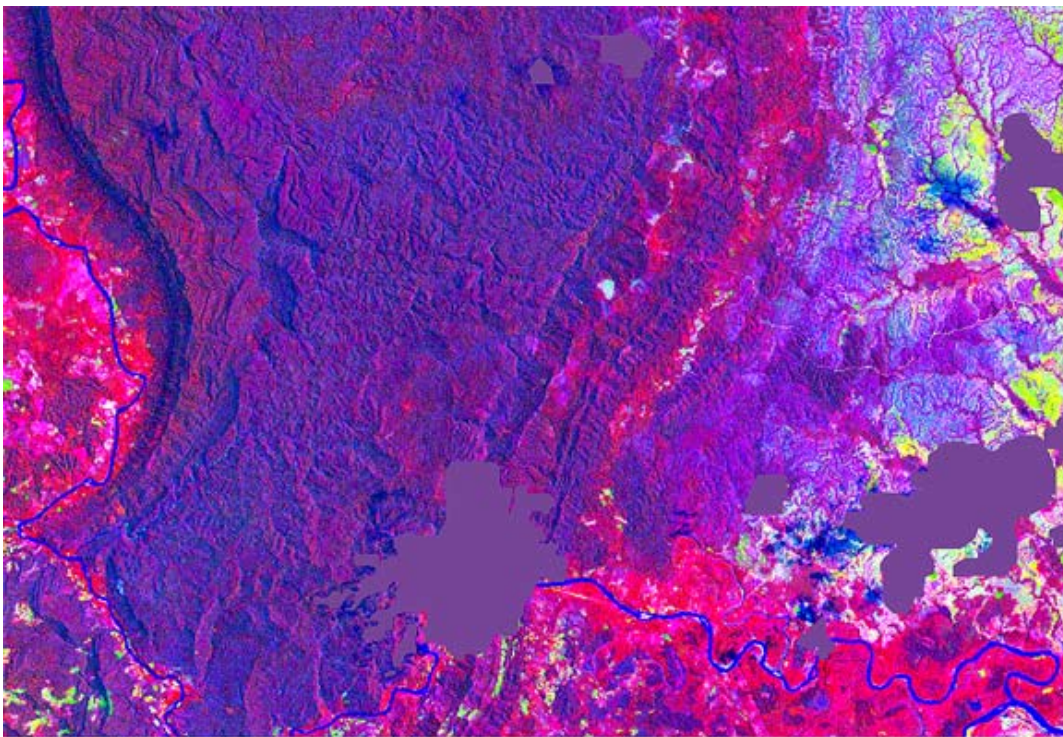


Figura 7-1 Parte de la imagen resultado de la corrección MNF

- **Producto PPI**

El producto PPI muestra una distribución de píxeles que presenta una mayor densidad hacia la zona correspondiente al material de tipo aluvial y una menor densidad de píxeles hacia la zona de litología más competente de rocas de edad Paleoceno-Mioceno (Figura 7-2).

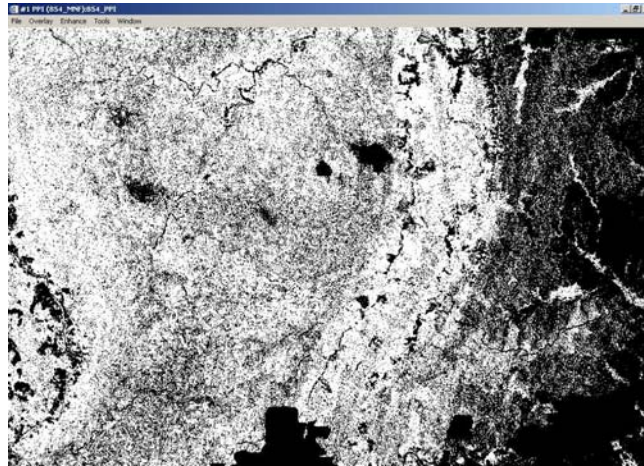


Figura 7-2 Parte de la imagen resultado de la corrección PPI

- **Clasificación No Supervisada y Supervisada**

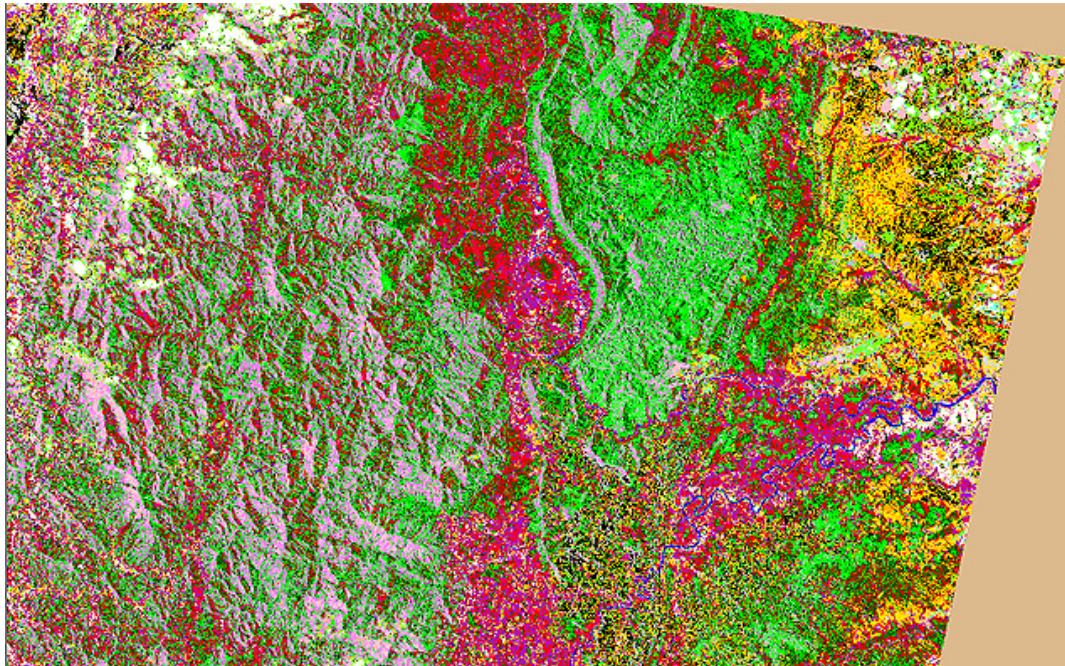
La clasificación No Supervisada muestra como resultado una agrupación de píxeles de características similares en un tono de color específico. La agrupación de píxeles fue realizada para un número de 20 clases diferentes asignadas. Visualmente se aprecia una distribución espacial y geométrica de tonos de color agrupados por dureza de la litología presente, agrupando datos con contenido temático similar.

Del resultado obtenido se realizó una edición de color para cada clase. Se asignaron tonos de verde para litologías resistente, tonos rojos y violetas para litología de resistencia intermedia y tonos amarillos para litología menos resistente. Las sombras se muestran en color rosado y negro (Figura 7-3).

En la clasificación Supervisada, cada clase fue asignada mediante elementos de la imagen de los que se poseía información. En este proceso se definieron 20 clases, de manera de ser consistentes en el número de clases de la clasificación No Supervisada. Como resultado se obtiene una distribución espacial y geométrica de tonos agrupados similar a la clasificación No Supervisada

Se asignaron tonos de verde para litología resistente, tonos rojos y rosado para litología de menor resistencia (blanda, suelos y zonas cultivadas) y tonos amarillos para zonas húmedas. Las sombras se muestran en color negro (Figura 7-4).

Comparando las clasificaciones realizadas con la imagen, se establecieron diferencias en cuanto a la resistencia de la litología presente.



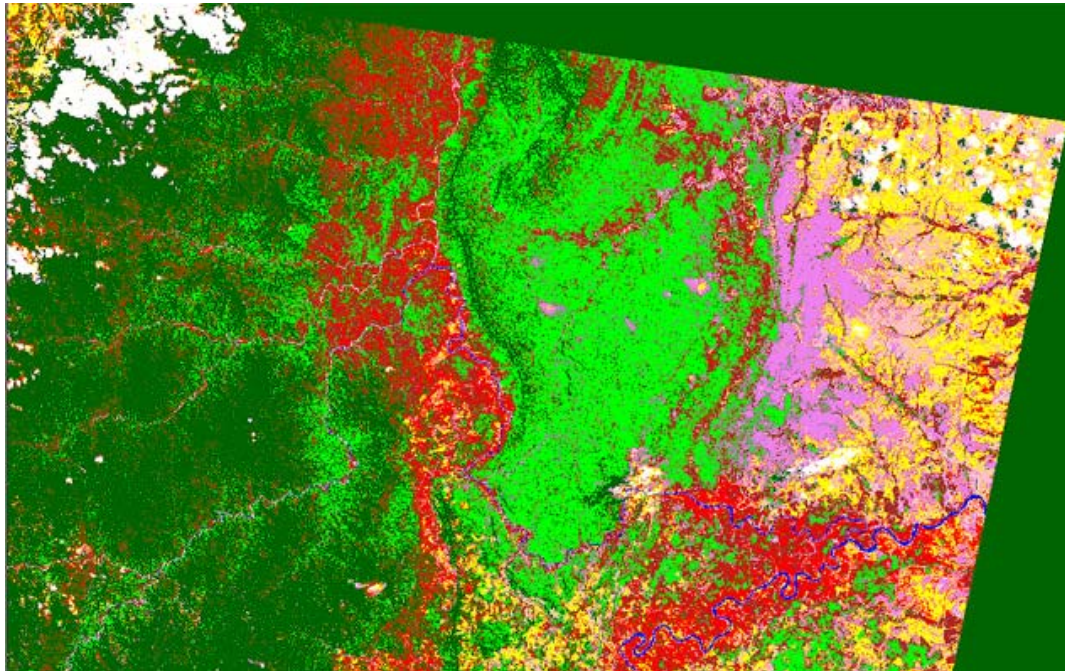
Raster Attribute Editor - 854nosupervisada.img(Layer_1)

File Edit Help

Layer Number: 1

Row	Color	Red	Green	Blue	Opacity	
0		0	0	0	0	Unclassified
1		0.823529	0.701961	0.54902	1	Sombra
2		1	0.713725	0.756863	1	Sombra
3		0	0	1	1	Drenaje
4		1	0.752941	0.796078	1	Sombra
5		0.933333	0.509804	0.933333	1	Sombra
6		0.827451	0.827451	0.827451	1	Class 6
7		0.752941	0.752941	0.752941	1	Class 7
8		0	1	0	1	Litologia Competente
9		0	0.392157	0	1	Litologia Competente
10		1	0	0	1	Litologia Blanda
11		1	0.843137	0	1	Sedimentos
12		0.627451	0.12549	0.941176	1	Litologia Blanda
13		0.690196	0.188235	0.376471	1	Litologia Blanda
14		0.960784	0.960784	0.862745	1	Class 14
15		1	1	0.878431	1	Class 15
16		0.498039	1	0.827451	1	Class 16
17		1	0.647059	0	1	Litologia Muy Blanda
18		0	0	0	1	Class 18
19		0.498039	1	0	1	Class 19
20		1	1	1	1	Class 20

Figura 7-3. Figura que muestra en colores las clasificaciones representadas en parte de la imagen y debajo la lista con la interpretación realizada a cada clase.



Raster Attribute Editor - 854supervisada.img(Layer_1)

File Edit Help

Layer Number: 1

Row	Color	Red	Green	Blue	Opacity	
0		0	0	0	0	Unclassified
1		0	0	1	1	lago
2		1	1	1	1	NUBE
3		0	0	1	1	Lago
4		0.168627	0.309804	0.262745	1	sombradenube
5		0	0	1	1	agua
6		1	1	0	1	Suelo humedo
7		1	0.752941	0.796078	1	Sembradio
8		0.647059	0.164706	0.164706	1	Suelo
9		0.933333	0.509804	0.933333	1	Litologia Blanda
10		0	1	0	1	Litologia Competente
11		1	0	0	1	Litologia Blanda 2
12		0	0.392157	0	1	Litologia Dura
13		0	0.392157	0	1	Litologia dura
14		0	0	1	1	Drenaje
15		1	1	0	1	Suelo Humedo
16		0	0	1	1	drenaje

Figura 7-4. Figura que muestra en colores las clasificaciones representadas en parte de la imagen y debajo la lista con la descripción asignada a cada clase de la que se disponía de información.

- **Combinación de Bandas**

De las combinaciones entre cañones RGB (Rojo, Verde, Azul) y las distintas bandas de la imagen (1, 2, 3, 4, 5, 7) se seleccionaron para trabajar aquellas que proporcionaban mayor información visual de las características geológicas y físicas de la imagen.

Combinación RGB135

Esta combinación muestra diferencias litológicas y de texturas en tonos de azul. Los drenajes se distinguen claramente en tonalidades verdes (Figura 7-5).

Combinación RGB354

Al igual que la combinación anterior se muestran diferencias litológicas y de texturas en tono de azul, donde esta característica se observa más detallada. Los drenajes muestran tonos rojizos y se observan zonas con contenido de humedad en el suelo en tonos amarillos- verdes (Figura 7-6).

Combinación RGB357

Esta combinación resalta las mismas características de litología y textura que la combinación *RGB354*, ahora mostrado en tonos de verde oscuro y presenta un mayor contraste en las zonas con contenido de humedad en el suelo en color verde claro. Los drenajes se muestran en tonos rojizos (Figura 7-7).

Combinación RGB432

Mediante esta combinación se resalta el drenaje y el vigor de vegetación en tonos rojizos, donde los tonos más oscuros indican mayor vigor. Las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos verde-azulado (Figura 7-8).

Combinación RGB453

Esta combinación muestra el vigor de vegetación en tonos marrones, donde los tonos más oscuros indican mayor vigor. Las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos verde y los drenajes en color azul. Esta combinación resalta visualmente las estructuras geológicas (Figura 7-9).

Combinación RGB534

Mediante esta combinación se resaltan diferencias en litología y textura en tonos violeta. Las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos ocres y los drenajes en color verde. Esta combinación resalta visualmente las estructuras geológicas (Figura 7-10).

Combinación RGB543

Esta combinación muestra diferencias en la vegetación en tonos verdes, además resalta la litología y las estructuras. Las zonas con contenido de humedad se muestran en tonos rosados y los drenajes en color azul (Figura 7-11).

Combinación RGB752

Esta combinación resalta las mismas características de vegetación litología y estructura que la combinación *RGB534*, ahora mostrado en tonos de verde oscuro y presenta un mayor contraste en las zonas con contenido de humedad en el suelo en tonos dorados. Los drenajes se muestran en color azul (Figura 7-12).

Combinación RGB754

Esta combinación resalta las mismas características de vegetación litología y estructura que la combinación *RGB752* y *RGB534*, ahora mostrado en azul claro y presenta las zonas con humedad en el suelo también en tonos dorados. Los drenajes se muestran en color negro (Figura 7-13).

Las combinaciones más empleadas en la elaboración de este trabajo de las antes mencionadas, fueron *RGB432*, *RGB453*, *RGB543*, *RGB752*, *RGB754* por las características que resaltaban.

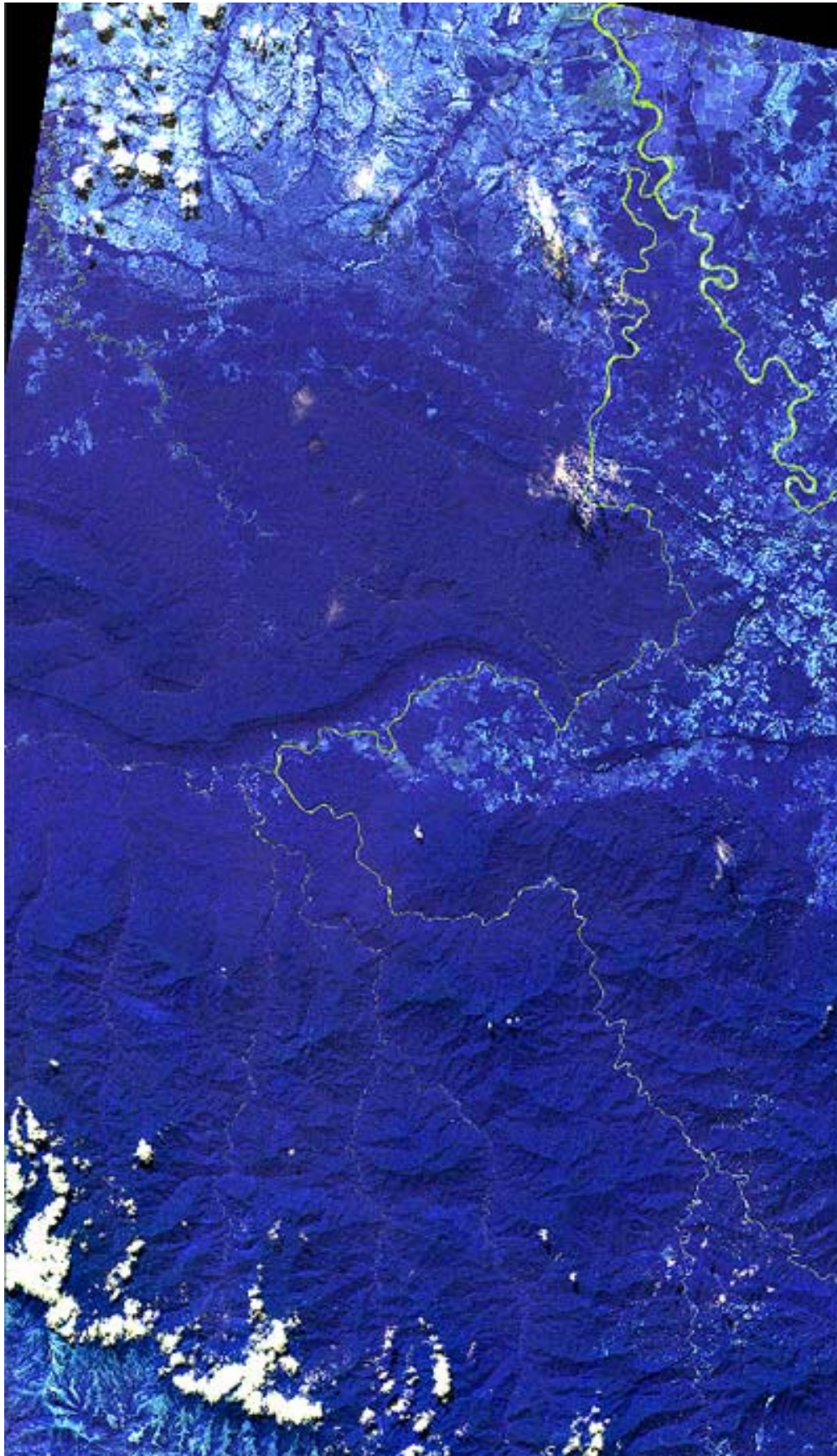


Figura 7-5. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB135

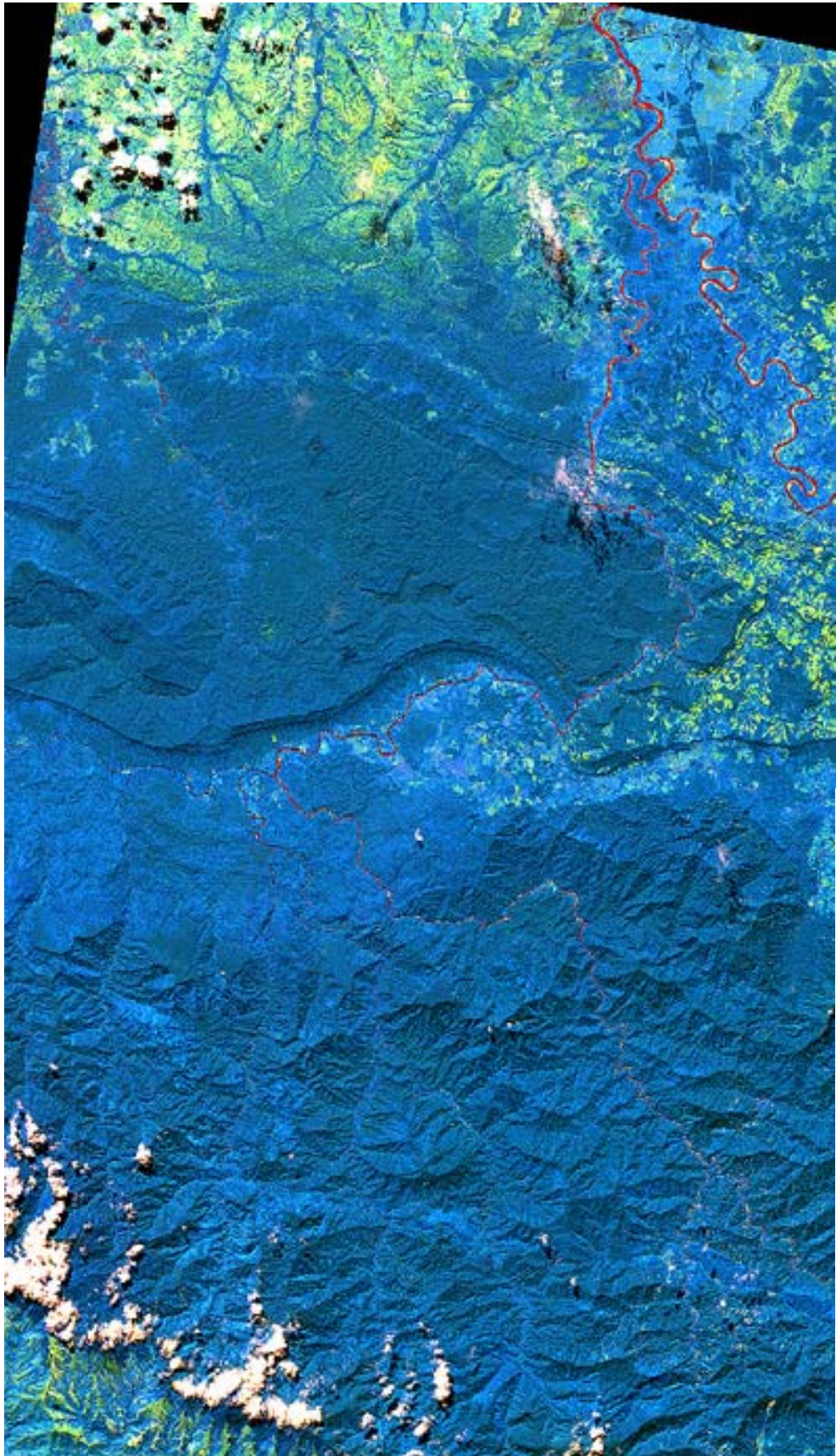


Figura 7-6. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB354



Figura 7-7. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB357

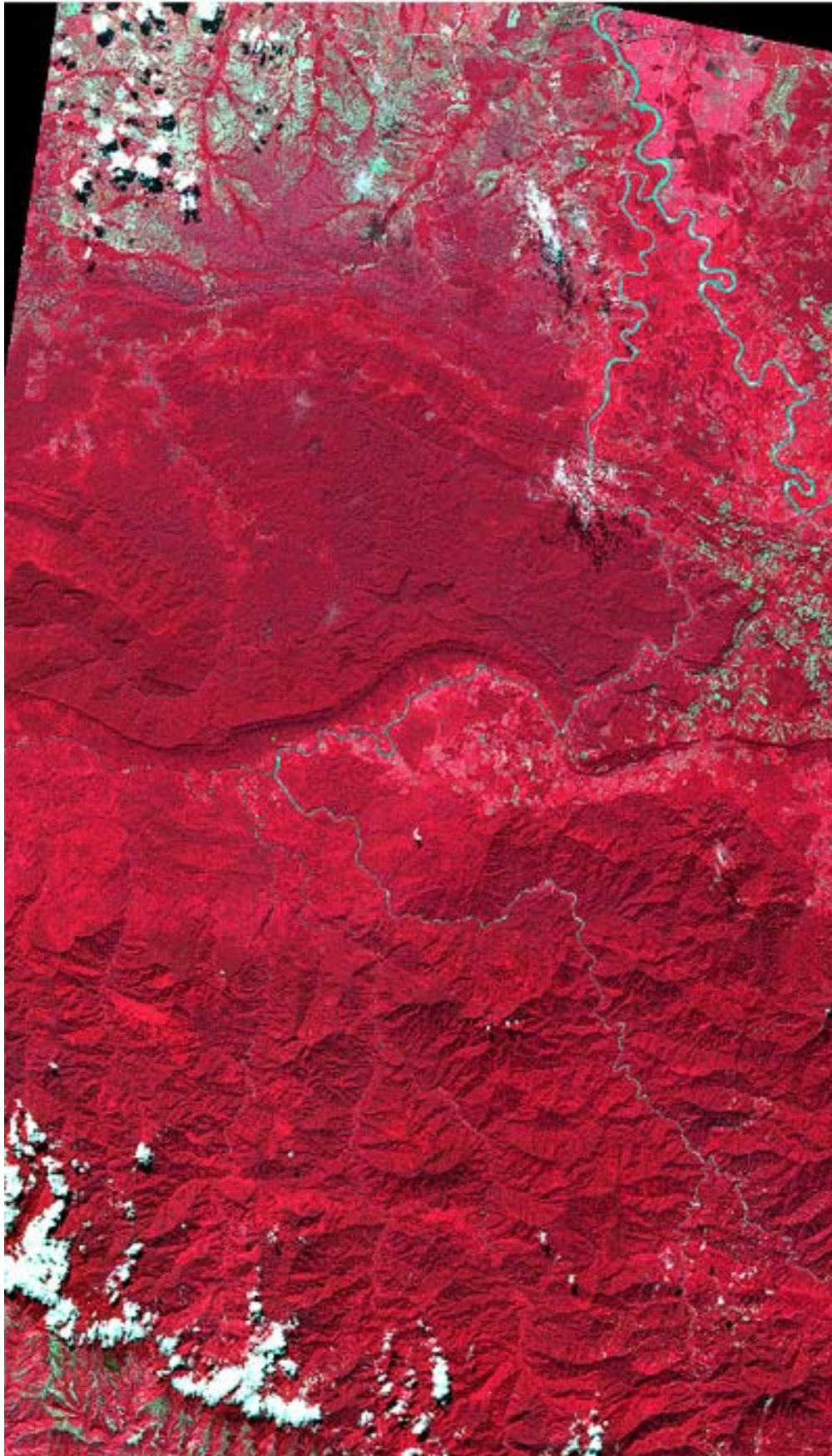


Figura 7-8. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB 432

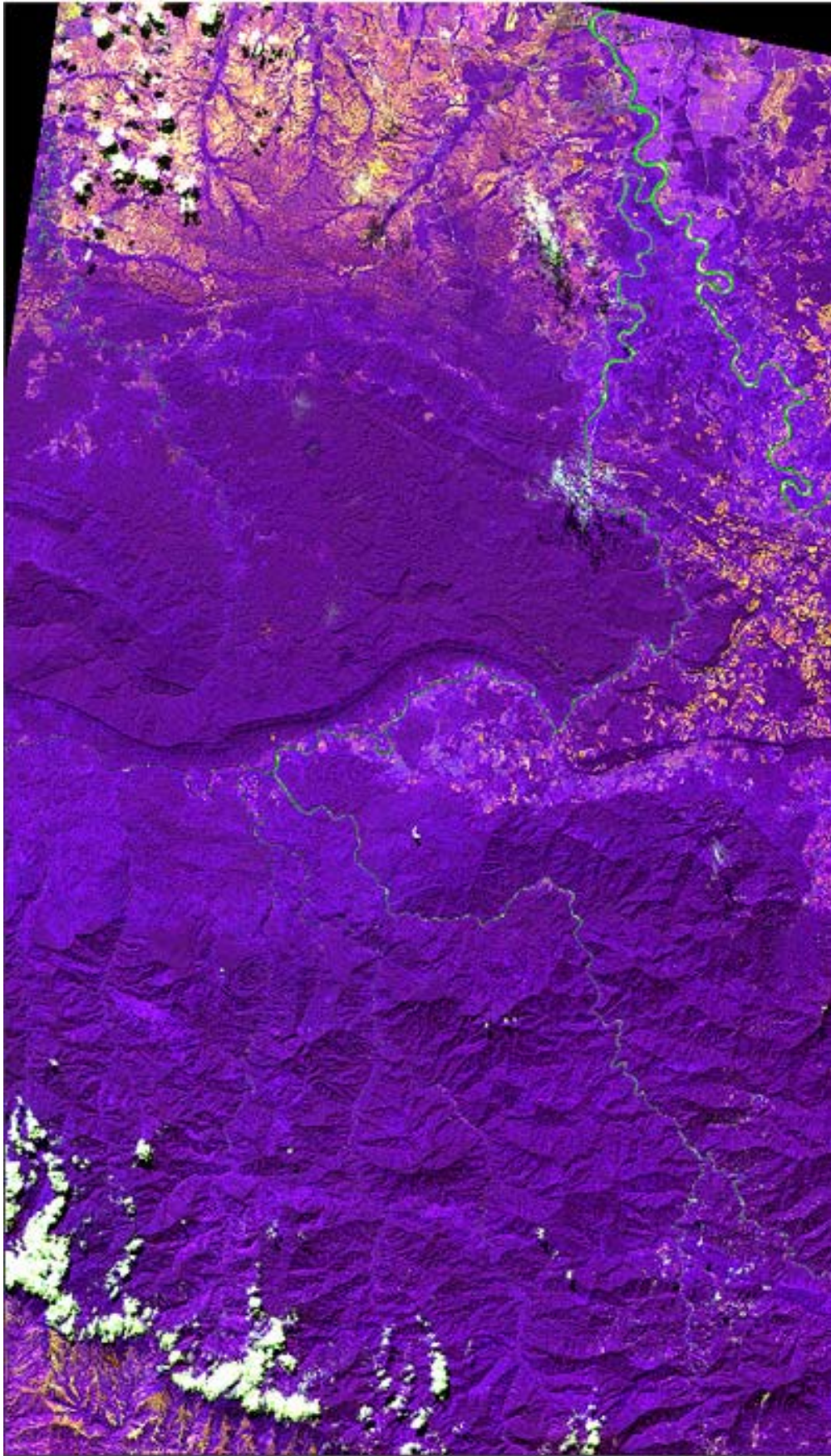


Figura 7-9. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB 453



Figura 7-10. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB534

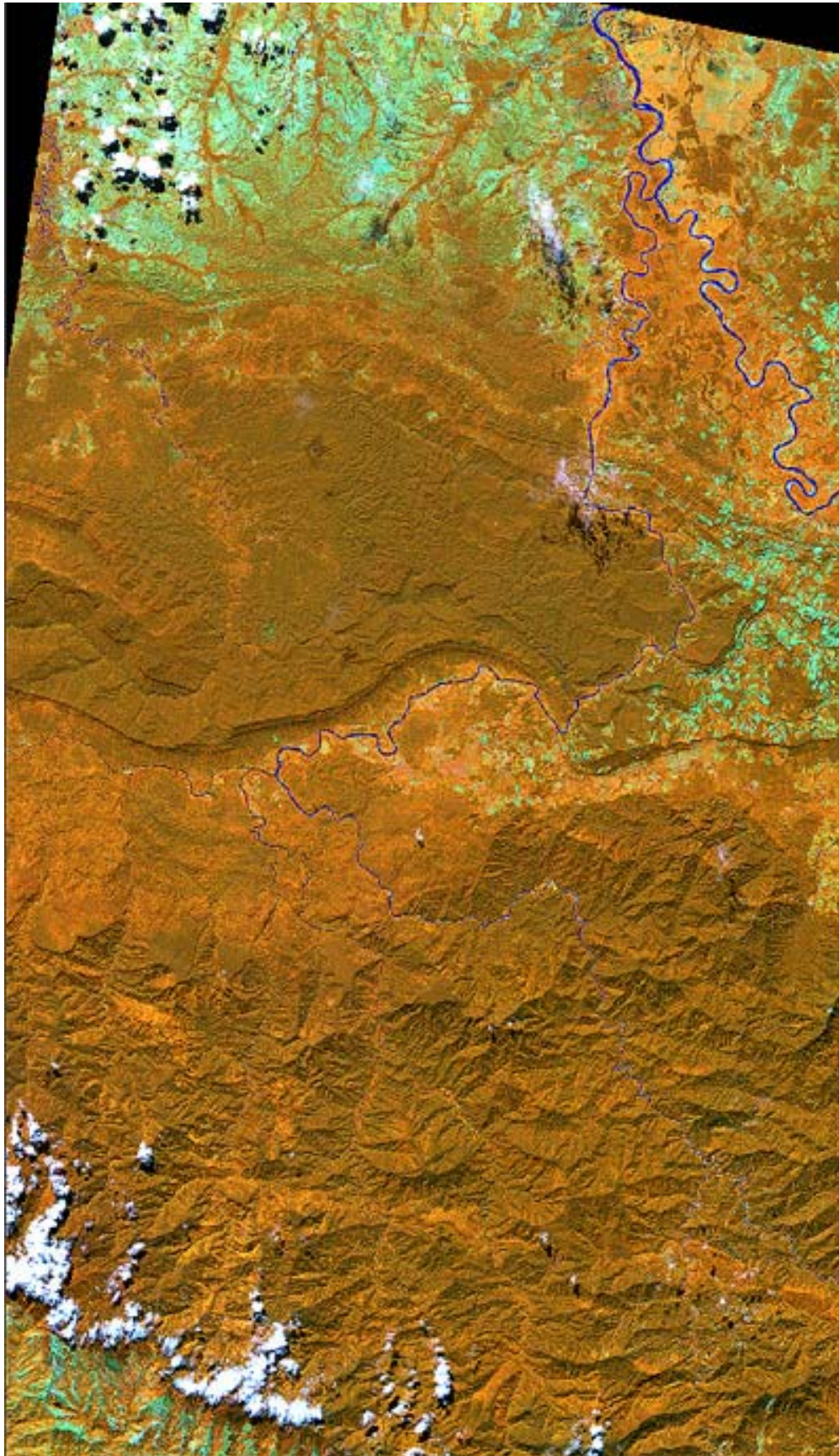


Figura 7-11. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB543



Figura 7-12. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB 752

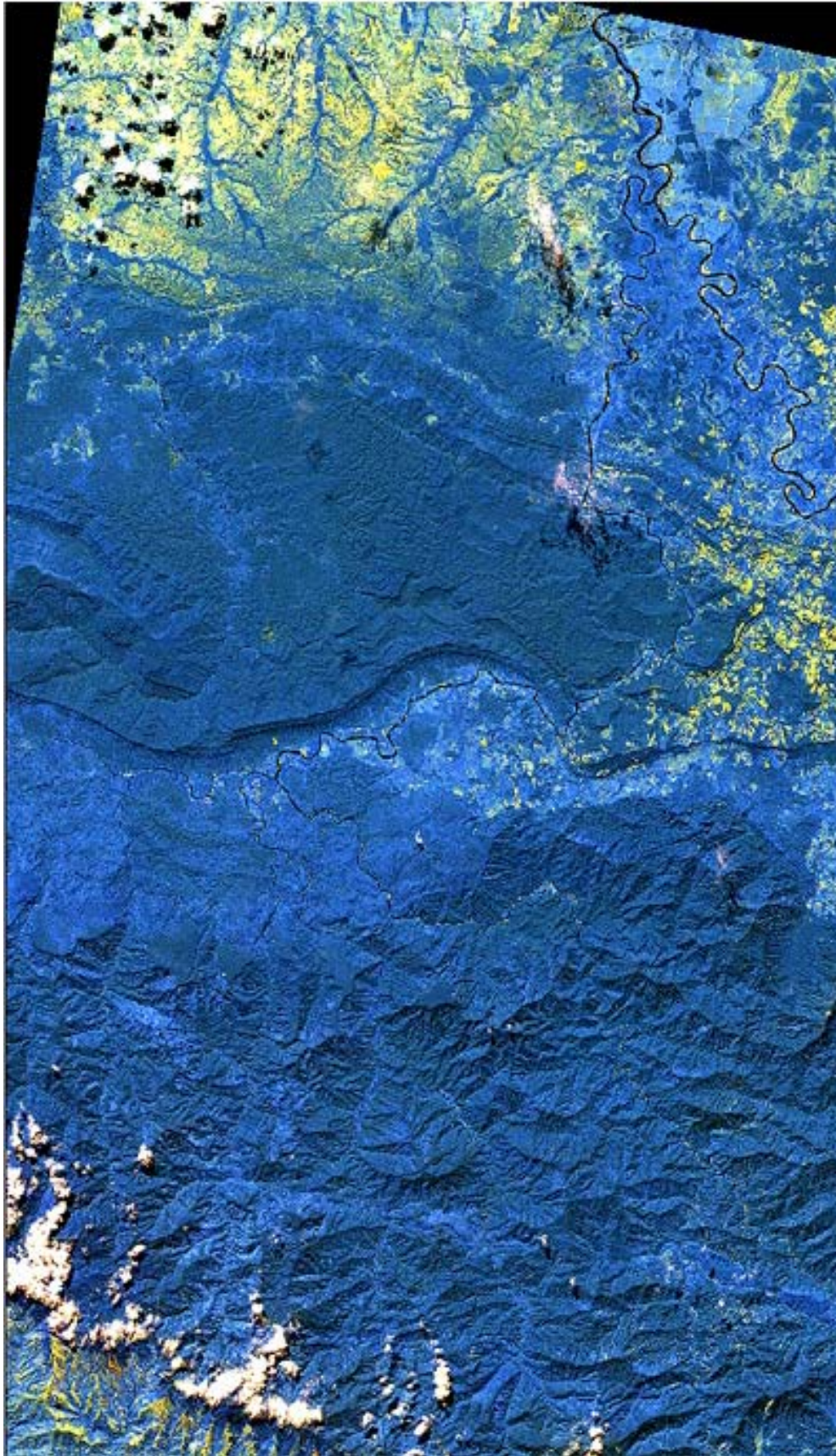


Figura 7-13. Figura que muestra parte de la imagen en combinación RGB754

- **Álgebra de Bandas**

La utilización de cocientes de bandas de la imagen tuvo como objetivo el resaltar características específicas en la imagen. En la operación de bandas R:(banda5/banda3) G:(banda4/banda7) B:(banda2/banda4) se resaltan zonas de aluviones y contrastes de color en la litología (Figura 7-14), la operación R:(banda3/banda5) G:(banda5/banda7) B:(banda7/banda4) se resaltan cuerpos de agua en la imagen (Figura 7-15).

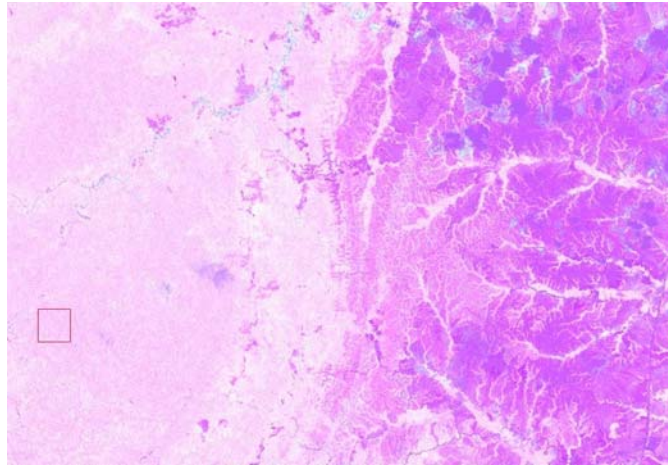


Figura 7-14. Figura que muestra parte de la imagen donde se realizó la operación entre bandas R:(banda5/banda3) G:(banda4/banda7) B:(banda2/banda4).

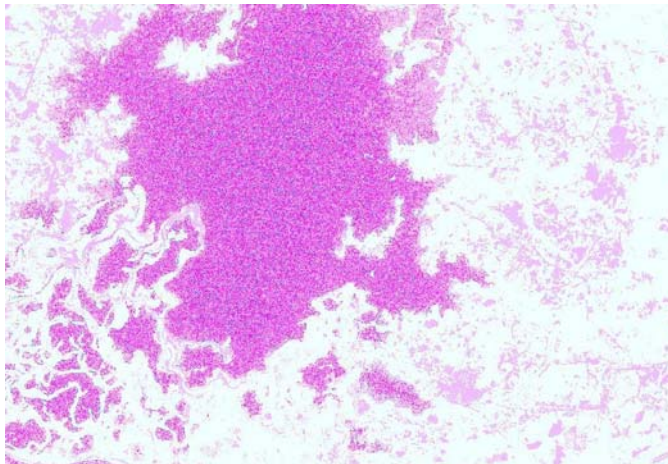


Figura 7-15. Figura que muestra parte de la imagen donde se realizó la operación entre bandas R:(banda3/banda5) G:(banda5/banda7) B:(banda7/banda4).

- **Spectral Angle Mapper**

De las combinaciones de las distintas clases producto del proceso Spectral Angle Mapper con las bandas en cañones RGB, se obtuvieron imágenes que destacaron distintas características, tales como diferencias litológicas. Estas combinaciones fueron de gran utilidad en la interpretación geológica, específicamente en determinar la zona de contacto entre las rocas de edad Plioceno-Pleistoceno y Reciente (Figura 7-16).

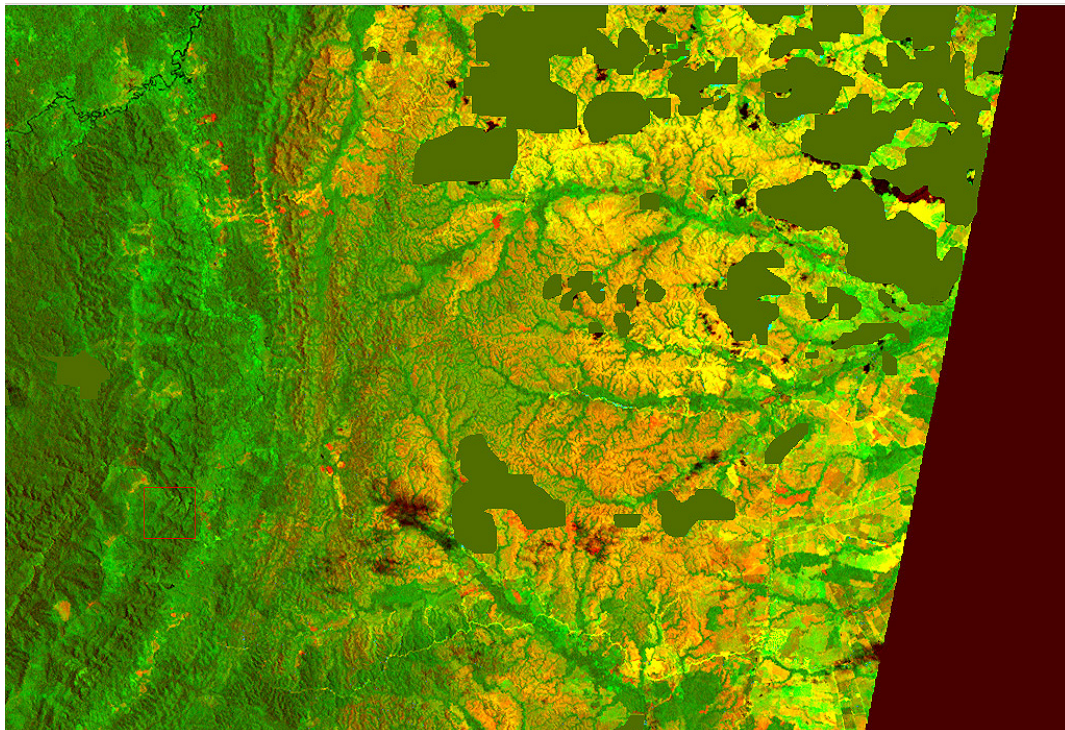
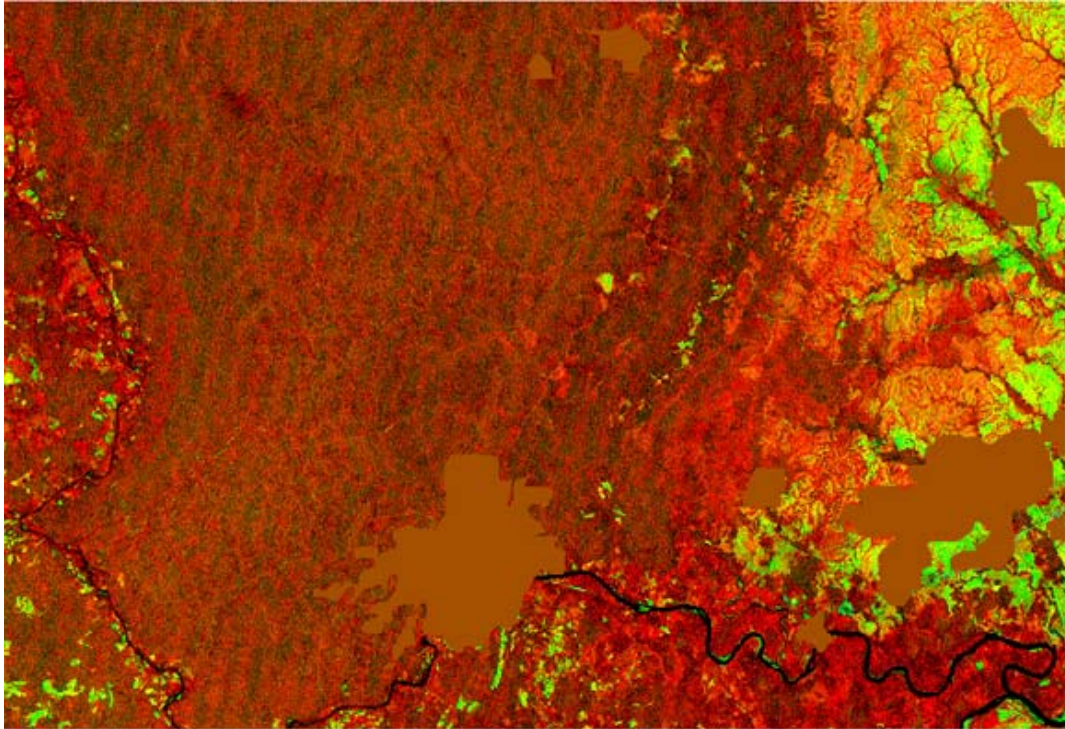


Figura 7-16. Figura que muestra en la parte superior el resultado de la combinación R: 3; G: 1 y B: una de las clases SAM y en la parte inferior la combinación R: 6; G:3 y B: otra de las clases SAM.

- **Firmas Espectrales**

El uso de firmas espectrales en el análisis de las imágenes, fue una de las herramientas empleadas en la verificación de los límites o contactos entre distintas formaciones. En la Figura 7-17 se muestra tres polígonos que se escogieron para efectuar la verificación del límite entre rocas de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y rocas de edad Cretácico Temprano mediante la comparación de las firmas espectrales de estos polígonos.

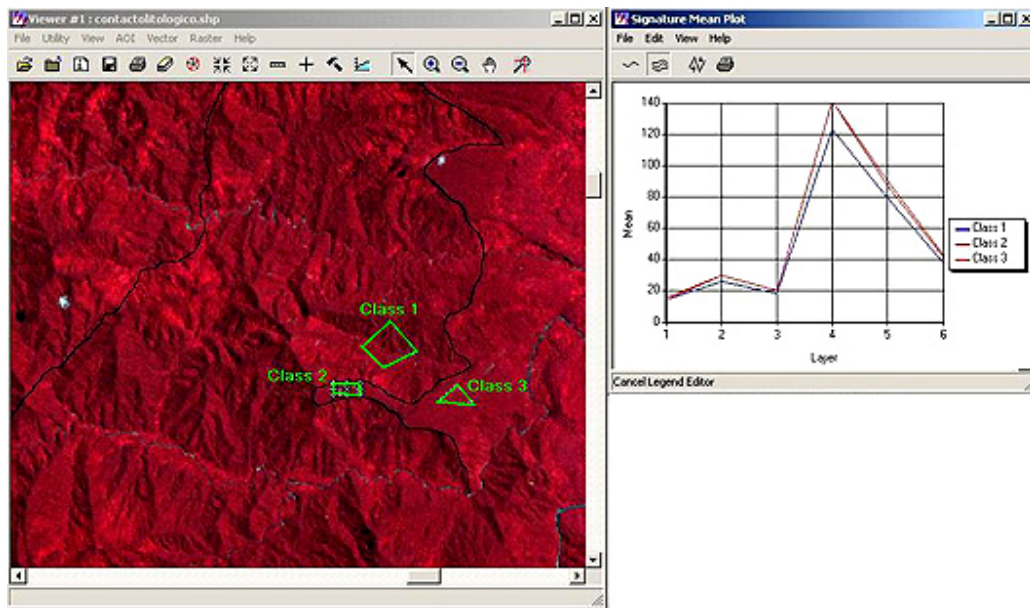


Figura 7-17. Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos tres puntos (clases), y se aprecia una diferencia entre los valores de reflectancia en las gráficas, entre la clase 1 con las clases 2 y 3, teniendo estos dos últimos valores iguales, lo que pudiese interpretarse como: las clases 2 y 3 pertenecen a una formación con características diferentes de la clase 1

En la Figura 7-18 se muestra también el empleo de firmas espectrales para la interpretación de contactos entre rocas de edad Eoceno-Oligoceno y rocas de edad Oligoceno-Mioceno.

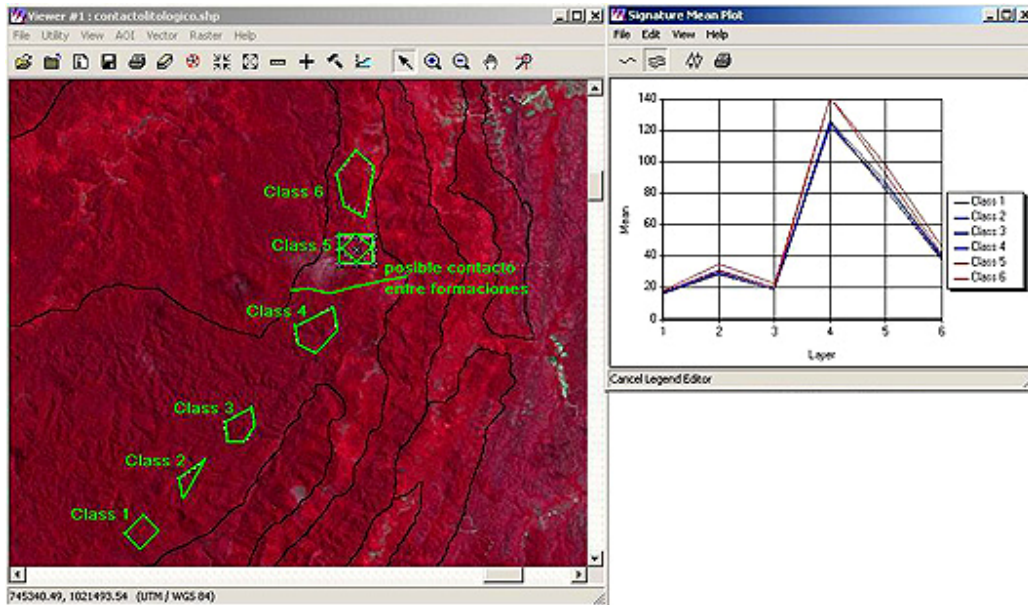


Figura 7-18. Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos seis puntos (clases), y se aprecia que las clases 1,2,3 y 4 muestran valores de reflectancia similares en la gráfica, y diferentes a los valores de las clases 5 y 6, teniendo estos dos últimos valores muy similares. Además muestra un segmento en color verde que pudiese representar una separación entre estas clases, indicando un posible contacto entre dos formaciones.

En la Figura 7-19 se muestra un ejemplo del empleo de firmas espectrales en la interpretación de contactos entre rocas de edad Eoceno y Eoceno-Oligoceno.

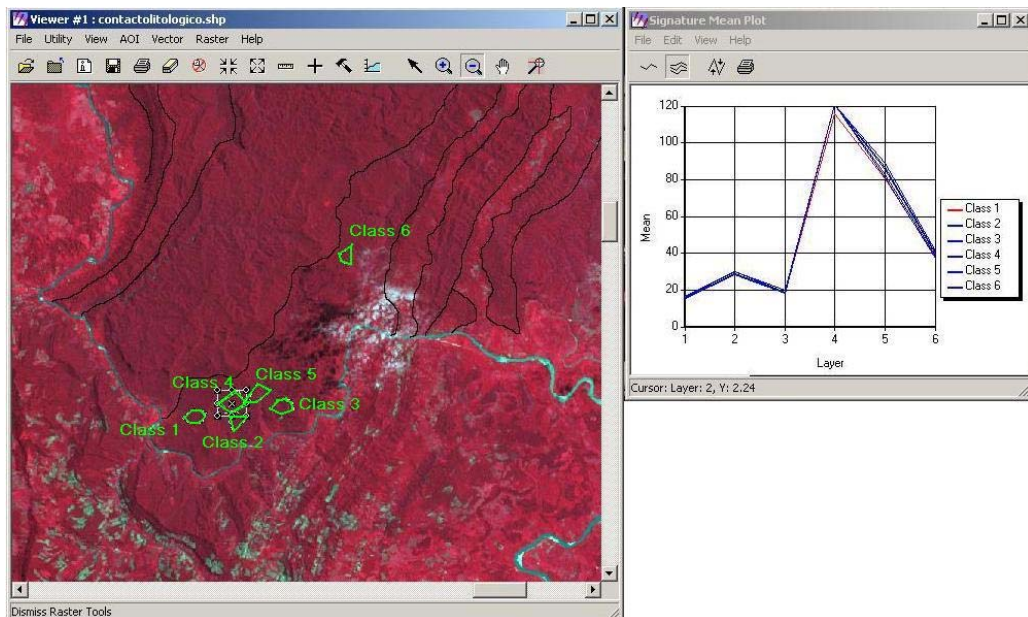


Figura 7-19. Figura que muestra en líneas verdes los polígonos tomados a considerar, identificados con nombres. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos seis puntos (clases), y se aprecia que las clase 1,2 y 4 muestran valores de reflectancia similares en la gráfica, y diferentes a los valores de las clases 3, 5 y 6, teniendo estos tres últimos valores muy similares.

En la Figura 7-20 se realiza una comparación de firmas espectrales entre dos clases (Class1 y Class2) correspondientes a rocas de edad Paleozoico Temprano y Paleozoico- Mesozoico sin diferenciar, donde se observa una diferencia entre las dos gráficas, además presenta diferencias en valores de reflectancia para cada clase en la banda 7. Esta diferencia puede ser producto del tipo de minerales presentes en la zona.

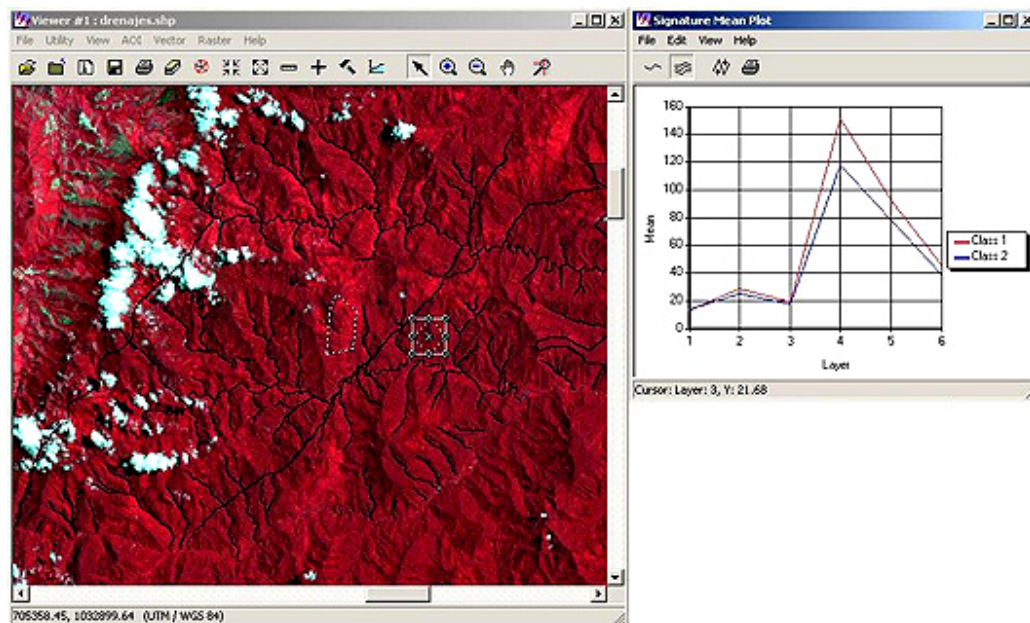


Figura 7-20. Figura que muestra dos polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales para estos dos polígonos identificados como Class 1 y Class2.

- **Comparación entre mapa final y mapas consultados**

Los mapas disponibles para consultar de la zona fueron los siguientes: Duerto 1998, Mapa Geológico de Venezuela compilado por Urbani *et al.* (2006), Mapa Geológico Estructural de Venezuela MEM (Ministerio de Minas e Hidrocarburos NC18-II 1976) Bellizia *et al.* El mapa producto de este estudio presenta similitudes en los contactos con respecto al mapa de Bellizia *et al.* (1976), sin embargo se definieron ligeras variaciones entre los contactos siguientes: rocas de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y rocas de edad Cretácico Temprano, rocas de edad Eoceno y Eoceno-Oligoceno y Oligoceno- Mioceno.

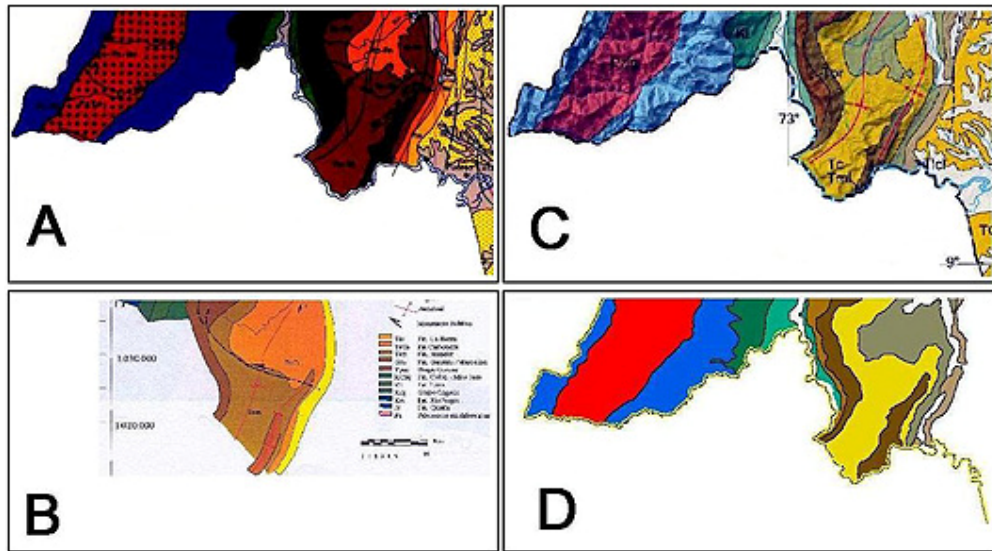


Figura 7-21. Figura que muestra en composición los mapas consultados y el mapa generado con el procesamiento e interpretación de las imágenes Landsat 7 ETM. Mapa A: Bellizia *et al.*, B: Urbani *et al.*, C: Duerto *et al.* (parte este de la zona mostrada en los otros mapas) y D: Mapa producto de este trabajo. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:1.000.000.

En la figura 7-22 se observa la propuesta de actualización del contacto entre rocas de edad Paleozoico-Mesozoico (azul) sin diferenciar y Cretácico Temprano (Verde Oscuro). El contacto fue marcado mediante combinación de bandas y observación de diferencias texturales en la imagen (Figura 7-23).

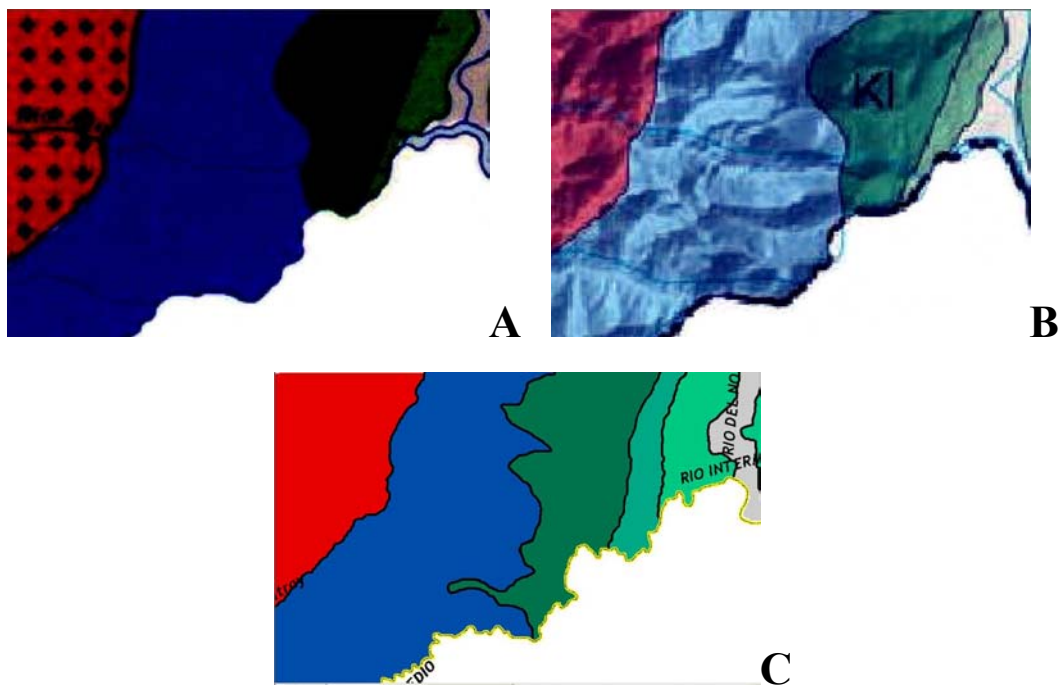


Figura 7-22. Figura que muestra el contacto entre las unidades de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y Cretácico Temprano en los mapas A: Bellizia *et al.*, B: Urbani *et al.*, y el propuesto en este trabajo (C), el cual difiere de los anteriores. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:300.000.



Figura 7-23. Figura que muestra en composición RGB752 la sección de la imagen donde se encuentra el contacto propuesto, marcado en líneas negras, entre las unidades de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y Cretácico Temprano, donde se puede apreciar la diferencia visual y textural entre ambas unidades. La sección de la imagen se muestra a escala 1:300.000.

Además, mediante la utilización de firmas espectrales, e interpretación de diferencias texturales en distintos sectores de la unidad de edad Cretácico, se propone un posible contacto litológico entre la Formación Río Negro y el Grupo Cogollo (Figura 7-24); y entre la Formación La Luna y las formaciones Colón y Mito Juan (Figura 7-25).

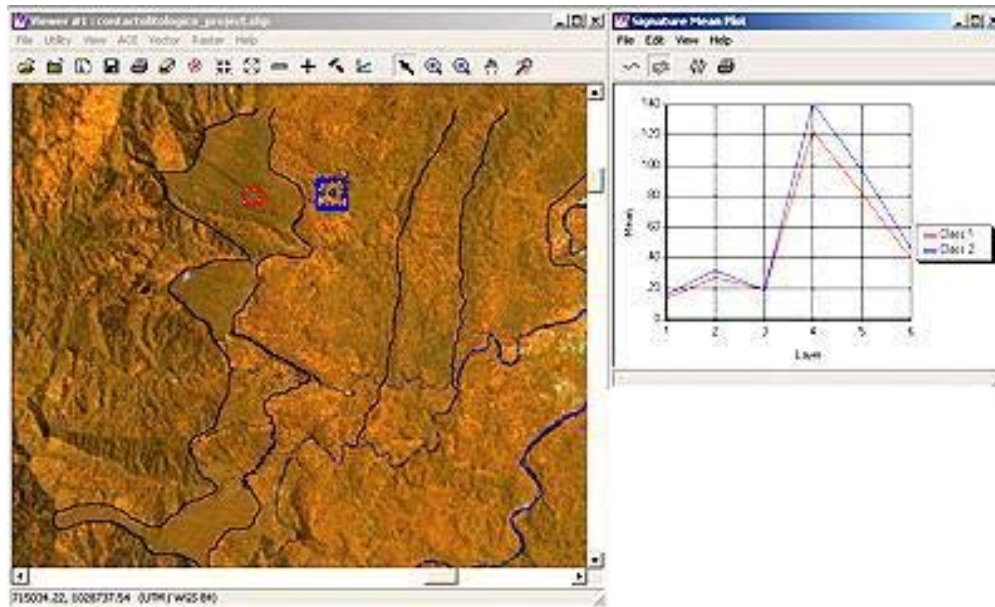


Figura 7-24. Figura que muestra dos polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales, mostrando la diferencia en valores de reflectancia para estos dos polígonos identificados como Class 1 y Class 2.

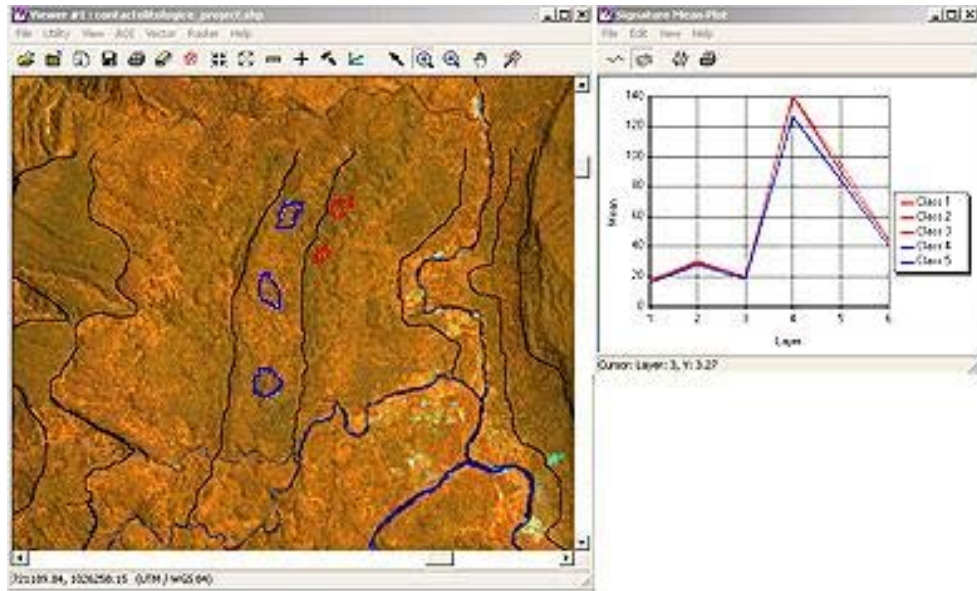


Figura 7-25. Figura que muestra varios polígonos tomados a considerar. Al lado se observa el gráfico de las firmas espectrales donde se aprecia una diferencia entre los valores de reflectancia en las gráficas. Estos valores se pueden concentrar en dos grupos, uno que contiene a los polígonos Class 1,2 y 3 y otro que contiene a los polígonos Class 4 y 5. Esto pudiese interpretarse como dos grupos pertenecientes a formaciones de características litológicas distintas.

En la figura 7-26 se muestra la propuesta de actualización de dos contactos entre rocas de edad Eoceno (marrón oscuro en mapas B y D) y Eoceno-Oligoceno (amarillo oscuro en mapas B y D). Este contacto es más semejante al mostrado en el mapa de Bellizia *et al.* o Urbani *et al.* que el contacto mostrado en el mapa de Duerto. Los contactos fueron marcados también mediante la combinación de bandas, firmas espectrales e interpretación de diferencias texturales en las imágenes.

Además en la misma figura se muestra la propuesta de actualización de dos contactos entre rocas de edad Eoceno-Oligoceno (amarillo oscuro en mapas B y D) y Oligoceno-Mioceno (gris en mapas B y D). Este contacto es más semejante al mostrado en el mapa de Duerto que en los demás mapas. Los contactos fueron marcados también mediante la combinación de bandas, firmas espectrales e interpretación de diferencias texturales en las imágenes.

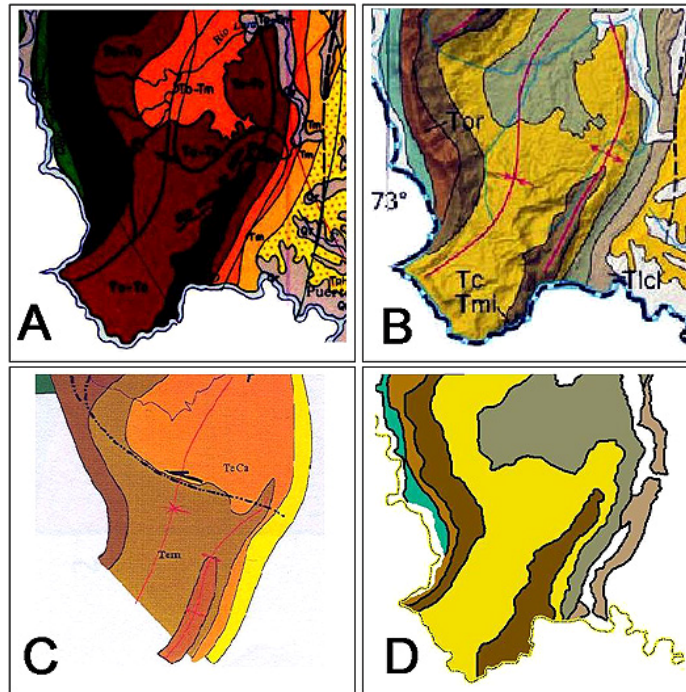


Figura 7-26. Figura que muestra el contactos entre rocas de edades comprendidas desde el Eoceno hasta el Mioceno en los mapas A: Bellizia *et al.*, B: Urbani *et al.*, C: Duerto *et al.* y D: Mapa producto de este trabajo. Todos los mapas se muestran en esta imagen a escala 1:750.000.

Un resultado a destacar es el cambio de curso en algunos sectores del Río de Oro, como por ejemplo en el sector Garzas donde el antiguo curso del río se presenta actualmente como meandro abandonado. El nuevo curso se encuentra ubicado más al sur de su posición anterior. En la figura 7-27 se muestra la comparación de la posición del río en la imagen satelital y el mapa topográfico (año 1973) de La Dirección de Cartografía Nacional, del IGVS.

El límite internacional entre Venezuela y Colombia en esta zona esta marcado por el curso de Río de Oro, sin embargo el límite sigue la trayectoria del meandro abandonado.

Venezuela y Colombia suscriben el Tratado de Cúcuta en el año 1941, donde se establece que el límite internacional queda definido a perpetuidad, tomando como referencia la vaguada del cauce del Río de Oro para el año 1928. Cualquier variación en la posición de este río no influirá en el límite internacional.

Para la elaboración de este modelo se toma entonces como limite internacional, el presentado en las cartas 5543 y 5643 del IGVS.



Figura 7-27. Figura que muestra el cambio de curso en una sección de Río de Oro. A la izquierda se observa la posición del cauce para el año 1973 (carta topográfica) y a la derecha el cauce actual en la imagen satelital.

CONCLUSIONES

- El mapa producto de este trabajo presenta variaciones entre contactos de unidades respecto a los mapas disponibles para consultar de la zona de estudio. Estas variaciones entre contactos en el modelo propuesto obedecen a la interpretación y análisis multiespectral de las dos imágenes satelitales *Landsat 7 ETM* empleadas. Además se proponen los posibles contactos litológicos entre la Formación Río Negro y el Grupo Cogollo (Cretácico Temprano), y entre la Formación La Luna y las formaciones Colon y Mito Juan, sin diferenciar (Cretácico Tardío).
- Las clasificaciones (Supervisada y No Supervisada) brindan una idea aproximada de la distribución geométrica y espacial de características de interés, dependiendo del tipo de estudio que se lleve a cabo. En este caso las características tomadas en consideración se basaron principalmente en diferencias en cuanto a la resistencia y tipo de litología.
- En la zona de estudio las correcciones MNF (Fracción Mínima de Ruido) y PPI (Índice de puerza de píxel) no aportaron información relevante para establecer contactos litológicos en áreas de litología resistente, sin embargo permitieron identificar áreas con contenido de material de tipo aluvial.
- Las combinaciones RGB432, RGB453, RGB543, RGB752 y RGB754, entre cañones RGB y bandas de las imágenes, aportaron información de características importantes para la interpretación geológica, tales como el realce en drenajes y elementos estructurales, realce entre tipos litológicos e identificación de contactos litológicos.

- Se pudo observar que algunos sectores del curso de Río de Oro han modificado su posición, dejando algunas zonas como meandros abandonados, y aunque el límite internacional entre Venezuela y Colombia esta definido por el curso de este río, dicho límite no varía su ubicación. Esta ubicación fue definida en tratados con Colombia y es fija, independientemente de la posición que ocupe el cauce de Río de Oro.

RECOMENDACIONES

- El uso de un solo paquete informático de procesamiento de imágenes no es aconsejable, debido a que algunos procesos pueden requerir un procedimiento para su realización que puede resultar un poco más complicado en un paquete que en otro.
- A parte del software de digitalización empleado en el presente trabajo, el ArcGIS, existen paquetes informáticos de libre licencia para digitalización de mapas que pudiesen ser empleados en sustitución, como el **SPRING**, el cual es un producto desarrollado por el *Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE)/ DPI* de Brasil, el **GeoDa** del *Departamento de Geografía* de la *Universidad de Illinois*, o el software **GRASS** desarrollado por la *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories*. Estos paquetes de libre licencia pueden ser adquiridos fácilmente vía Internet.
- Realizar una búsqueda previa de información geológica de la zona a trabajar, de manera de permitir elaborar un mapa con un alto nivel de detalle.
- Si hay mucha presencia de nubes en la zona, revisar otros programas Landsat (5 TM, etc.) u otras plataformas (ASTER, etc.)

BIBLIOGRAFÍA

- Alzate A., Beatriz E. (2001). Imágenes Espaciales de la Superficie Terrestre. Procesamiento digital, análisis y extracción de información temática. Universidad Nacional de Colombia, facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía, Santa Fe de Bogota.
- Audemard, F. (1991), Tectonics of Venezuela: Ph.D Thesis, Rice University, Houston Texas, 245 p.
- Bowen, J.M. (1972). Estratigrafía del Precretácico en la parte norte de La Sierra, IV Congreso Geológico, Tomo I.
- Canache M. y otros (1994). Revisión Estratigráfica de la Sección Cretácica del Río Maraca, Sierra de Perijá, Venezuela. V Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en la Cuenca Subandina, Puerto La Cruz. Memorias p: 240-241.
- Carreño D., Franklin J. (2004). Clasificación Mineralógica del Cerro Bolívar y El Cuadrilátero San Isidro a través de Análisis Multiespectral, utilizando Imágenes de Satélite Landsat 7 ETM+. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- De Toni, B., y otros (1994). Análisis Geológico Integrado de las Cuencas de Barinas y Maracaibo. Síntesis estructural, inédito; PDVSA-Intevep, INT-02963-94, 87 p.
- De Toni, B. y Rivero, C. (1996) Síntesis Estructural del Sector Central del Flanco Perijanero, Los Teques, Inf. Tecn., INT-03392, 96, INTEVEP, S.A. 20p.
- Drury Steve (2001). Image Interpretation in Geology. 3era edición. Blackwell Science Inc. Malden, MA, U.S.A.
- Duerto, L. y otros (1998), Síntesis de las principales zonas triangulares en los Frentes de Montañas del Occidente Venezolano: Memorias IX Congreso Venezolano de Geofísica, CD-ROM.

- Ford, A. y Noubolt, J. Microfacies del Cretácico en Venezuela Occidental, en Cuviller, J. y Schurman H. (eds.) Internacional Sedimentary Petrographical Series. Leiden & Brill Publicación Especial V,VI, 59p.
- Gamarra L. y Adrián C. Estudio Geológico del sector Riecito de El Palmar, Sierra de Perijá, Distrito Maracaibo, Estado Zulia. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- González de Juana, C., Iturralde J. y Picard C., 1980. Geología de Venezuela y de sus Cuencas petrolíferas. Caracas, Ediciones. Foninvez, 1031 p.
- González R. (1998). Interpretación de un Área y Balanceo de una Sección del Flanco Sur, Sierra de Perijá. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hea, J.P. y Whitman, A.B. (1960). Estratigrafía y Petrología de los sedimentos precretácicos de la parte norte-central de La Sierra de Perijá. III Congreso Geológico Venezolano. Tomo I. Memoria Boletín Geológico Caracas. Public. Esp. 3, I 351-376.
- Hedberg, H. D. y Sass L. C., (1937). Sinopsis de las formaciones geológicas de la parte occidental de la Cuenca de Maracaibo, Venezuela. Bol. Geol. y Min., Caracas, 1(2-4): 71-112.
- Kellogg, J., 1984. Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela, Colombia, and adjacent basins: Geological Society of America Memoir 162, pp. 239-261.
- Liddle, R A., 1946. The geology of Venezuela and Trinidad, 2nd. ed., Paleont. Res. Inst., Ithaca, New York, 890 p.
- Falcón, R. *et al.* (1993). Estudio y demuestre de secciones geológicas en el flanco oriental de la serranía de Perijá. PDVSA-Maraven, inédito, EP-30952, 23 p.
- Lugo, J. y Mann, P. (1995). Jurassic-Eocene Tectonic Evolution of Maracaibo Basin, Venezuela, en Tankard A.; Suárez, S. y Welsink H. (eds.) Petroleum Basin of South America, AAPG, Memoir 62, p: 699-725.

- Maze, W. (1984). Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, Northwestern Venezuela: Geology and Tectonic Environments of Red Beds and Volcanic Rocks, en Bonini W.E. y otros, (eds.) The Caribbean South American Plate Boundary and Tectonics. GSA Memoir 162 p: 287-293.
- Miller, J. B. y Sanjuan J., 1963. Some Tertiary Stratigraphy and Revision of Tertiary nomenclature, western Maracaibo Basin, Venezuela. Asoc. Venez. Geol., Min., Pet., Bol. Inform., 6(3): 63-96.
- Mendoza, V. (2005). Geología de Venezuela Tomo I: Escudo de Guayana, Andes Venezolanos y Sistema Montañoso del Caribe. Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias de la Tierra.
- Mendoza, V. (2005). Geología de Venezuela Tomo II: Cretácico, Terciario y Reciente Sedimentario de Venezuela. Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias de la Tierra.
- Parnaud, F. y otros (1995) Stratigraphic syntesis of western Venezuela AAPG Memoir 62, p. 681-698.
- Renz, O., 1959. Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental. Bol. Geol., 5(10): 3-48. Resumen (1960) en: Asoc. Venez. Geol., Min. y Petrol., Bol. Inform., 3(7): 209.
- Rod, E. y Maync W. (1954). Revision of lower Cretaceous Stratigraphy of Venezuela, AAPG 38(2). 192-283.
- Roure F. y otros (1997) Within-Plate Deformations in the Maracaibo and East Zulia Basins, Western Venezuela, Marine and petroleum Geology, Great Britain. P: 139-163
- Sutton, F. A., 1946. Geology of Maracaibo basin, Venezuela, American Association of Petroleum Geologist, Bull., 30(10): 1621-1741.
- Xavier, P. y Espejo, A. (1977). Algunas ideas sobre la estructura de la parte media de La Sierra de Perijá. IV Congreso Geológico, Tomo II. Nov. 1977, Memoria II 739-757.

Yoris F., M. Ostos & L. Zamora. 1997. Petroleum Geology of Venezuela. En Schlumberger Surencó C.A. Venezuela WEC 1997 Well Evaluation Conference. Jolley Printing Inc, Houston, p. 1-44.

Zambrano *et al.* (1971) Síntesis Paleogeográfica y Petrolera del Occidente de Venezuela. IV Congreso Geológico, Tomo I, Memoria I Boletín Geológico, Public. Esp. 483-545.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS:

Bense T., (2007). Tutorial – Introducción a la Percepción Remota. Sextas Jornadas de Educación en Percepción Remota en el Ámbito del MERCOSUR y Primeras Uruguayas sobre el mismo tema. SELPER, Uruguay, 2007. Disponible: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm> [Consulta: 2007, Diciembre].

Biodiversity Informatics Facility of the American Museum of Natural History's. Center of Biodiversity (s/f). Bands Combination. [Formato de archivo PDF]. Disponible: http://biodiversityinformatics.amnh.org/file.php?file_id=145 [Consulta: 2008, Marzo]

Castrillo D., José T. y otros (s/f). Evolución Estructural del Flanco Nor-Occidental de los Andes Venezolanos (Región de Valera). Universidad de Los Andes. [Formato de archivo PDF]. Disponible: <http://www.congresogeofisica-sovg.org/FTP/CONG2004/online/Papers/Sesion7/64808CastrilloJ.pdf>. [Consulta: 2007, Octubre].

Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. (LEXICO III Versión) PDVSA-Intevep, Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm>. [Consulta: 2007, Octubre-Noviembre].

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén, España (s/f). Prácticas de Teledetección. Realce radiométrico. Utilización del color. [Formato de archivo PDF]. Disponible: http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/Prac_Tel_2006_3.pdf. [Consulta: 2008, Marzo].

El Satélite Landsat. [Formato de archivo PDF]. Disponible:

[http:// caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf](http://caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf). [Consulta: 2007, Noviembre]

Esri, ¿Qué es ArcGIS? (2002). Manual de ArcGIS. Disponible:

<http://www.geotecnologias.com/Documentos/what-is-arcgis-spanish.pdf>. [Consulta: 2007, Noviembre]

Fernández C., Ignacio A. (2001) El Satélite Landsat, Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ del satélite Landsat. Universidad de Valladolid. Argentina. Disponible: [http:// caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf](http://caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf) [Consulta: 2008, Marzo].

Geoinformación (2007). Software GIS – ArcGIS. Disponible:

<http://www.softwaregis.cl/arcgis.html>. [Consulta: 2007, Noviembre]

Imágenes Satelitales Empleadas: NASA Landsat Program, 2004, Landsat ETM+ scene L7CPF20010701_20010930_06, L1G, USGS, Sioux Falls, 01/08/2001.

Disponible: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> [Consulta: 2007, Octubre].

Innova Cad Vision (2001). Introducción al manejo de Envi. Disponible:

<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/maneenvi.htm>. [Consulta: 2007, Noviembre].

International Development Advisory Service (2008) Leica/ERDAS. Disponible:

<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/maneenvi.htm> [Consulta: 2008, Enero]

MAPAS CONSULTADOS:

Bellizia A., Pimentel N. y Bajo R. (1976). Ministerio de Hidrocarburos y Minas, Dirección de Geología. Mapa Geológico Estructural de Venezuela. Ediciones Foninves. Edición 1-DG. Hoja: NC-18-II. Escala 1:500.000. Mapa Geológico Estructural.

Duerto, *et al.* (s/f). Maraven S.A. Mapa Geológico del flanco suroriental de la Sierra de Perijá. Escala: 1:100.000. Mapa Geológico.

Etchart H. 1970. Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Geología. Mapa Geológico de la Hoja río Day y río Intermedio. Caracas. Escala 1:100.000. Mapa Geológico.

Urbani y otros. (2006). FUNVISIS, Escuela de Geología, Minas y Geofísica UCV, USGS. Mapa Geológico de Venezuela. Caracas. Escala 1:750.000. Mapa Geológico Estructural.

Venezuela. IGVS, Dirección de Cartografía Nacional. (1973) Río Intermedio. Hoja 5543 Caracas. Escala: 1:100.000. Mapa topográfico.

Venezuela. IGVS, Dirección de Cartografía Nacional. (1973) Río Intermedio. Hoja 5643 Caracas. Escala: 1:100.000. Mapa topográfico.