TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA NOROCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ESTADO ZULIA ENTRE EL RÍO GUASARE Y EL RÍO LAJAS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al título de Ingeniero Geólogo.
Por los Bachilleres.

Espaillat A. Julio C.
Gutiérrez R. Lesme D.

Caracas, Noviembre 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA NOROCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ESTADO ZULIA ENTRE EL RÍO GUASARE Y EL RÍO LAJAS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM

Tutor académico: Rafael Falcón
Cotutor académico: Mauricio Hernández

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al título de Ingeniero Geólogo.
Por los Bachilleres.

Espaillat A. Julio C.
Gutiérrez R. Lesme D.

Caracas, Noviembre 2008

Espaillat A., Julio C.

Gutiérrez R. Lesme D.

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA NOROCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ESTADO ZULIA ENTRE EL RÍO GUASARE Y EL RÍO LAJAS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 7 ETM

Tutor Académico: Prof. Rafael Falcón.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geología. 2008, 98 pp.

Palabras claves: Actualización Cartográfica Geológica, Estado Zulia, Sierra de Perijá, imágenes satelitales landsat 7 ETM.

Resumen. Este trabajo fue realizado en la región de Alto Guasare en la Sierra de Perijá, al Noroeste del Estado Zulia; el propósito fundamental fue realizar la actualización de la cartografía geológica de la zona a través de imágenes satelitales y la recopilación de trabajos previos hechos en el área. Primeramente se busco la bibliografía disponible de estudios realizados en la zona y se procedió a la correcciones de las imágenes satelitales. Se realizaron distintas operaciones a la imagen para después resaltar los aspectos geológicos que se encontraron en ella e integrar esta información con los mapas previos de la zona. Con los resultados obtenidos se pudo corroborar una nueva geometría de los contactos entre las formaciones presente en la zona de estudio, las diferentes estructuras como fallas y pliegues de deformación anticlinales y sinclinales presentes por medio de firmas espectrales, la disposición del drenaje, las curvas de nivel en intervalos de 400 metros por el mapa topográfico de la zona y las diferencias entre las litologías presentes por medio de combinaciones de bandas y cocientes de bandas aplicadas a la imagen satelital; con todos los resultados anteriores se procedió a realizar un mapa por medio del software ArcGIS® 9.1.en los cuales se plasmaron los resultados obtenidos y se genero la actualización del mapa de la zona de Alto Guasare.

Existe una fuerza motriz más poderosa que el vapor,

la electricidad y la energía atómica: La voluntad

Albert Einstein

A Mi Esposa e Hija, las Amo infinitamente

Lesme

AGRADECIMIENTOS.

Ante todo agradezco a mi Dios Todopoderoso por haberme dado vida y salud durante todo este tiempo en la magna casa de estudio y lograr culminar esta anhelada meta.

A mis padres Arelys y Cristóbal, quienes en todo momento me han brindado su apoyo, por ser motivo de inspiración y soporte incondicional a lo largo de toda mi vida y en especial en este nuevo logro.

Agradezco a todos mis hermanos, siempre dispuestos a brindarme un consejo y a escucharme, en especial a Lorena y Larry que han sido ejemplos de vida a seguir.

Agradezco infinitamente a mi esposa Evelyn, mi princesa preciosa, mi motivo para luchar y seguir adelante superando en cada momento nuevos obstáculos, dándome fuerzas a cada instante para alcanzar este triunfo que también le pertenece.

A mi amigo y compañero de tesis Julio que siempre nos hemos apoyado, amigo en las buenas y en las malas, humilde y siempre compresivo, gracias por estar incondicionalmente.

Agradezco a nuestro tutor profesor Rafael Falcón que siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y brindarnos su apoyo, en la realización de este proyecto.

Doy gracias al ingeniero Mauricio Hernández, cotutor de este proyecto y amigo, que en todo momento estuvo brindándonos su apoyo y dedicación.

De igual forma agradezco a todos los profesores que compartieron conmigo sus conocimientos, para que hoy día sea un gran profesional, en especial al profesor Franco Urbani, que siempre me asesoró y me brindó grandes consejos.

A mis tios: Malvila, Fislene, Eglis y Raul que siempre estuvieron cuando más los necesite.

A los amigos y compañeros que compartieron conmigo durante mi carrera: José David (Vyco), Denny, Oliver, Christian, José T, Tony T, Carlos C, Rubén, Álvaro, Gerler, Irma Chiara y todos aquellos que siempre estuvieron allí cuando los necesité.

A todos ellos expreso mis más sinceras palabras de agradecimiento…

Lesme D. Gutiérrez Reyes.

La posibilidad de realizar un sueño es lo que hace que la vida sea interesante…

Paulo Coelho

AGRADECIMIENTOS.

Ante todo agradezco a mi Dios Todopoderoso y a la Virgen del Valle por haberme dado vida y salud durante toda mi vida y otorgarme la oportunidad de estudiar en esta maravillosa casa de estudio que es la UCV

A mis padres Hugo Espaillat y Belkis Amarista, quienes en todo momento me han brindado su apoyo, paciencia y su amor incondicional a lo largo de toda mi vida, se los agradezco eternamente.

A mis hermanos, Francys, Landis y Hugo que han sido una verdadera compañía sincera, siempre han estado allí en lo bueno y en lo malo y cada uno enseñándome cosas que me han conformado como persona.

Agradezco a Irma Chiara que es mi compañera, mi amor , mi chikita que siempre ha estado pendiente de mi y que con una sonrisa sincera siempre esta dispuesta a acompañarme en todo lo que me propongo te quiero mucho……..…..Mo

A mi amigo y compañero de tesis Lesme Gutierrez que siempre nos hemos apoyado, amigo en las buenas y en las malas, humilde y siempre compresivo, gracias por estar incondicionalmente.

Agradezco a nuestro tutor profesor Rafael Falcón que siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y brindarnos su apoyo, en la realización de este proyecto.

Al ingeniero Mauricio Hernández, cotutor de este proyecto y amigo, que en todo momento me apoyo en la realización de este trabajo y al que en compartido y discutido varios aspectos filosóficos de la vida y su evolución.

A los amigos y compañeros que compartieron conmigo durante mi carrera:

Denny “el Negro” Tejera, Yulimar Millán,,Álvaro Pedrique (El Chipo), David Estraño, Rubén Fidolo, Eduardo “El doguer”, Marta Elguezabal, Juan Carreño, Jerina Avendaño, Alejandra Romero, Juan “El Cochocho”, Oliver “El Oliverius”, Gerler “El chino”, Hairol Pacheco, Cristian Epuyao, Mirka, Evelyn Sánchez, Rafael “Cardan” Soriano y todas las personas que se me olvido Mencionar.

A todos ellos GRACIAS…

Julio Cesar Espaillat Amarista

"EL CONOCIMIENTO NOS HACE RESPONSABLES"

Ernesto "CHE" Guevara.

INDICE

PAGINAS

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCION..... 1
1.2 LOCALIZACION DE AREA DE ESTUDIO..... 2
1.3 ALCANCES 3
1.4 OBJETIVO GENERAL..... 4
1.5 OBJETIVOS ESPECIFICOS..... 5
1.6 METODOLOGIA GENERAL..... 5
1.6.1 Etapa de investigación bibliográfica..... 5
1.6.2 Etapa de oficina..... 5
1.6.3 Etapa de análisis y discusión de resultado..... 5

1.7 ANTECEDENTES..... 6

CAPÍTULO II

2.1 GEOLOGIA REGIONAL
2.1.1 GENERALIDADES..... 11
2.1.2 TECTONICA REGIONAL..... 13
2.1.3 ESTATIGRAFIA REGIONAL..... 16
2.1.3.1 PRECÁMBRICO TARDÍO..... 17
Formación Perijá..... 17
2.1.3.2 PALEOZOICO..... 18
Grupo Río Cachirí..... 19
Formación Los Guineos..... 20
Granito de Lajas..... 21

Formación Caño Grande..... 22
Formación Caño del Oeste..... 23
Formación Campo Chico..... 23
Formación Río Palmar..... 24
Formación Palamarito..... 24

2.1.3.3 TRIASICO – JURASICO..... 25
Formación Tinacoa..... 25
Formación Macoita..... 26
Formación La Quinta..... 27

2.1.3.4 CRETÁCICO..... 28
Formación Rió Negro..... 29
Grupo Cogollo..... 30
Formación Apón..... 32
Formación Lisura..... 32
Formación Maraca..... 33
Formación La Luna..... 34
Formación Colón..... 36
Formación Mito Juan..... 37

2.1.3.5 TERCIARIO..... 38
2.1.3.5.1 PALEOCENO-EOCENO MEDIO..... 38
Formación Guasare..... 38
Formación Barco..... 39
Formación Marcelina..... 40
Formación Trujillo..... 41
Formación Mirador..... 42
Formación Misoa..... 43

2.1.3.5.2 EOCENO TARDÍO-PLIO-PLEISTOCENO..... 44
Formación La Sierra..... 44
Grupo El Fausto..... 45
Formación Los Ranchos..... 45
Formación La Villa..... 46
Formación El Milagro..... 46

2.2 MARCO TEÓRICO
2.2.1 FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES REMOTOS..... 48
2.2.1.1 Historia de los Sensores Remotos..... 48
2.2.1.2 Landsat Multispectral Scanner System (MSS)..... 52
2.2.1.3 Otros Sistemas Satelitales de Sensores Remot..... 55

2.2.2 CONCEPTOS GENERALES..... 55
2.2.2.1 Teledetección..... 55
2.2.2.2 Imágenes de satélite 56
2.2.2.3 Representación digital de imágenes..... 57
2.2.2.4 Percepción remota..... 59
2.2.2.5 Procesamiento Digital..... 61
2.2.3 CARACTERISTICAS DE LOS SENSORES REMOTOS..... 62
2.2.3.1 Fuentes de energía de percepción remota..... 63
2.2.3.2 Interacción de la energía con la atmosfera terrestre…….. 64
Dispersión……..……. 65
Refracción…….. 65
Absorción…… 65
Ventana atmosférica…… 66
2.2.3.3 Interacción de la Energía Incidente y los elementos de la superficie de la Tierra……... 66
2.2.3.4 Interacción radiación y superficie…… 67
Respuesta espectral…… 68

Reflectividad……. 69
Repuesta de la vegetación…….……. 69
Repuesta del suelo…….……. 69
Repuesta del agua…… 69
2.2.3.5 Reflactancia Espectral…….. 69
2.2.4 SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG)…….. 72
2.2.4.1 ENVI® 4.2…….. 72
2.2.4.2 ArcGIS® 9.1……... 73
ArcMap…… 74
2.2.4.3 ERDAS IMAGINE® 8.5…… 74

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA
3.1 Metodología en el Manejo de las Imágenes Landsat 7 ETM..... 76
3.1.1 Corrección de Radianza..... 77
3.1.2 Fusión de Bandas..... 79
3.1.3 Conversión a Formato BIL..... 80
3.1.4 Corrección Atmosférica (FLAASH)..... 81
3.1.5 Corrección de la Fracción Mínima de Ruido (MNF)..... 85
3.1.6 Creación y Georeferenciación del Archivo Shapefile en ArcGIS®……..... 87
3.1.7 Construcción de la Máscara..... 90
3.1.8 Corrección de la Fracción mínima de ruido..... 92
3.1.9 Índice de Pureza de Píxel (PPI)..... 95
3.1.10 Visualizador N Dimensional..... 97
3.1.11 Spectral Angle Mapper..... 103
3.1.12 Clasificación No Supervisada..... 107
3.1.13 Clasificación Supervisada..... 110
3.1.14 Operaciones entre bandas..... 115

3.1.15 Índice de vegetación..... 116
3.1.16 Análisis de componentes Principales..... 117
3.1.17 Modelo de Elevación Digital (MED)..... 119

CAPITULO IV

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS IMÁGENES
4.1 Producto de la corrección de la Fracción Mínima de Ruido MNF..... 122
4.2 Resultado del índice de pureza de pixel PPI..... 123
4.3 Combinación de Bandas..... 125
4.4 Operaciones entre bandas..... 136
4.5 Rasgos Topográficos..... 143
4.6 Hidrografía..... 145
4.7 Delimitación de contactos y reconocimiento de las secuencias mesozoica y paleozoica presenteS en la zona de estudio MEDIANTE LAS FIRMAS ESPECTRALES……. 147
4.8 Análisis Espectral de las unidades sin diferenciar y las unidades granitoides presentes en la zona…… 152
4.9 Análisis espectral de las unidades paleozoicas de presentes en la zona…….. 154
4.10 Comparación entre el trabajo propuesto y los mapas geológicos anteriores de la zona……...…… 156
4.11 Geología estructural de la zona.……. 161

CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES..... 164
5.2 RECOMENDACIONES..... 166

BIBLIOGRAFIA..... 168
ANEXOS…… 174

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

PAGINAS

CAPITULO I

Figura 1.1. Zona de estudio Alto Guasare, Edo. Zulia, Venezuela..... 2

Figura 1.2. Zona en estudio. Modificado de la Hoja 5647 ALTO GUASARE, VENEZUELA (1969) Escala 1:100.000, del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar…… 3

CAPITULO II

Figura 2.1. Mapa fisiográfico de la Sierra de Perijá a escala 1:50.000……..... 12

Figura 2.2. Mapa tectónico simplificado de la cuenca de Maracaibo…….. 13

Figura 2.3. Marco tectónico de la Sierra de Perijá mostrando la zona triangular.. 16

Figura 2.4. Columna cronoestratigráfica del Paleozoico en Perijá…… 19

Figura 2.5. Carta cronoestratigráfica del Jurásico en Perijá. ……..... 28

Figura 2.6. Columna cronestratigráfica del Cretácico en Perijá. …….. 29

Figura 2.7. Columna estratigráfica del Grupo Cogollo. 31

Figura 2.8. Paleogeografía para el Aptiense en Venezuela. ……. 33

Figura 2.9. Columna estratigráfica de la Formación La Luna.……..... 36

Figura 2.10. Mapa Paleogeográfico durante el Eoceno Medio, parte media….. 43

Figura 2.11. Sistemas de Teledetección..... 48

Figura 2.12. Sensores remotos pasivos..... 50

Figura 2.13. Sensores remotos activos……... 51

Figura 2.14. Imagen del Satélite landsat 7 en órbita…..... 52

Tabla 1. Características del sensor LANDSAT 7……. 53

Tabla 2. Características espectrales y espaciales de las bandas LANDSAT 7….. 53

Figura 2.15. Regiones del espectro electromagnético para las bandas del

LANDSAT 7……. 54
Figura 2.16. Imagen Satelital de Paris mostrando la calidad de la imagen satelital……..... 57
Figura 2.17. Componentes de una imagen digital…….… 59
Figura 2.18. Proceso de la percepción remota……..... 60
Figura 2.19. Espectro electromagnético……..... 62
Figura 2.20. Ventanas atmosféricas……..... 63
Figura 2.21. La energía incidente, A absorción, R reflexión, T transmisión……. 66
Figura 2.22. Firmas espectrales de distintas cubiertas terrestres…..... 67
Figura 2.23. Firma espectral para distintos tipos de cubiertas..... 68
Figura 2.24. Firma espectral para distintos tipos de cubiertas……..... 71

CAPITULO III

Figura 3.1. Modulo de la calibración LANDSAT TM..... 78
Figura 3.2. Banda 10 LANDSAT ETM debidamente corregida, las correcciones no muestran muchos cambios ya que estos son perceptibles a los comandos de ENVI..... 78
Figura 3.3. Comando para realizar el Layer Stacking..... 79
Figura 3.4. La Fusión (layer stacking) permite la combinación de las bandas, y obtener un solo archivo. Combinación: R G B 30, 50 y 40..... 80
Figura 3.5. Comando de transformación de BSQ a BIL..... 81
Figura 3.6. Comando para la calibración FLAASH……... 82
3.7. Comando para la corrección atmosférica FLAASH……... 83
Figura 3.8. Modulo de la corrección FLAASH, mostrando la inserción de los valores encontrados en la metadata…… 84
Figura 3.9. Parte de la calibración FLAASH..... 84
Figura 3.10. Resultado de la corrección FLAASH, se obtiene una única imagen sin efectos de distorsión atmosférica……. 85
Figura 3.11. Comando para la conversión de TIFF a IMG..... 86

Figura 3.12. Comandos para fusionar las bandas de IMG en ERDAS..... 87
Figura 3.13. Creación del Archivo Shape en ArcGIS® 9.1……... 88
Figura 3.14. Georeferenciación de la máscara de nubes..... 89
Figura 3.15. Edición de los polígonos del shapefile para hacer la mascara de nubes…….. 90
Figura 3.16. Construcción de la máscara a ENVI..... 91
Figura 3.17. Transformación de la máscara de las nubes y sombras, se aprecia el contorno del polígono sobre las nubes……... 91
Figura 3.18. Comando de la corrección MNF..... 92
Figura 3.19. Selección del área de interés con Subset by image, se aprecia el rectángulo del área de interés……. 93
Figura 3.20. Selección de bandas, ruta y nombre de salida..... 93
Figura 3.21. Gráfica de los MNF Eingevalues, mostrando los autovalores decrecientes con la varianza……... 94
Figura 3.22. Resultado obtenido en la imagen aplicando el MNF, a la izquierda con la combinación de bandas RGB 135, y a la derecha la combinación RGB 754, se resaltan contrastes de tonalidades indicando variabilidad de litologías… 95
Figura 3.23. Comando para el índice de pureza de pixel..... 96
Figura 3.24. Grafica de progreso de PPI..... 96
Figura 3.25. Resultado del procedimiento PPI. Muestra agrupados los pixeles espectralmente puros encontrados en la imagen……..... 97
Figura 3.26 Comandos para la conversión de PPI a ROI..... 98
Figura 3.27. Ventana que muestra la cantidad de píxeles para cada banda..... 99
Figura 3.28 Modulo de conversión de PPI a ROI..... 100
Figura 3.29. Procedimiento para la conversión de los PPI a ROI..... 101
Figura 3.30. Salida del Archivo ROI..... 101
Figura 3.31. Modulo para exportar ROI a n-D Visualizer..... 103
Figura 3.32. Ventanas del proceso de n-D Visualizer. A la izquierda se observa la distribución de los pixeles en la imagen……..... 103
Figura 3.33. Modulo para aplicación algoritmo SAM..... 104

Figura 3.34 Proceso de construcción del SAM..... 105
Figura 3.35. Parámetros de salida del proceso..... 106
Figura 3.36. Resultado del Spectral Angle Mapper, mostrando las clases donde el ángulo de separación espectral es inferior al valor predefinido..... 107
Figura 3.37. Conversión de FLAASH a IMG..... 108
Figura 3.38. Modulo de Layer Stacking, Paquete ERDAS IMAGINE ® 8.5..... 109
Figura 3.39. Salida del Layer Stacking en IMG con ERDAS IMAGINE ® 8.5... 110
Figura 3.40. Clasificación no supervisada..... 111
Figura 3.41. Imagen y clases obtenidas con la clasificación no supervisada..... 112
Figura 3.42. Aplicación de las firmas espectrales para la clasificación supervisada..... 113
Figura 3.43. Resultado de la clasificación supervisada..... 114
Figura 3.44. Resultado de la clasificación supervisada, muestra las clases asignadas por color en la imagen, indicando cambios espectrales..... 114
Figura 3.45. Comandos para realizar el cociente de bandas..... 115
Figura 3.46. Salida del cociente de banda 3/1..... 116
Figura 3.47. Comandos para aplicar índice de vegetación en ERDAS IMAGINE..... 117
Figura 3.48 Modulo para Análisis de Componentes Principales..... 118
Figura 3.49. Resultado del Análisis de los componentes principales..... 119
Figura 3.50. Comando para la realización del modelo de elevación digital en ENVI..... 120
Figura 3.51. Modelo de elevación a escala vertical exagerada 1:20, con dirección N20ªE..... 120
Figura 3.52. Modelo de elevación a escala vertical exagerada 1:20, con dirección N20ªE..... 121
Figura 3.53. Modelo de elevación, vista de perfil lateral Este-Oeste escala 1:15..... 121
Figura 3.54. Modelo de elevación, vista de perfil lateral modo WIRE Este-Oeste escala 1:15..... 121

CAPITULO IV

Figura 4.1 Resultado de la corrección MNF……. 122
Figura 4.2. Imagen con la corrección PPI…….. 123
Figura 4.3. Muestra la combinación de MNF con SAM…….. 124
Tabla 4.1 de combinación de bandas……. 125
Figura 4.4. Combinación RGB 135……..……. 127
Figura 4.5. Combinación RGB 354.……....……. 128
Figura 4.6. Combinación RGB 357……..……. 129
Figura 4.7. Combinación RGB 432……..……. 130
Figura 4.8. Combinación RGB 453…….….. 131
Figura 4.9. Combinación RGB 534……..…. 132
Figura 4.10. Combinación RGB 543……...…….. 133
Figura 4.11. Combinación RGB 752…….…… 134
Figura 4.12. Combinación RGB 754……...……...……... 135
Tabla 4.2 Combinación de cociente de bandas……. 136
Figura 4.13 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (5/3 4/7 2/4)…. 137
Figura 4.14 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/5 5/7 7/4)…. 138
Figura 4.15 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (7/1 5 7)…….. 139
Figura 4.16 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/1 5/4 5/7)…. 140
Figura 4.17 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (5/1 4/7 2/4)…. 141
Figura 4.18 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (4/3 5/7 3/2)…. 142
Figura 4.19 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/5 4/3 7/4)….. 143
Figura 4.20 Croquis topográfico de la zona de estudio que muestra la unidad topográfica en el área de Alto Guasare…….. 144
Figura 4.21 Croquis topográfico de la zona de estudio que muestra la evidencia de corrimiento en la zona. ……. 145
Figura 4.22 Drenaje principal de la zona de Estudio. Escala 1:250.000……... 146
Figura 4.23 Drenaje principal de la zona de Estudio…..…….. 146
Figura 4.24 Comparación entre la Formación Perijá y paleozoico sin

diferenciar…….. 148
Figura 4.25 Contacto entre el paleozoico sin diferenciar y la Formación Río Palmar. …….. 149
Figura 4.26 Contacto entre el Grupo Río Cachiri y la formación Río Negro…. 150
Figura 4.27 Contacto entre la Formación Rio Negro y el Grupo Cogollo…… 151
Figura 4.28 Se observa el contacto entre Grupo Cogollo y la Formación La Quinta……..……... 152
Figura 4.29 Análisis Espectral comparativo entre las unidades devónicas…….. 153
Figura 4.30 Análisis espectral de los cuerpos granitoides denominados Granito de Lajas…….....…. 154
Figura 4.31 Firmas espectrales para unidades del paleozoico…….. 155
Figura 4.32 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000…… 157
Figura 4.33 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000…..……... 158
Figura 4.34 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000.……... 158
Figura 4.35 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:50.000...……... 159
Figura 4.36 Firmas espectrales de la zona de Estudio…..…….…… 160
Figura 4.37 Sistemas de fallas…….. 162
Figura 4.38 Esfuerzos principales……. 163
Figura 4.39 Fases de formación de un corrimiento……..... 163

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCION

La utilización de imágenes satelitales para estudios geológicos surge de la necesidad de buscar nuevas herramientas que permitan llegar a todas aquellas áreas poco exploradas, por ser de difícil acceso, por considerarse peligrosas para la realización de estudios in situ debido a sus condiciones, o por problemas de tipo bélicos donde existe riesgo humano por la presencia de grupos armados, concentración de negocios ilegales como el narcotráfico, entre otros.

La zona de estudio correspondiente a este Trabajo Especial de Grado se encuentra ubicada al noroeste del Estado. Zulia, limitando hacia el oeste con Republica de Colombia, zona en la cual existen todos los inconvenientes antes mencionados, por esta razón las imágenes multiespectrales nos dan la oportunidad de llevar a cabo la actualización de mapas geológicos en zonas de alto riesgo como lo es Alto Guasare.

La actualización de la cartografía geológica del mapa Alto Guasare se considera de suma importancia, ya que se incrementa la precisión en la ubicación de las formaciones y estructuras geológicas de la zona, generando una fuente de información más detallada para estudios geológicos, geomineros (interés económico por la existencia de yacimientos de carbón) y geofísicos a futuro, entre otros.

1.2 LOCALIZACION DE AREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza hacia la parte noroccidental de la Sierra de Perijá y comprende las siguientes coordenadas: longitud (72º30’ - 73º00’) y latitud (10°20’-10°40’), entre el río Guasare y el río de Lajas, y esta registrada como la hoja 5647 en el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB), tal como se muestran las figuras (1.1 y 1.2)

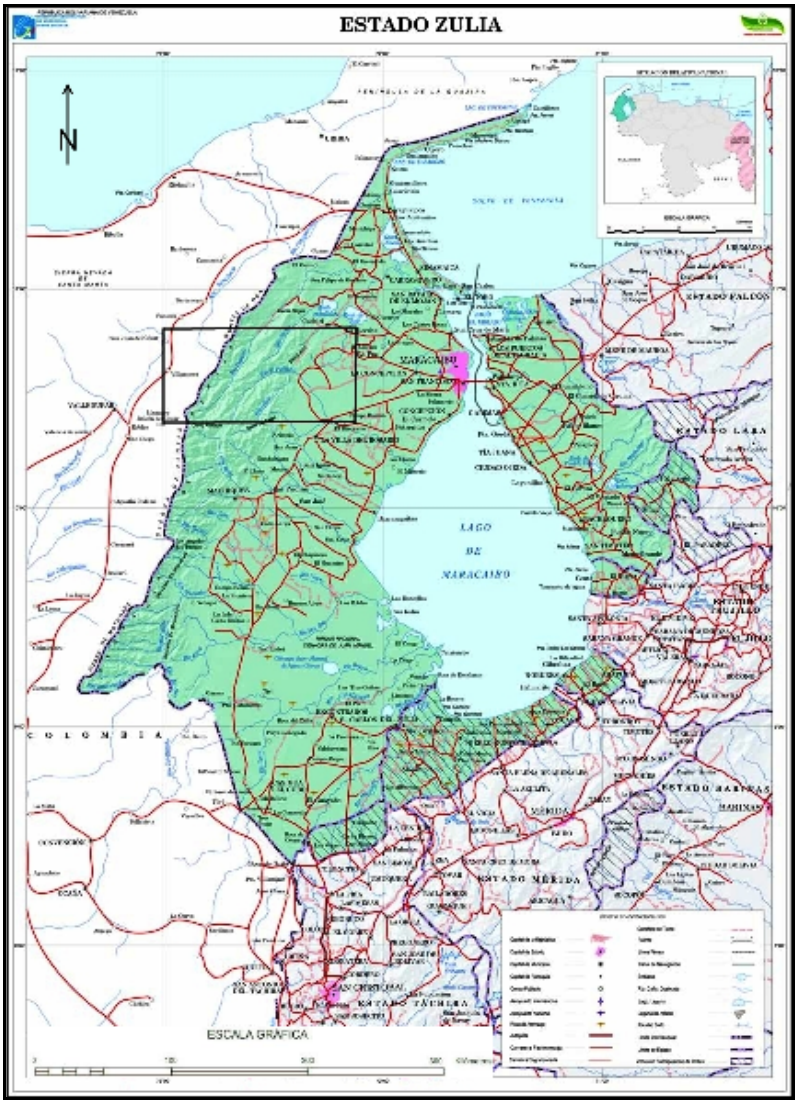


Figura 1.1. Zona de estudio Alto Guasare, Edo. Zulia, Venezuela.

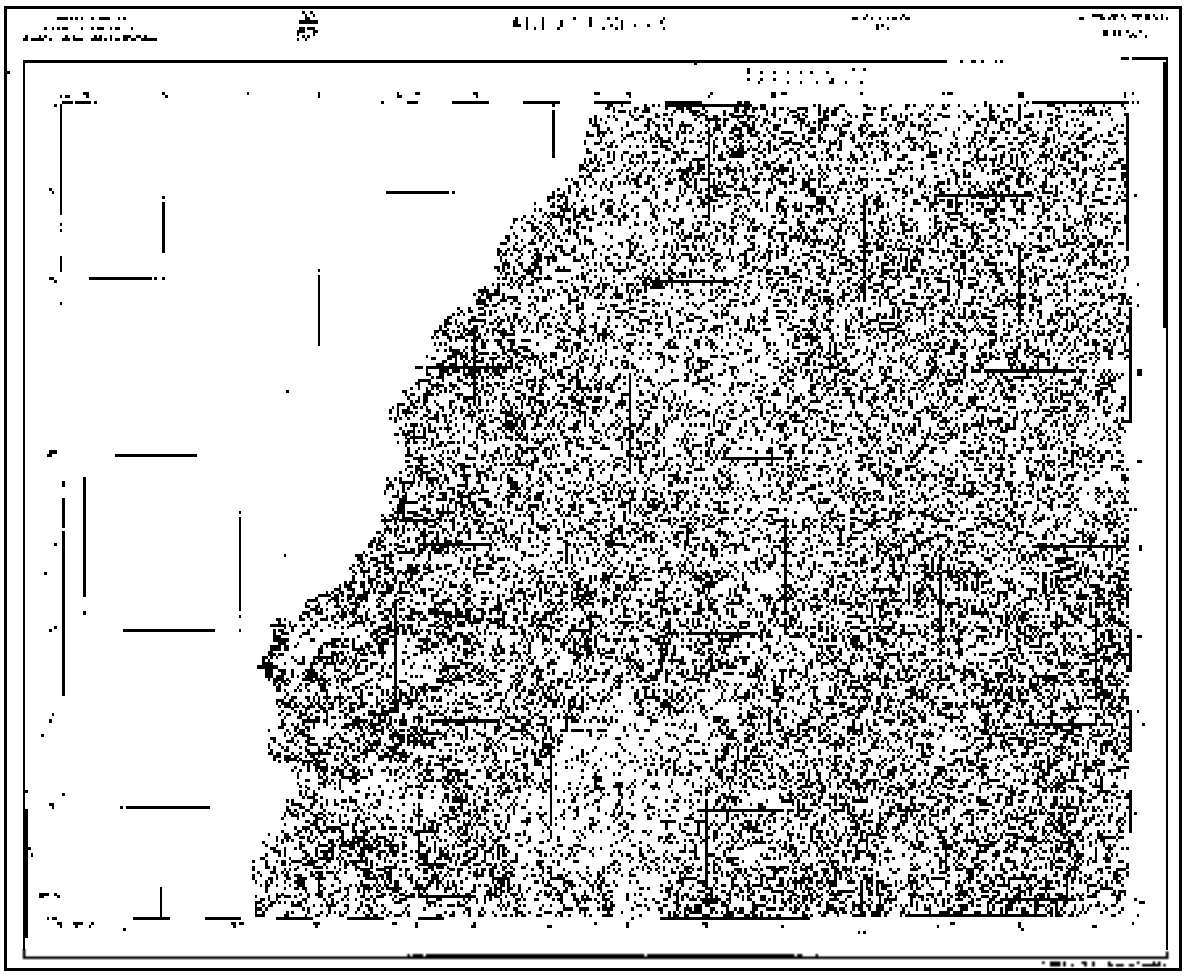


Figura 1-2. Mapa topográfico de la zona de estudio. Modificado de la Hoja 5647 ALTOGUASARE, VENEZUELA (1969) Escala 1:100.000, del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar

1.3 ALCANCES

Los sensores remotos han ganado interés como una herramienta potencial en el manejo de imágenes satelitales para la interpretación geológica, estas permiten a los geólogos identificar con gran precisión el relieve, geomorfología, estructuras, contactos y litologías existentes de la zona donde se realiza el estudio, sin tener que hacer la verificación en campo. Las interpretaciones son efectuadas con rapidez en

tiempo real y en superficies más extensas que la forma tradicional de hacer los levantamientos geológicos y con un costo menor, resultando beneficioso en lugares con acceso restringido por problemas de logística o de seguridad.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Crear un mapa geológico actualizado de Alto Guasare a escala 1:100.000, a través de la integración geológica entre los datos obtenidos de las imágenes satelitales (Landsat 7 ETM), y los datos recopilados en la bibliografía y trabajos previos consultados, donde quede evidenciada la correspondencia de estas imágenes multiespectrales con la geología superficial de la zona de estudio descrita por otros autores anteriormente.

1.5 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el procesamiento de la imagen satelital Landsat 7 ETM P008R053 y con ello generar una metodología detallada del procesamiento de las imágenes satelitales.

- Determinar lineaciones y estructuras a través de firmas espectrales de la imagen satelital Landsat 7 ETM empleada.
- Determinar unidades espectrales y realizar una estimación de la litología a través de las diferentes combinaciones y cocientes de bandas de la imagen Landsat 7 ETM empleada.

- Realizar la clasificación supervisada y no supervisada a la imagen Landsat 7 ETM empleada, para realzar características geológicas en la zona.

- Revisar los mapas geológicos existentes de la zona, para comparar con la información interpretada en la imagen Landsat 7 ETM empleada.

- Generar un mapa geológico digitalizado a escala 1:100.000 de la Sierra de Perijá en la zona de Alto Guasare, bajo la plataforma ArcGIS.

1.6 METODOLOGIA GENERAL

1.6.1 Etapa de investigación bibliográfica:

Consistió en la revisión y recopilación bibliográfica de textos, trabajos previos, material cartográfico y fotografías aéreas relacionadas con la zona de estudio, almacenadas en las bibliotecas Virgil Winkler de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, Ministerio de Energía y Petróleo y en la sede del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), en las cuales se consiguieron trabajos especiales de grado, artículos publicados en revistas y congresos geológicos nacionales e internacionales, hojas topográficas a escala 1:25.000 y 1:100.000 del (IGVSB) y hojas geológicas 1:100.000 del instituto nacional de geología y minas (INGEOMIN).

1.6.2 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 incluyó el empleo y manejo de los programas de computación: ENVI® 4.2, ERDAS IMAGINE® 8.5 y ArcGIS® 9.1.

1.6.3 Etapa de análisis y discusión de resultados:

Esta etapa consistió en la integración de todos los datos obtenidos del procesamiento de las imágenes y los trabajos previos de la zona de estudio, donde se analizaron por medio de firmas espectrales las imágenes Landsat 7, interpretaciones de las imágenes satelitales, mapas anteriores y revisión de la recopilación bibliográfica. Todo esto dio como resultado la actualización del mapa geológico de Alto Guasare.

1.7 ANTECEDENTES

Briceño Méndez (1876), publica ante el Congreso Nacional, un informe técnico acerca de la exploración realizada en la región de Tulé. Este destacado científico ubica, estudia y evalua por primera vez y de forma precisa el gigantesco volumen de riqueza mineral (carbón) y petrolera (asfalto, betún y gas), que se encuentran en el occidente del estado Zulia.

Garner (1926), menciona un paquete de carbones, en la localidad de las minas de carbón de Rosa, al oeste de los distritos Mara y Páez, al que denominó Paquetes de Carbón La Rosa. Lo describe como capas bastante endurecidas constituidas por areniscas cuarzosas, masivas de color marrón con lutitas de color marrón a negro y capas gruesas de carbón bituminoso. Le asigna edad Eoceno.

Hedberg y Sass (1937), proponen una edad Eoceno inferior a medio a la Formación Paso Diablo y que sus afloramientos se encuentran limitados por la sierra de Perijá y el levantamiento Totumo –Iniciarte del distrito Mara. Estratigraficamente la colocan por encima de la Formación Guasare y por debajo de la Formación Mostrencos, en ambos casos en contacto concordante gradual. Reportan que la Formación Paso Diablo tiene un espesor de 1000 m, medidos en la sección tipo de caño El paso del Diablo tributario del río Guasare en la parte norte del distrito Mara.

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, rocas del basamento ígneo-metamórfico, hasta rocas que conforman la cobertura sedimentaria.

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 presenta 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 dicha interdigitación.

Miller y San Juan (1963), realizan una revisión de la estratigrafía de la cuenca de Maracaibo, basando su trabajo en 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.

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, donde se presentan descripciones e interpretaciones que abarcan aspectos de la estratigrafía, sedimentología y estructurales.

Maze (1984). Sugiere que los bloques de la Sierra de Perijá y de los Andes Venezolanos, presentan una rotación diferencial, y a su vez propone que éste bloque es un terreno alóctono emplazado durante el Jurásico, producto de un marco tectónico activo (subducción de la placa pacífica) al oeste del continente suramericano, así como también, relaciona a este bloque con un "rifting" asociado a la creación del Mar Caribe.

Kellogg (1984). Propone un modelo de evolución tectónica, donde la Sierra de Perijá es el resultado de cuatro fases de deformación ubicadas temporalmente en el Cenozoico; la primera fase en el Eoceno Temprano, la segunda fase Eoceno Medio, la tercera fase en el Oligoceno y la cuarta fase que determina la tectónica actual, la cual se ubica desde el Mioceno hasta el Presente. Destaca el autor que las estructuras que determinan el marco estructural de la Sierra de Perijá, vienen dadas por fallas inversas de bajo ángulo de 7º a 20º aproximadamente.

Audemard (1991). A partir de la descripción de líneas sísmicas, divide a la Sierra de Perijá en varios sectores. El sector central, donde se ubica la zona de estudio, está constituido por estructuras de vergencia este y oeste. Las de vergencia oeste están caracterizadas por las fallas de Cerrejón y Cuiba, siendo interpretadas como la inversión de unos semi grabens Jurásicos y las de vergencia este se desarrollan a partir de la zona oriental de la Falla de Cuiba. Asimismo, propone que durante el Mesozoico y Cenozoico ocurrieron cinco (5) eventos mayores en la evolución

tectónica del oeste de Venezuela. En particular en el Neógeno, cuando se generaron estructuras de retrocorrimiento (situación que generó zonas triangulares a lo largo de los erógenos de Perijá y los Andes Venezolanos), indica que un retrocorrimiento se desarrolló dentro de las lutitas del Formación Colon.

Testamark *et al*. (1994). Define los estilos estructurales de la Sierra de Perijá, a partir de la interpretación de líneas sísmicas, imágenes de radar y mapas geológicos. Su estudio coincide con los trabajos que indican la existencia una zona triangular. Explica que las fallas inversas con rumbo NE en la zona, provienen de fallas normales reactivadas de edad Jurásico y Cretácico Inferior.

Pernaud *et al*. (1995). En su trabajo resume la estratigráfica del Oeste de Venezuela, incluyendo a la Sierra de Perijá, en la cual describe seis súper secuencias delimitadas por discordancias reconocibles en sísmica.

Araujo (1997). A partir de los procesos exploratorios petroleros del frente de montaña de la Sierra de Perijá, determina un nivel de complejidad mayor en las interpretaciones estructurales de la zona, debido a que en las observaciones realizadas se obtuvo tres (3) repeticiones de la secuencia Jurásico y Cretácico Temprano.

De Toni *et al.* (1998). Postula que evolución estructural de la sierra de Perijá tiene como premisa la reactivación de fallas normales preexistentes, las cuales están asociadas con los depósitos tipo "rifting" de edad Jurásico. También coincide con otros autores en la presencia de retrocabalgamientos y zonas triangulares.

Duerto *et al*. (1998), realizan una discusión de las zonas triangulares ubicadas en la zona occidental de Venezuela, centrando 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 observan una verticalización de las estructuras debido a un patrón estructural, que se atribuye a un corrimiento en el subsuelo denominado "Corrimiento de los Motilones".

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

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

2.1.1 GENERALIDADES

La Sierra de Perijá tiene un rumbo N-NE y define el límite occidental de la región zuliana quedando separada de la península de la Guajira por la Falla de Oca. Esta Cordillera tiene un relieve abrupto y la cubre una densa vegetación que la hace casi impenetrable. Su topografía se eleva como una pared vertical desde la llanura del lago de Maracaibo, siendo constituida por complejas formaciones del precámbrico hasta el reciente, compuesta por rocas ígneas, ígneas-metamórficas y sedimentarias (Figura 2.1).

Este sistema montañoso tiene estructuras geológicas dominadas por fallas que dan a su relieve un carácter topográfico abrupto. Los bloques de montañas que se han formado (grabens y horts), se elevan bruscamente sobre las llanuras, de tal manera que las laderas orientales son extremadamente empinadas. (Mendoza, 2005).

El Tetaría es el pico más alto de la Sierra de Perijá con 3.750 m.s.n.m. Al norte de la depresión de Perijá se tiene la Serranía de Valledupar de Colombia, en la que se encuentran las cabeceras de los ríos venezolanos Negro, Apón y Guasare. Aquí el pico más elevado es el Cerro Pintado con 3.600 m.s.n.m. Los Montes de Oca se encuentran al oeste y al norte del Río Guasare (Mendoza, 2005).

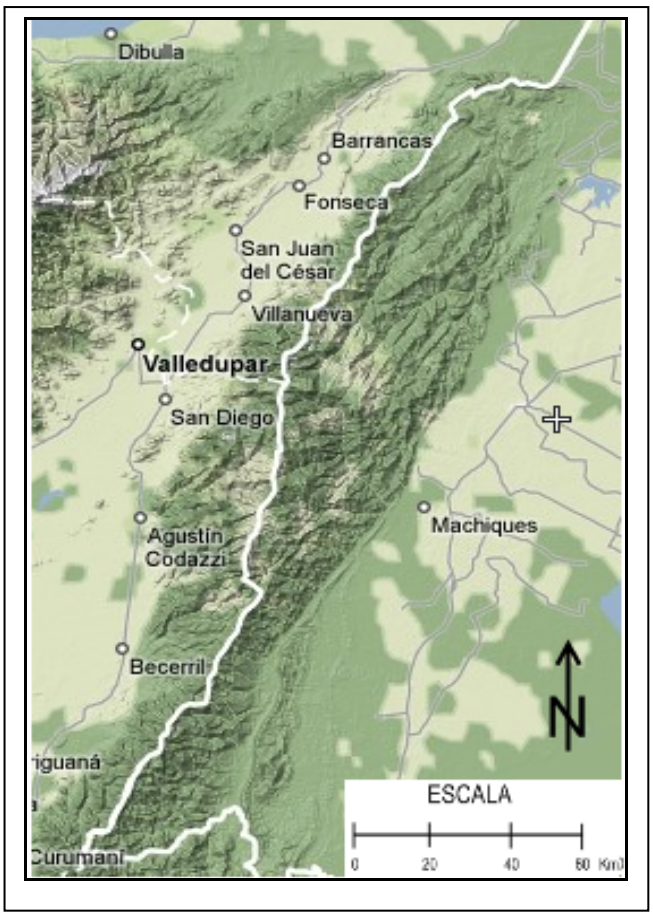


Figura 2.1. Mapa fisiográfico de la Sierra de Perijá a escala 1:50.000donde se destacan filas y lineamientos estructurales con un rumbo aproximado de 50º-NE. Tomado de www.wikimapia.com

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).

Litológicamente según Bellizzia y Pimentel (1995) el basamento de la Sierra de Perijá está constituido por gneises biotítico-cloríticos, anfibolitas y cuarcitas, llamado Asociación Perijá. Sobre este basamento se encuentra una espesa secuencia de lutitas

carbonáceas y silíceas, areniscas, limolitas, conglomerados y calizas carbonáceas; en la parte superior del grupo, se encuentran capas rojas con niveles fosilíferos; esta secuencia ha sido asignada al Grupo Cachirí.

2.1.1.1 Tectónica Regional

La Tectónica regional de la Sierra de Perijá se localiza en un bloque en un bloque triangular al NO de Sur América, el cual tiene una deformación activa. Esta zona triangular está limitada al oeste por el sistema de falla Santa Marta-Bucaramanga, que presenta un movimiento transcurrente sinestral, hacia el este por el sistema de fallas de Boconó con un movimiento transcurrente destral, y hacia el norte por el prisma de deformación de sur del Caribe (Mann y Burke, 1984, en Lugo y Mann, 1995).

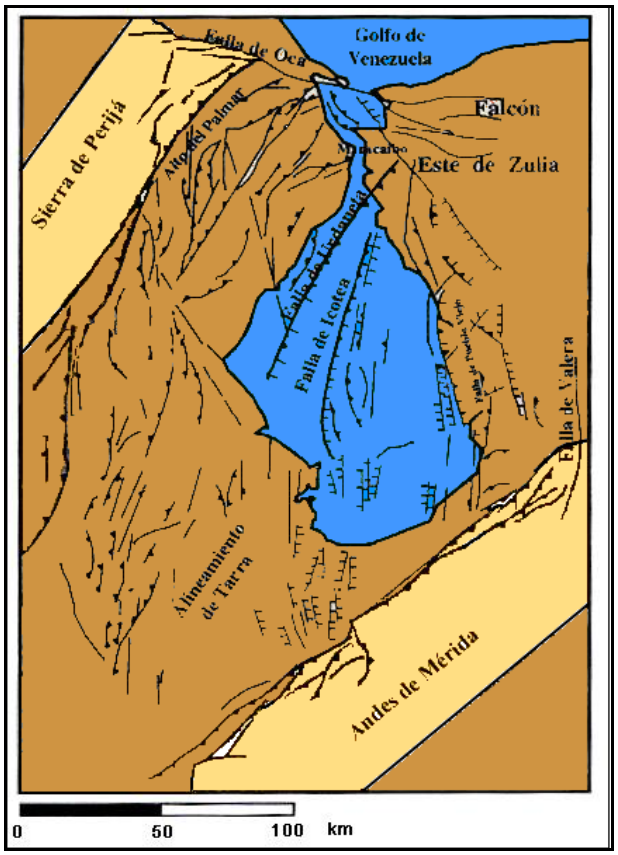


Figura 2.2. Mapa tectónico simplificado de la cuenca de Maracaibo. Modificado de González (1998).

En el flanco oriental de la Sierra de Perijá, se encuentra como elemento más sobresaliente, el monoclinal de Perijá, el cual se muestra en los mapas geológicos 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 40º. Este buzamiento promedio varía hacia el este, donde presenta un incremento, alcanzando valores entre los 50 y 70º 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).

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 que 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.

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 donde se desarrolla una cuenca flexural, la cual es la expresión morfológica del lago de Maracaibo y las estructuras de mayor importancia son la Falla de Icotea y la Falla de Urdaneta (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.

Según Roure *et al*. (1997), la SP 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 sinestral 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 terminando progresivamente a medida que se interna en el depocentro (foredeep) andino 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.

El rasgo estructural más resaltante de la sierra de Perijá es la Falla de Perijá que comienza al norte en una zona compleja estructuralmente, entre los ríos Lajas y Palmar, cruza la fila Maestra en la depresión de los ríos Maraca en Colombia y Tocuco en Venezuela y termina contra el alineamiento de la falla de Arena Blanca en Colombia (Del Castillo, 1997).

Según Ostos y Yoris (1997) la Sierra de Perijá se encuentra dentro de las cadenas montañosas, del Sistema de Montañas del Caribe, junto con las Sierras de San Luís y Baragua, y la Cordillera de la Costa. Los rasgos fisiográficos de esta zona se encuentran íntimamente asociados a la evolución del margen norte de la placa Suramericana, y su interacción con la placa Caribe, desde el Eoceno hasta el presente.

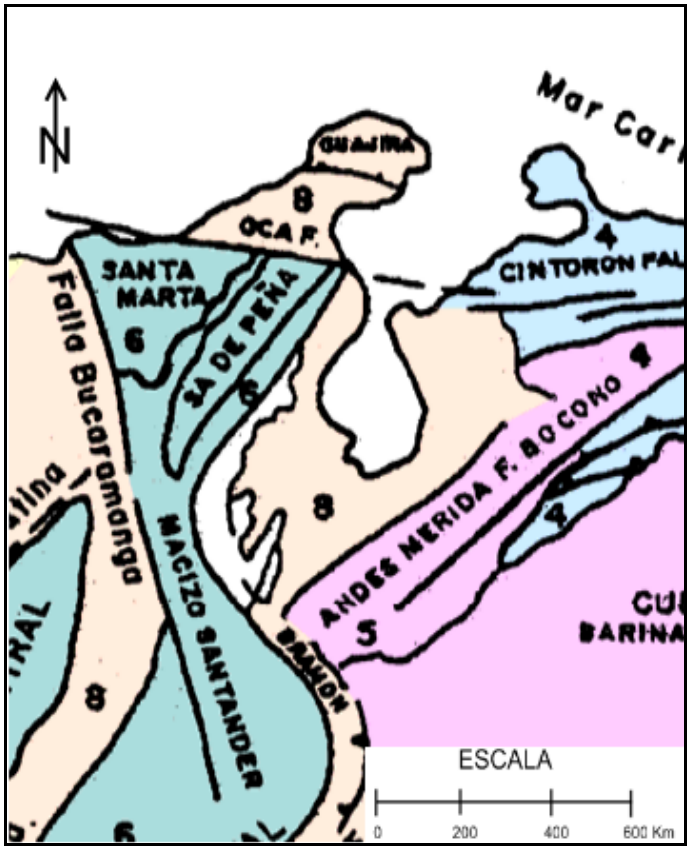


Figura 2.3. Marco tectónico de la Sierra de Perijá mostrando la zona triangular. Tomado y modificado de Mendoza, (2005)

2.1.2 ESTRATIGRAFIA REGIONAL

La sierra de Perijá muestra un registro estratigráfico que inicia en el Precámbrico a Paleozoico hasta el reciente. Se presenta una descripción de la estratigrafía de Perijá, tomando en cuenta las características de las rocas de la zona tales como la litología, espesores, contactos, entre otros.

Parnaud *et al*., (1995) dividen el occidente de Venezuela en seis súper secuencias, 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 súper secuencia **A** fue depositada durante un episodio de apertura de corteza del

Jurásico ("rifting"). La súper secuencia **B** corresponde al margen pasivo subsiguiente durante el Cretácico Temprano al Tardío. La súper secuencia **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 súper secuencia **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 súper secuencias **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.

2.1.2.1 PRECÁMBRICO TARDÍO

Formación Perijá

La Formación aflora en la región del río Cachirí, en el caño Grande, en los caños del oeste y del sur y en el caño Aburrido, afluente del río Socuy, conformada litológicamente por cuarcitas duras cortadas por diques y vetas de cuarzo blanco, junto con micaesquitos y esquistos gneisoides intrusionados por granito (Liddle *et al,* 1943). La Formación Perijá constituye el basamento de la sierra, posiblemente en relación de discordancia, e infrayace a la Formación Caño Grande del Grupo Río Cachirí, en contacto de falla (Hea y Whitman, 1960). Según Bowen (1972), la unidad infrayace a los sedimentos no metamorfizados del Grupo Río Cachirí del Devónico, en tres localidades en contacto de falla; todas son fallas normales de ángulo alto (70°), quien también señala contactos de falla en el tope de la formación con areniscas de la Formación Río Negro.

(Hea y Whitman, 1960). Amplían la descripción de la unidad diciendo que está compuesta por esquistos biotíticos, muscoíticos, tremoliticos, cuarzo feldespático y

metacuarcitas cloriticas, cortadas por pequeños diques apolíticos de color rojo naranja y vetas de cuarzo lechoso, señalando un grado de metamorfismo correspondiente a la facies de los esquistos verdes.

La formación no es lo suficientemente conocida, como para precisar su génesis. Tiene el aspecto típico de metamorfismo aureolar en una sucesión de areniscas y lutitas, separables del Devónico más bien por el grado que por el tipo de alteración. Las evidencias de campo indican la derivación de estas rocas metamórficas, de una sucesión sedimentaria clástica compuesta de areniscas arcósicas gruesamente estratificadas a macizas, que gradan y están separadas por estratos más delgados de lutitas; no se observan verdaderas características sedimentarias, (CIEN, 1997).

2.1.2.2 PALEOZOICO

El Paleozoico Medio (Devónico + Mississippiano) no ha sido localizado en ninguna región andina, ni en El Baúl, ni en el subsuelo del Lago de Maracaibo y sólo aflora en la sierra de Perijá, en su flanco oriental donde Liddle (1.943 y 1946) definió la Serie Río Cachiri y la caracterizó por la abundancia de fósiles indicativos de ambientes sedimentarios platafórmales poco profundos, sin ningún vestigio de metamorfismo.

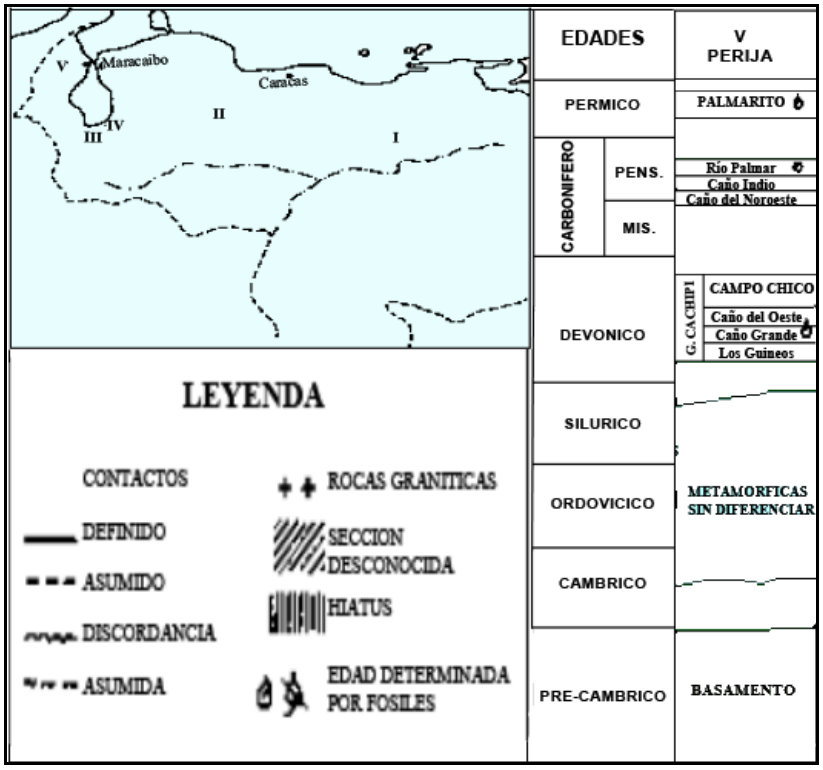


Figura 2.4. Columna cronoestratigráfica del Paleozoico en Perijá (Tomado y modificado de González de Juana et al., 1980)

Grupo Río Cachirí

La localidad tipo se encuentra en las cabeceras del río Cachirí, unos 89 km al oeste de Maracaibo, distrito Maracaibo, estado Zulia (LEV 3 edición). La unidad se extiende desde las cabeceras del río Cachirí, ocupando una faja a lo largo del flanco oriental de la sierra de Perijá, continuando hacia el sur, desde el extremo norte de la sierra en el distrito Páez, hasta los distritos Mara, Maracaibo y Perijá.

Este grupo se conoce como una gruesa secuencia sedimentaría de aproximadamente 2500 m. Liddle *et al.* (1943), describe el grupo compuesto por tres formaciones: Formación Caño Grande, Formación Caño del Oeste y Formación Campo Chico de más antigua a más reciente, respectivamente. Posteriormente, Bowen (1972), define una cuarta formación a la cual denomina Formación Los Guineos en la base del grupo.

Este Grupo se ha considerado como una regresión sucesiva de ambientes que varían de marino a salobre. Sin embargo, Bowen (1972) dice que los sedimentos Devónicos constituyeron en una época, una cobertura transgresiva continua a través de Perijá norte-central y que en la base del grupo hay presencia de diques. En la parte media aparecen detritos volcánicos y en la parte superior se observan dasitas y tobas rioliticas. E1 grupo consiste principalmente de lutitas color negro, gris y rojo, areniscas grises micáceas, areniscas cuarcíticas y calizas de color rojo, gris azulado y negruzco (Mendoza, 2005). El grupo suprayace en contacto discordante y posiblemente, de falla, las rocas metamórficas de la Serie Perijá, e infrayace discordantemente a formaciones del Paleozoico Superior y Mesozoico del Grupo La Ge.

Formación Los Guineos

El nombre de Formación Los Guineos fue propuesto por Bowen (1972) para designar una sección de 300 m de espesor de clásticos fosilíferos del Devónico inferior, discordante sobre el Granito de Lajas y en contacto de falla en su tope, con la Formación Río Palmar del carbonífero, y con la Formación La Quinta. La Formación Los Guineos comienza en el Río Lajas con una brecha de guijarros de cuarzo de veta y areniscas cuarcíticas mal escogidas con estratificación cruzada, seguidas por lutitas limosas de color gris, intercaladas con lutitas también grises y hacia el tope aparecen las calizas negras, delgadas, fosilíferas y margas limosas macrofosilíferas con edades correspondientes al tope del Devónico Inferior. (Mendoza, 2005).

En su base se presentan 20 m de una brecha de guijarros discordante sobre el Granito de Lajas, bastante bien escogida, bien litificada, compuesta principalmente de guijarros angulares de cuarzo de veta, y de escasas cuarcitas finas gris. Le siguen 6 m de arenisca cuarcítica gruesa, mal escogida, de color gris pardo, con estratificación cruzada, cubierta a su vez, por 3 m de brecha de guijarros de cuarzo. Suprayacente a

esta secuencia, aparecen lutitas limosas, grises, ligeramente filíticas y areniscas laminadas en estratos delgados, con ocasionales lechos más espesos de areniscas, a menudo lenticulares, con estratificación cruzada, de grano medio a grueso, mal escogidas y de color gris pardo y de areniscas arcósicas. En la parte media y superior de la unidad, predominan las areniscas, seguidas por lutitas grises, algunas areniscas de color gris-púrpura, limolitas y lutitas limosas, y finalmente, se encuentran calizas negras fosilíferas y margas limosas, con abundantes macrofósiles de color gris oscuro y el espesor estimado para la unidad es de 350 a 400 m (CIEN, 1997).

Granito de Lajas

Bowen (1972) introduce este nombre para designar un cuerpo granítico expuesto en el valle del rió Lajas, que este autor considera muy similar al Granito del Palmar y posible continuación meridional del mismo. Sin embargo, las determinaciones de edad efectuadas en el Granito del Palmar hacen improbable esta correlación (González de Juana, 1980).

Estas rocas graníticas afloran formando un cuerpo alargado con una superficie aproximada de 70 km^2, en la cuenca media del rió Lajas. Es una roca de grano muy grueso a medio, color rosado, con la composición mineralógica promedio siguiente: cuarzo 25-20%, feldespato potásico (ortosa, ortosa-microcliono) 20-40 %, plagioclasa 30-60 %, biotita, horblenda 5-10 %. Abundantes diques de diabasa y andesita cortan a este cuerpo granítico (A. Espejo. *et al*, 1980).

Conglomerados de cuarzo y areniscas cuarzosas de la Formación Los Guineos (Devoniano Inferior) descansan discordantes sobre el granito de Lajas y el contacto de este granito con rocas más jóvenes es una falla. Los valores obtenidos por el método Rb-Sr de muestras provenientes del Granito de Lajas permiten asignar una edad de 350 (± 40) m.a. representando un evento intrusivo de toda la Sierra de Perijá, La semejanza en las relaciones de campo de este cuerpo granítico con las rocas

asociadas, así lo confirman. Este evento magmático intrusivo de carácter regional se ha denominado Evento Antray correspondiente al final del Devoniano. (A. Espejo. *et al*, 1980).

En la Sierra de Perijá el Paleozoico Superior está representado por dos secuencias (Bowen, 1972): una inferior constituida por las formaciones Caño del Noroeste, Caño Indio y Río Palmar y otra secuencia superior ocupada por la Formación Palmarito. El mismo correlacionó las formaciones Caño del Noroeste y Caño Indio con la Formación Sabaneta de los Andes, aunque las dos primeras representan sedimentación marina restringida de aguas llanas y Sabaneta es generalmente continental. La Formación Río Palmar contiene calizas oolíticas y fosilíferas, con fusulínidos, con edad bien establecida del Pensilvaniano Medio, de ambientes marinos plataformales poco profundos de mares tranquilos, aunque las oolitas sugieren mayor energía, pudiendo alternarse ambos. (Mendoza, 2005).

Formación Caño Grande

La Formación Caño Grande, está localizada en el caño del mismo nombre y es afluente del Río Cachirí, en el Distrito Maracaibo del estado Zulia, unos 90 km al oeste de la ciudad de Maracaibo. El miembro inferior está formado básicamente por subgrauvacas micáceas y areniscas de grano fino de color marrón, derivadas de rocas metamórficas (esquistos y gneises, posiblemente de la Formación La Sierra o rocas metamórficas sin diferenciar). El miembro superior se compone de calizas y lutitas bioclásticas, recristalizadas, muy ricas en fósiles, con cuatro intervalos bien definidos por Bowen (1972). La Formación Caño Grande es concordante y transicional tanto con la infrayacente Formación Los Guineos como con la suprayacente Formación Caño del (Mendoza, 2005).

Formación Caño del Oeste

Se encuentra ubicada en el caño del Oeste, es afluente del río Cachirí, en el Distrito Maracaibo, unos 87 km al oeste de la ciudad de Maracaibo, estado Zulia. En la sección tipo, la unidad se compone de cuarcita ferruginosa y micácea, de grano fino y color negro azulado; lutita limolítica negra, micácea, nodular, con fractura quebradiza y partículas microscópicas de lignito; lutita pizarrosa negra, micácea, astillosa, y ocasionalmente lutita negra untuosa. En la parte basal de la unidad, la lutita se endurece, por el contacto, con una capa intrusiva de basalto de unos 9 m de espesor; en ambos lados, las lutitas son pizarrosas. Hea y Witman (1960) dividen la formación en dos miembros: uno inferior de 490 m de espesor, compuesto de lutitas sericíticas de color marrón parduzco, untuosas, en capas delgadas, con algunas capas calcáreas, que se interestratifican con las calizas infrayacentes y macizas de la Formación Caño Grande, y en la parte superior, con grauvacas de grano fino a medio.

Formación Campo Chico

Está unidad aflora en el caño grande, tributario del río Cachirí, en el Distrito Maracaibo, unos 88 km al oeste de la ciudad de Maracaibo, estado Zulia. La unidad suprayace concordantemente a la Formación Caño del Oeste, e infrayace discordantemente a unidades del Paleozoico Superior y del Mesozoico. La unidad es considerada del Devónico medio-superior. Se postula un ambiente restringido de aguas llanas, posiblemente salobre, con un incremento de la influencia continental hacia el tope de la formación. En la localidad tipo la formación consiste de grauvacas cuarcíticas y ferruginosas de color gris oscuro y estratificación regular, interestratificadas con lutitas arenosas y micáceas de color gris oscuro y escasas calizas negras delgadas. La Formación Campo Chico contiene una andesita porfirítica de unos 15 m de espesor (Hea y Whitman, 1960), de color gris, con textura traquítica y vesículas de calcita y clorita, la cual infrayace a una toba lítica, de unos

20 m de espesor, de color negro a blanco lechoso, grano grueso y textura cataclástica. (CIEN, 1997).

Formación Río Palmar

La Formación Río Palmar aflora en el río de ese nombre y se compone predominantemente de calizas, oolíticas cerca de la base y fosiliferas en el resto de la sección y por sus fósiles (fusulínidos y corales) se considera de edad Pensilvaniano temprano, asociadas con cantidades menores de limolitas calcáreas finas. En su parte media muestra dos horizontes con ftanita posiblemente debida a cambios en las condiciones Eh-pH sedimentarias, (Mendoza, 2005).

Esta unidad es, transicional en la base con la formación Caño Indio, presenta tipos litológicos en la base, como calizas ooliticas y calizas conchíferas en asociación con limolitas calcáreas, luego hacia su parte media se presentan dos horizontes ftaniticos y su edad se establece como Pennsilvaniense Inferior (González de Juana *et al*. 1980). La unidad Suprayace transicionalmente a la Formación Caño Indio (Bowen, 1972), e infrayace, a los sedimentos de la Formación Palmarito, en discordancia de ángulo bajo pero regional. La extensa distribución de calizas y ausencia de clásticos gruesos, sugieren una sedimentación uniforme en zonas de plataforma marina poco profunda, alejada de fuentes sedimentarias importantes. La sedimentación de las calizas fosilíferas con oolitos, tuvo lugar en la zona de acción de olas y corrientes. (CIEN, 1997).

Formación Palamarito

La Formación Palamarito de edad Pérmico es suprayacente y discordante completando las 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 ftanita. 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). La Formación Palmarito es una secuencia de lutitas principalmente marinas, limos, arenas y margas, que gradan hacia arriba a calizas marinas arnold (1966) la dividió en un miembro inferior clastico y un miembro superior de calizas, En la Sierra de Perijá, Hea y Whitman (1960) mencionaron un miembro inferior que llamaron arenisca de "Palmarito" , con ortocuarcitas de grano grueso que pasan a grauvacas , asociados a brechas tobaceas y un miembro de caliza "Palmarito" compuesto de calcareniscas gruesas fosiliferas, de color gris rojizo. La unidad es transicional en su base con la Formación Sabaneta y discordante en la parte superior con la Formación La Quinta (CIEN, 1997).

2.1.2.3 TRIASICO - JURASICO

La sedimentación en el área de la Sierra de Perijá en el periodo Triásico - Jurásico, se encuentra representada por el Grupo La Gé (Hea y Whitman, 1960 en González de Juana et al., 1980). Este grupo se encuentra representado 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 (Künding, 1938 en Parnaud et al., 1995).

Formación Tinacoa

La Formación Tinacoa ocupa la Sierra de Perijá, desde el sur de la quebrada La Ge, hasta los ríos Cuibas, Piché y Negro. Según González de Juana *et al.* (1980), se depositó en un ambiente sedimentario marino 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).

García (1985), encontró que la composición de las rocas que afloran en los ríos Piché y Tinacoa, pertenecientes a la Formación Tinacoa, son una variedad de rocas volcánicas y sedimentarias, las cuales son arcosas tobáceas, líticas, cristalinas, de composición cuarzo andesita a riodacita, cuarzo andesita a dacita tectonizada con escasa barita. La mayoría de las muestras de roca recolectadas en estos ríos, son similares entre sí en su litología, mineralogía y textura aunque puedan diferir en su granulometría, color y la proporción relativa de sus componentes. Los extremos andesíticos y riolíticos son los menos abundantes y los más abundantes son de cuarzo andesita. Además de estos fragmentos lávicos y subvolcánicos, presentan invariablemente una pequeña cantidad de fragmentos metasedimentarios, tales como filitas cuarzo sericíticas, meta areniscas finas, meta areniscas feldespáticas y meta limolitas. Las fracturas y fisuras son comunes y pueden estar rellenas de cuarzo, barita y calcita. En las cabeceras de los ríos Tinacoa y Piche, se localizaron importantes mineralizaciones de barita con un porcentaje de sulfato de bario ($BaSO_4$), del 65%.En la sección tipo, la unidad está en contacto de falla con la Formación La Quinta, lo mismo se observa en el río Piché.

En la Sierra de Perijá se desconoce la base de la formación, cuyos contactos inferiores observados son todos de falla. En algunos sitios por ejemplo, entre el río Cuibas y Caño Cuna, parecen descansar sobre sedimentos del Devónico. En el río Cuibas infrayace, con aparente concordancia la Formación Macoita y en el caño Cuna, el contacto entre ambas formaciones es transicional.

Formación Macoita

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 (González de Juana *et al*., 1980), representando una transición entre las formaciones Tinacoa y La Quinta Bowen (1972) establece que la edad corresponde al Jurasico

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 Jurasico 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.

Formación La Quinta

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 González 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 (González de Juana *et al*., 1980).

Según Maze (1984), la Formación La Quinta se puede dividir en tres intervalos, 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 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.

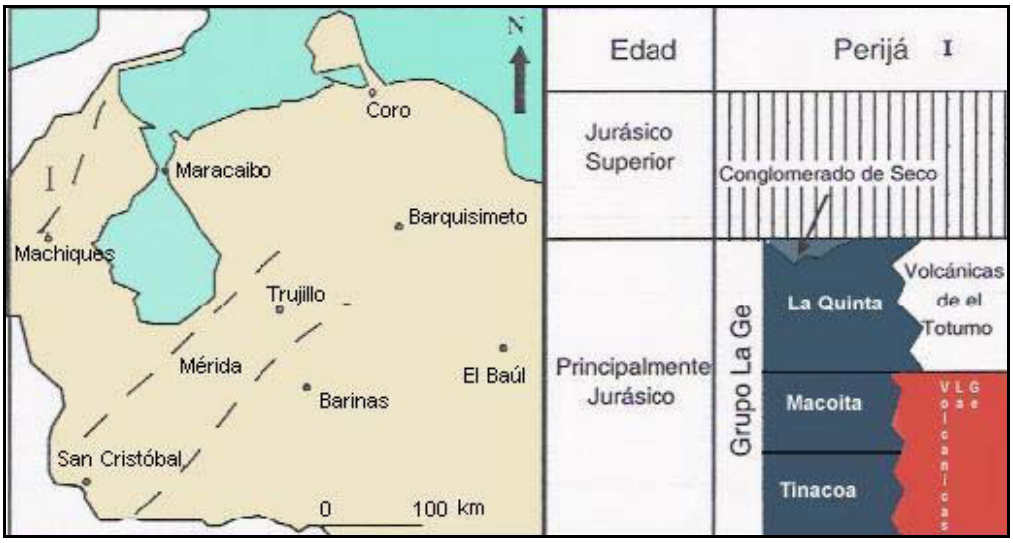


Figura 2.5. Carta cronoestratigráfica del Jurásico en Perijá. Modificado de González, (1998)

2.1.2.4 CRETÁCICO

En Venezuela se registra el Mesozoico en dos provincias diferentes: una de dominio epicontinental, autóctona y otra de dominio geosinclinal profunda, alóctona. Los sedimentos de la provincia epicontinental están bien preservados en la Cordillera de los Andes, Sierra de Perijá, Serranía del Interior y subsuelo de Maracaibo, Barinas y Venezuela Oriental. Las rocas de la provincia geosinclinal alóctona forman la Cordillera de la Costa, Serranía del Interior, Penínsulas de Paraguanà, Araya y Paria, Isla de Margarita y demás islas del Caribe venezolano, todas ellas formando parte de una macrounidad litodémica denominada Sistema Montañoso del Caribe.(Mendoza, 2005).

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).

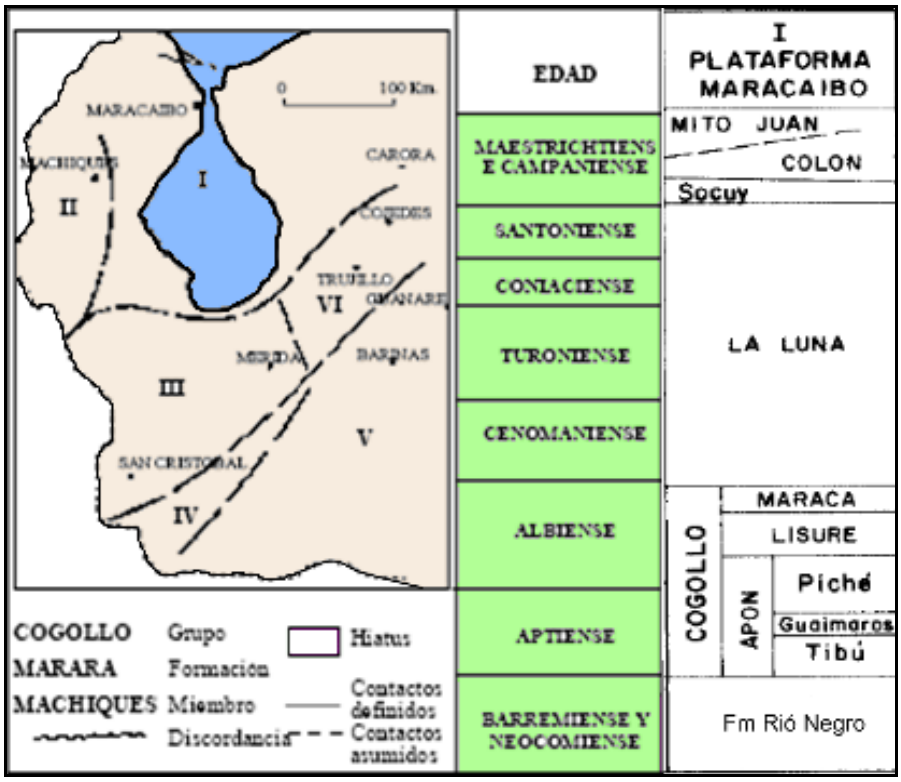


Figura 2.6. Columna cronestratigráfica del Cretácico en Perijá. (Tomado y modificado de González de Juana et al., 1980)

Formación Rió Negro

La Formación Rió Negro aflora en la mayor parte del occidente de Venezuela, en los estados Zulia, Táchira, Mérida. Exhibe buen desarrollo en secciones de la depresión Táchira. Está ausente en el subsuelo de la cuenca Barinas y en los ríos del flanco surandino, entre las cercanías de Santa Bárbara de Barinas y el río Calderas. La Formación Río Negro se compone de areniscas blancas, grano grueso, arcosas,

areniscas conglomeráticas y conglomerados de ambientes fluviales de colores amarillo, rojo y morado, con escasas lutitas y esporádicas tobas. García y otros (1980) reportaron en el Surco del Uribante que la Formación Río Negro se compone de conglomerados oligo y polimixtos, areniscas mal escogidas, capas de carbón, capitas de yeso y lutitas oscuras fosilíferas. En la presa de La Vueltosa, en el limite de los Estados Mérida y Barinas, Suárez (1997) encontró que la Formación Río Negro se compone de dos asociaciones: 1) lutitas fosilíferas y areniscas de grano fino de ambientes marinos tipo barrera-laguna, inicio de la gran trasgresión, y 2) conglomerados.

La Formación Río Negro aflora también en Isla de Toas, en La Grita-San Cristóbal, en Pregonero, en la Plataforma de Maracaibo y Arco de Mérida, en Los Andes de Trujillo y Lara y Cuenca de Barinas. La secuencia yeso calcárea es de ambientes lagunales costeros; las areniscas con estratificación cruzada son de ambientes deltaico-costeros y los conglomerados de ambientes deltaicos. Es concordante/discordante sobre la Formación La Quinta y está cubierta por calizas del Grupo Cogollo. Registra una fauna de bivalbos, gasterópodos y restos de plantas.

Grupo Cogollo

El Grupo Cogollo (formaciones Apón, Lisure y Maraca) y de la Formación Aguardiente se desarrollaron durante el Aptiense-Albiense, en mares con ambientes epicontinentales manteniendo un excelente equilibrio o balance entre la subsidencia regional y el relleno o depósito de sedimentos en la plataforma. Sin embargo, debe destacarse que durante el Cretácico Temprano la transgresión fue dominante, pero también hubo regresiones, es decir que se registró en cierto modo una sedimentación cíclica así registrada en el Grupo Cogollo. Su litología es variada. De base a tope se caracteriza por calizas densas, fosilíferas, con cantidades subordinadas de lutitas oscuras y pocas arenas calcáreas. En Perijá, se presenta un intervalo de calizas negras, bituminosas (Miembro Machiques) y luego por encima, calizas coquinoides,

margosas y nodulares, una sección distintiva de areniscas, calizas glauconíticas, intercaladas con lutitas y un intervalo superior de calizas macizas, de color gris claro, con muchos moluscos, intercaladas con lutitas delgadas. (CIEN, 1997).

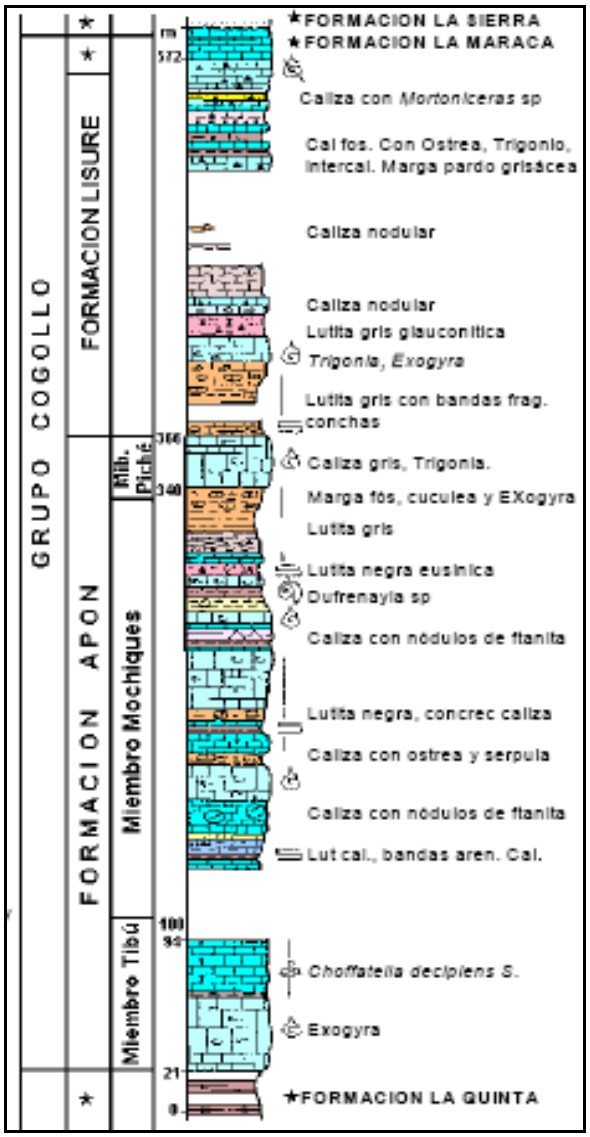


Figura 2.7. Columna estratigráfica del Grupo Cogollo. Tomado y modificado de (Mendoza, 2005)

Su base es transicional con las primeras calizas marinas que se encuentran por encima de las areniscas de la Formación Río Negro. El contacto superior con la Formación La Luna, está marcado por un fuerte cambio litológico a calizas y lutitas

calcáreas, generalmente oscuras, que aunque sus relaciones parecen ser concordantes y transicionales, sugieren un cambio drástico en las condiciones ambientales. Bartok (*et al.*) (1981) utilizan la base de la Formación La Luna, como un marcador caracterizado por una capa de 3-6 m de espesor, con un aumento significativo de radioactividad, comparado con la que muestra el Grupo Cogollo.

Formación Apón

Es mayormente transgresiva (con calizas), con pequeñas regresiones indicadas por algunos sedimentos clásticos y la formación de dolomita en llanuras de mareas. En la Sierra de Perijá la base de la unidad contiene calizas y lutitas arenosas, seguidas por un grueso intervalo biostromico de calizas macizas cristalinas, criptocristalinas, nodulares, coquinoides y margosas. León (1975) interpreta que la Formación Apón representa una sedimentación masiva de plataforma costera externa, con profundidades variables desde costeras hasta de margen de plataforma. Ghosh y García Jarpa (1980) interpretan los paleoambientes de la Formación Apón de los Andes como de ambiente de bancos de arena sumergidos próximos a una barra de ooides para la parte inferior; marino somero para la parte media y de ambiente más profundo y más distante de las zonas de aporte hacia la zona del tope. Es decir ambientes que pasan de evaporiticos de la basal Formación Río Negro y marinos plataformales restringido a marino abierto.

Formación Lisure

Según (Rod y Maync, 1954), aflora en el caño Lisure, afluente del río Maraca de Perijá, pero la sección de referencia se localiza en el caño Cusare, tributario del Río Chaparro. Litológicamente se compone de areniscas calcáreas cuarzosas glauconiticas, de colores grises a verdosas, de grano fino a medio, areniscas micáceas, calizas arenosas glauconiticas, calizas grises y calizas coquinoides y algunas lutitas. La presencia de areniscas y de glauconita la diferencian singularmente

del resto del Grupo Cogollo. Contiene foramíniferos, amonites y restos de equinoides que le asignan una edad Albiense Medio a Superior. Los ambientes son de aguas marinas de plataforma costera con profundidades variables, con mayor aporte de clásticos provenientes del Escudo de Guayana. Su espesor es 135 m en el caño Maraca, 180 m y 105 m en los ríos Cogollo y Negro, respectivamente. La Formación Lisure es rica en macrofósiles como pelecípodos y equinoideos de edad Albiense Medio. La Formación Lisure pasa al sur a la Formación Aguardiente y la Formación Peñas Altas y es concordante con la suprayacente Formación Maraca.

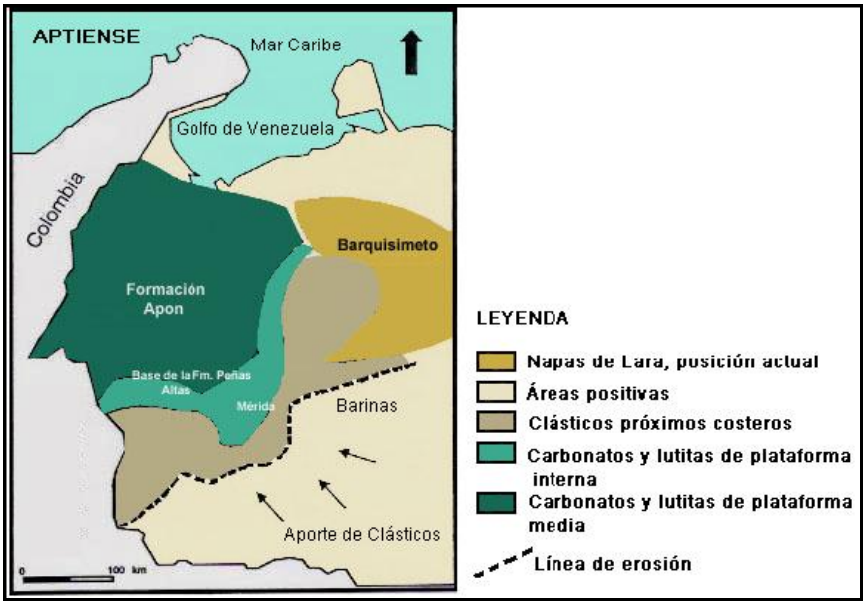


Figura 2.8. Paleogeografía para el Aptiense en Venezuela. Modificado de González (1998).

Formación Maraca

León (1975) considera que la formación representa una facies de aguas llanas, cercana a la costa con buen desarrollo de calizas de mares muy oxigenados para mostrar ostreas y moluscos. Consiste en pocas areniscas glauconíticas y calcáreas hacia la base, en transición con la Formación Lisure infrayacente, pero el carácter más distintivo lo constituyen las calizas bloclásticas coquinoides macizas, formadas predominantemente por *Ostreas* y *Trigonia*, con algunas intercalaciones de capas

delgadas de margas y lutitas de color gris y ocre claros. También puede presentar ooides y granos cubiertos, y algunos granos angulares de cuarzo, fosfato y pirita. Las calizas se asemejan a la de los miembros Piché, y Tibú de la Formación Apón. La base es transicional con la Formación Lisure, colocándose en el primer paquete de calizas no glauconíticas. El contacto superior coincide con la primera aparición de calizas bituminosas negras y laminadas, de la Formación La Luna, en una transición rápida, que según León (1975), pudiera pensarse en un diastema, aunque la Formación Maraca siempre se ha encontrado presente. (Rod y Maync, 1954) dan como sección tipo, el caño Maraca, un tributario del río Yasa, al suroeste de Machiques, distrito Perijá, estado Zulia. El tope de la formación está 1.300 m al oeste de la hacienda "Maraca".

Formación La Luna

La Formación La Luna consiste típicamente de calizas y lutitas calcáreas fétidas, con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, estratificadas delgadamente y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro; la ftanita negra es frecuente en forma de vetas, nódulos y capas delgadas; las concreciones elipsoidales a discoidales de 10 a 80 cm de diámetro, son características típicas de la formación, que permiten reconocerla en cualquier afloramiento (CIEN, 1997). En Perijá las rocas de la Formación La Luna son de colores negros, euxinicas, en contraste con calizas de colores más claras, más oxigenadas; de Táchira y hacia Barinas se vuelve arenosa, con lo cual sufre la designación de otros nombres formaciónales (formaciones Capacho y La Morita y Quevedo, respectivamente) (Mendoza, 2005).

En la región del lago de Maracaibo, la Formación La Luna en general suprayace concordantemente a la Formación Maraca, la más alta de las unidades de calizas conchíferas del Grupo Cogollo, e infrayace, también concordantemente, a la Formación Colón. Sin embargo, hacia el sur la unidad grada lateralmente a la Formación Capacho y su contacto inferior se define por la variación en sentido

descendente a una alternancia de tipos variables de lutita y caliza. En el contacto La Luna-Colón, por debajo de las lutitas características de la Formación Colón, se presenta una extensa zona glauconítica (Miembro Tres Esquinas), que localmente infrayace a una caliza fosilífera (Miembro Socuy).

Los primeros autores abrigaron dudas en cuanto a la formación incluyente de estas dos subunidades. Actualmente se considera a la caliza de Socuy como miembro de la Formación Colón, y al Miembro Tres Esquinas como límite superior, incluido en la Formación La Luna (Boesi et al., 1988; Romero y Galea, 1995). La formación La Luna aparentemente se depositó en un ambiente euxínico de aguas cuya profundidad ha sido objeto de mucha controversia. Boesi et al. (1988) indica profundidades que van de 100 m en el Turoniense hasta aproximadamente 800 m en el Campaniense, y mencionan condiciones euxínicas del Turoniense hasta el Santoniense. Romero y Galea (1995) mencionan ambientes disaeróbicos para el Miembro Tres Esquinas del Campaniense.

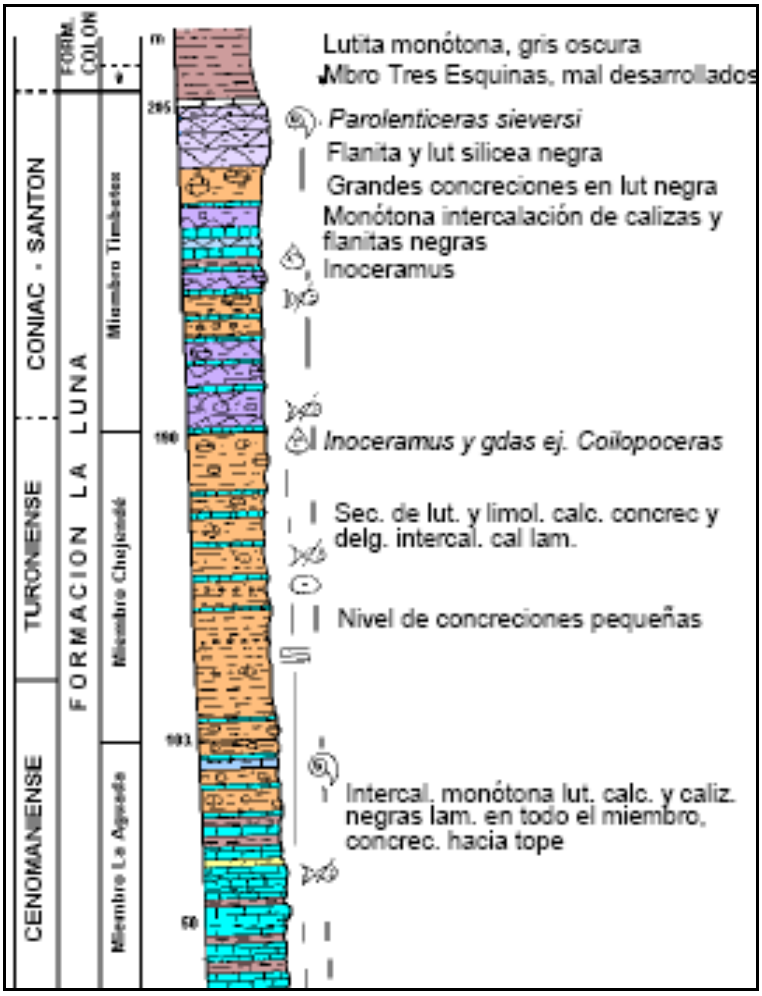


Figura 2.9. Columna estratigráfica de la Formación La Luna. Tomado y modificado de (Mendoza. 2005)

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 microfosilíferas

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 Maestrichtiense 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- Maestrichtiense, 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 Maestrichtiense 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-Maestrichtiense, con un espesor promedio de 52m.

Formación Mito Juan

La Formación Mito Juan se extiende superficialmente y se encuentra en la parte occidental y meridional de la cuenca del lago de Maracaibo, (CIEN, 1997).

La litología de la Formación Mito Juan se caracteriza por arcillas grises, gris verdosas y negras, localmente arenosas, en las cuales el contenido de limo y arena aumenta en sentido ascendente y en cuya parte superior se encuentran a veces capas delgadas de calizas y areniscas. En la parte inferior de la formación hay algunas arcillas laminares grises que son indistinguibles litológicamente de las arcillas de Colón. Son particularmente comunes concreciones discoidales de arcilla ferruginosa formando capas delgadas. Las arenas se clasifican en el grupo de las grauvacas y subgrauvacas y en el grupo de las areniscas cuarzosas en el flanco noreste de Mérida, (Van Andel, 1958). En la parte superior se presenta localmente un intervalo de calizas conocido como Miembro Río de Oro (CIEN, 1997). La microfauna indica ambientes de aguas salobres, poco profundas, evidenciando en esta forma el relleno de la Cuenca (Sutton, 1946).

El contacto entre las formaciones Mito Juan y Colón es de transición. Está marcado lo más cerca posible para que coincida con el cambio de arcillas laminares grises con una fauna abundante de foraminíferos calcáreos por debajo, a arcillas laminares arenosas gris verdoso, con una fauna de foraminíferos arenáceos, por encima. De acuerdo a Key (1960), en los sitios donde la unidad infrayace a la Formación Guasare, se utiliza la prominente arenisca inferior extrema de esta última para definir el contacto superior.

2.1.2.5 TERCIARIO

2.1.2.5.1 PALEOCENO - EOCENO MEDIO

A fines del Cretácico Superior se inicia una orogénesis equivalente a la Orogénesis Laramidiana de Estados Unidos que afectó y metamórfizó en las zonas geosinclinales a rocas del Mesozoico y afectó en menor escala a regiones menos profundas y más estables y por ello, mientras en algunas regiones como la Cuenca de Barinas, el Arco de Mérida, el Alto de El Baúl, zonas sur de los Estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, así como en las Penínsulas de la Guajira y Paraguaná y algunas islas como Aruba y Curazao, no se registró sedimentación en el Terciario Temprano (Paleoceno-Eoceno), en otras como en el norte de la cuenca Oriental de Venezuela la sedimentación marina siguió ininterrumpida durante el Paleoceno-Eoceno (Mendoza, 2005).

Formación Guasare

La Formación Guasare de edad Paleoceno Temprano, 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 del 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 parálicos 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.

Formación Barco

La Formación Barco está compuesta por areniscas, lutitas y limolitas intercaladas. Las areniscas son generalmente de color gris, arcillosas, de grano muy fino a medio, bien escogidas y con estratificación cruzada o laminada, localmente contienen mica y laminaciones de lutita. El nombre de areniscas chispeantes que se les da

frecuentemente, se debe a crecimientos secundarios de cuarzo cristalino que brillan al sol. Las lutitas y arcilitas que forman de la tercera parte a la mitad del espesor total de la sección, son gris a gris oscuro, parcialmente limosas, micáceas y carbonáceas, con esferulitas diminutas de siderita. Son frecuentes masas lenticulares y nódulos de ferrolita arcillosa. En la parte superior de la formación, se presentan capas delgadas de carbón. En la Concesión Barco, el espesor de la formación varía de 150 a 278 m, con un promedio de 194 m. Se mencionan espesores de 82 a 165 m en el suroeste del Táchira. Fierro y Useche reportan un espesor de 150 m en la región de El Nula, y 200 a 300 cerca de San Cristóbal (CIEN, 1997).

La Formación Barco yace concordantemente sobre la Formación Catatumbo, definiéndose el contacto en el paso de las lutitas oscuras de Catatumbo, a las primeras areniscas gris claro de Barco. En el tope, pasa transicionalmente a la Formación Los Cuervos, en el contacto entre la arenisca superior a las capas de carbón de esta formación. En la región de El Nula, la formación yace sobre la Formación Colón por desaparición local de la Formación Catatumbo (CIEN, 1997).

Formación Marcelina

La Formación Marcelina es suprayacente al Grupo Orocué y es concordante en la zona norte de la Sierra de Perijá. Los afloramientos de la Formación Marcelina abarcan una faja de aproximadamente 54 km de largo, por no más de 4 km de ancho, que va cercano a 3 km desde el norte del río Guasare hasta la confluencia del caño Colorado con el río Palma, al sur. En el subsuelo, ha sido identificada en los campos de Alturitas (Key, 1960) y Alpuf (Quijada y Caldera) 1985, en el distrito Perijá. (Miller y San Juan, 1963) señalan su extensión en la vertiente occidental de la sierra de Montes de Oca, en el valle del río Ranchería, Colombia. La formación desaparece hacia el este, en el lago de Maracaibo, por erosión. 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 súper secuencia **C** (secuencia de transición entre margen pasivo y margen activo), correspondiendo a las secuencias depositacionales **K7** y **K8** según Parnaud *et al*. (1995). Durante el Paleoceno Tardío comienza un emplazamiento de las napas de Lara hacia la zona norte del Lago de Maracaibo (Paranaud *et al*., 1995), para luego emplazarse 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).

Formación Trujillo

La sección de referencia de la Formación Trujillo (Tash, 1937; Brondijk, 1967) se localiza a lo largo de las quebradas Totuche y El Sumbardo, y en el Río Colombita, afluentes del Río Misoa. La serie Misoa-Trujillo fue utilizada por muchos autores. La Formación Trujillo es esencialmente una unidad predominante turbiditica que infrayace concordantemente a las capas de areniscas de la Formación Misoa y es concordante sobre las calizas de la Formación Guasare. También se refieren capas delgadas de carbón subbituminoso y localmente turbiditas con restos de rocas de La Luna. Tiene un espesor estimado de 1.800 m y se compone de predominantes lutitas homogéneas puras a arenosas hacia el tope con cantidades subordinadas de capas sencillas de areniscas grises de grano fino. Los pocos fósiles (Trochammina, Cyclammina, etc.) encontrados en las lutitas sugieren ambientes marinos de aguas profundas (Mendoza, 2005).

Formación Mirador

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 (González 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** corresponde a las Formaciones Mirador y Trujillo dentro de lo que se denomina la súper secuencia **D** o secuencia de cuenca colisional (Parnaud *et al*., 1995).

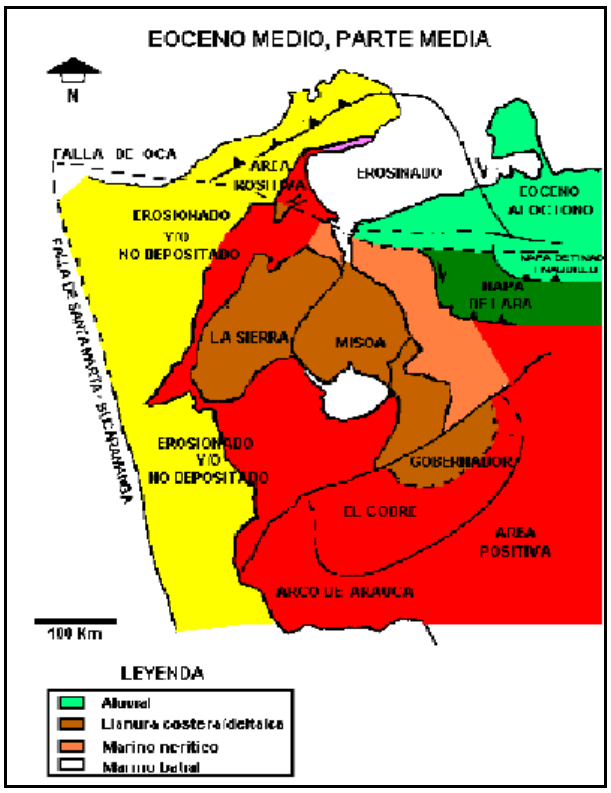


Figura 2.10. Mapa Paleogeográfico durante el Eoceno Medio, parte media.Tomado de Mendoza (2005)

Formación Misoa

La Formación Misoa representa ambientes de un complejo deltaico en los cuales se reconocen llanuras deltaicas, canales distribuitivos y el frente del delta con alguna influencia marina somera**.** Sin embargo en la Formación Misoa las calizas orbitoidales se localizan hacia la base en contacto con la infrayacente Formación Trujillo. La unidad pasa lateralmente hacia el Este a la Formación Trujillo de ambientes de talud continental o más profundo y hacia el SW se adelgaza considerablemente contra el Macizo de Avispa. También se adelgaza contra la Cordillera Andina y sobre la Plataforma de Barbacoas con solo 20 m de espesor en el sinclinal de La Soledad de Trujillo.

La Formación Misoa se reconoce en el subsuelo del lago de Maracaibo y al oeste del mismo, desde el campo Mara a Alturitas, al suroeste se extiende hacia el campo de Tarra, donde se relaciona lateralmente con la Formación Mirador. 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 varia 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), hay equivalencia lateral entre la Formación Misoa y las formaciones Ranchería, Valle Hondo al sureste y Mirador al suroeste. Las relaciones diacrónicas mencionadas anteriormente, implican alguna equivalencia entre capas de la parte inferior de Misoa y parte superior de Trujillo.

2.1.2.5.2 EOCENO TARDÍO – PLIO-PLEISTOCENO

Formación La Sierra

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 González 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 (González de Juana et al., 1980 y CIEN, 1997).

Grupo El Fausto

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 arcilitas 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.

Formación Los Ranchos

La Formación Los Ranchos aflora en la zona piemontina de la Sierra de Perijá, en el Distrito Perijá. En el Distrito Mara, se mencionan afloramientos al este de la Falla de Los Ocho, entre los ríos Cachirí y Guasare y a lo largo del eje del sinclinal de Manuelote. En el subsuelo, la formación se extiende hacia el este, hasta pasar a la Formación Lagunillas cerca de la costa occidental del lago de Maracaibo, (CIEN, 1997).

El área tipo Los Ranchos está compuesta en un 50 ó 60% por areniscas bien estratificadas, micáceas y ferruginosas con algunas capas delgadas de areniscas conglomeráticas y conglomerados, el resto de la litología se compone de lutitas arcillosas grises, y arcilitas. Al sur del río Apón, en la parte central de Perijá, el contenido de lutitas grises alcanza a más de las tres cuartas partes de los afloramientos, combinadas con areniscas ferruginosas delgadas, con estratificación cruzada (Miller y San Juan, 1963).

Formación La Villa

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 conglomeraticas, se observan esporádicamente estructuras sedimentarías como la estratificación cruzada (González 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.

Formación El Milagro

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 (González 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.

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**, 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 súper secuencia **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. Según Lugo (1998), se produce el levantamiento de la Sierra de Mérida y Perijá desde el Oligoceno al Plioceno. 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.

2. MARCO TEÓRICO

2.2 FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES REMOTOS

2.2.1 HISTORIA DE LOS SENSORES REMOTOS

Los globos de aire caliente en el siglo XIX, proporcionaron la única forma por la que los humanos pudieron ver la Tierra desde las alturas. Al inventarse las cámaras a mediados del siglo XIX, se empezaron a tomar las primeras fotografías aéreas desde los globos. Una de las primeras fotografías tomadas con este sistema fue la ciudad de Boston, Massachussets, en los Estados Unidos de Norteamérica, en el año 1860. La fotografía fue tomada desde 365 metros de altura sobre la ciudad. Hasta 1960, los sistemas de detección a distancia más utilizados estaban basados en las cámaras de fotos y cine, a pesar de que la película infrarroja y el radar ya se habían desarrollado y utilizado durante la Segunda Guerra Mundial (CICENA, 2003).

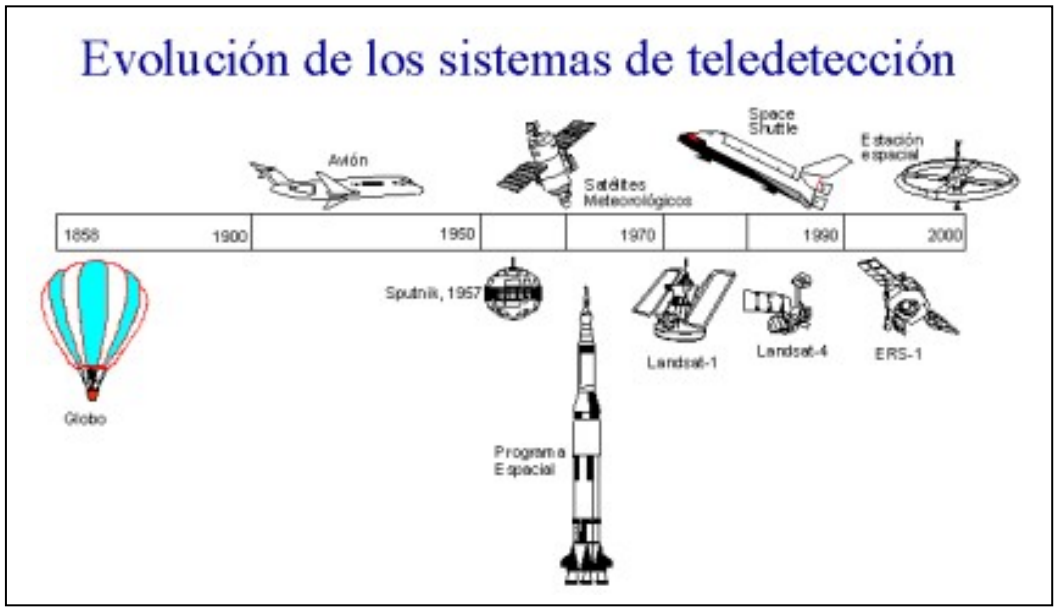


Figura 2.11. Tomado de http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/ciaf/TutorialSIG_/images/pr

Los primeros sensores remotos conocidos son las fotografías obtenidas por Gaspar Félix de Tournachon en 1859, utilizando como plataforma un globo aerostático. En los inicios de la aviación, 1909, Wilbur Wrigth obtuvo también fotografías aéreas. Durante la primera guerra mundial hubo un mayor desarrollo de la fotografía aérea y la invención del radar. En la época de los 50, la "guerra fría" desencadenó la carrera espacial y con ella la percepción remota desde el espacio terrestre, con el lanzamiento del Sputnik, de la URSS, y las series Tiros, Gemini, Apolo de los Estados Unidos, con los cuales se obtiene las primeras fotografías espaciales (MONTOYA, 1996).

Los sensores remotos con base en el espacio empezaron en 1960, con el lanzamiento del primer Satélite de Observación Infrarrojo de Televisión (TIROS 1). La serie de satélites TIROS se concentró en ofrecer imágenes de las nubes, siendo esta la predecesora de las actuales series de satélites climatológicos con órbita polar. El primer satélite con sensor remoto que se concentró en la superficie terrestre fue el Satélite para la Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS I), lanzado por la NASA en julio de 1972. Más adelante, a este satélite se le volvió a bautizar como Landsat I, convirtiéndose en el primero de una serie de satélites Landsat diseñados para obtener imágenes y trazar mapas de las características de la superficie terrestre. Hoy en día, existen docenas de satélites ambientales lanzados y operados por distintos países y organizaciones multinacionales (CICENA, 2003).

En un principio, el costo de estas tecnologías restringió su uso a grandes organizaciones gubernamentales y privadas. Más recientemente, el poder de la computación de escritorio y personal, así como la proliferación de satélites de varios países, han abierto esta frontera para la gente en todas partes. En la actualidad, pequeñas universidades o empresas planificadoras del uso de la Tierra, grupos ambientalistas, etc., pueden utilizar la tecnología de detección remota por satélite. (CICENA, 2003).

Los sensores se pueden clasificar, de manera general, de acuerdo con la forma en que estos reciben la energía procedente de la superficie terrestre o de diferentes objetos (IGAC, 1998):

Pasivos. Estos sensores se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de la cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya sea emitida por su propia temperatura (Chuvieco, 1996). (Ver Figura 2.12.) Ejemplos de este tipo de sensores son los programas Landsat, Spot e Ikonos, entre otros.

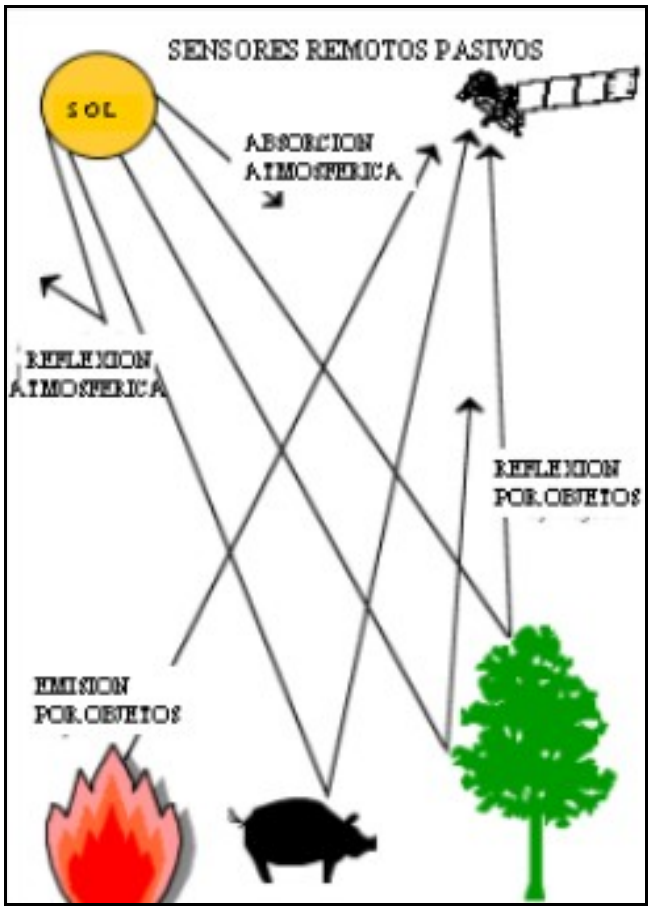


Figura 2.12. Figura que muestra como proceden los sensores pasivos para recoger la energía emitida de los objetos por los rayos del sol. Tomado y modificado de http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/sensores-radar.htm

Activos. Son aquellos capaces de emitir su propio haz de energía, de manera que la energía electromagnética es enviada en dirección al objeto y luego los sensores detectan la energía reflejada del mismo (IGAC, 1998).

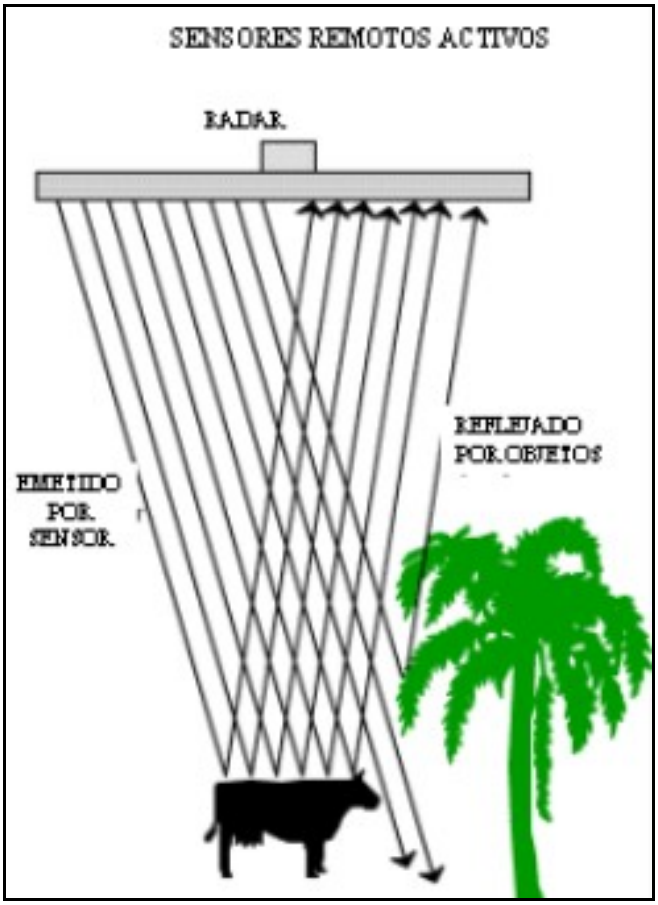


Figura 2.13. Figura que muestra como proceden los sensores activos para recoger la energía que ellos mismos emiten a los objetos. Tomado y modificado de http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/sensores-radar.htm

El sistema más conocido es el **radar** (sensor radiométrico activo de micro-ondas), que trabaja en una banda comprendida entre 0,1 cm y 1 m. Gracias a sus características puede trabajar en cualquier condición atmosférica (Chuvieco, 1996).

2.2.2 LANDSAT MULTISPECTRAL SCANNER SYSTEM (MSS)

En 1972 se puso en órbita el primer satélite diseñado para el estudio de los recursos terrestres, el ERTS-I posteriormente denominado LANDSAT 1. La secuencia continuó hasta 1999, con el LANDSAT 7. Los primeros tres satélites se situaron a una altitud de 920 Km, barriendo la superficie de la Tierra cada 18 días y obteniendo información simultánea de áreas de 185 x 185 km, con una resolución espacial (píxel) de 79 m, mediante el sensor MSS (Multispectral Scanner System), que registraba información en 4 bandas espectrales. La segunda generación de satélites Landsat (4 y 5), operan a una altitud de 705 Km y tienen una revisita cada 16 días. Incluyen al sensor TM (Thematic Mapper), que registra la radiación en 7 bandas espectrales, incrementando en calidad y cantidad la información proporcionada por los satélites Landsat, con una mejora en la resolución espectral, espacial y radiométrica. La resolución es de 30 m en las bandas del visible e infrarrojo cercano, y de 120 m en el térmico.

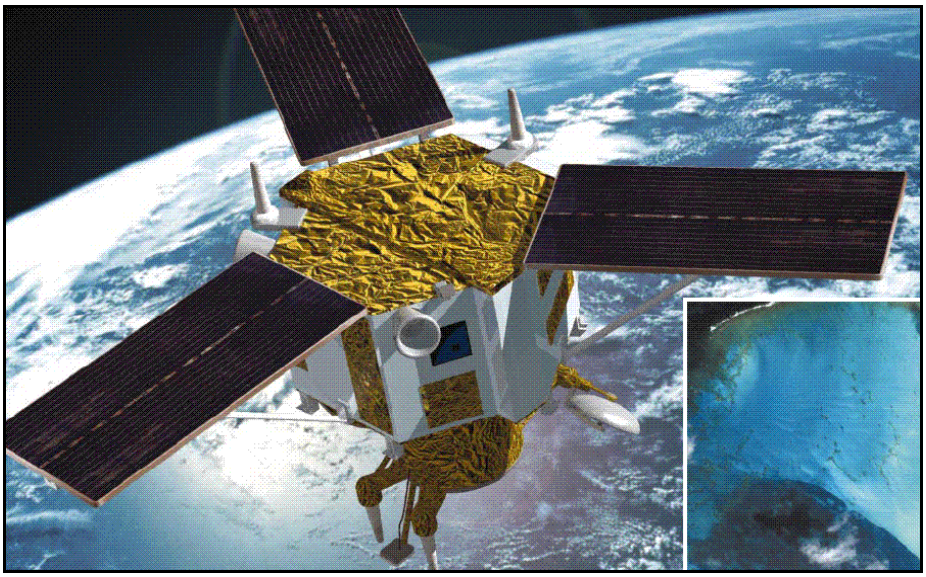


Figura 2.14. Imagen del Satélite landsat 7 en orbita. Tomado de: http://www.orbemapa.com/2008/08/sensores-remotos-y-cartografia-temtica.html

El LANDSAT 7 fue puesto en órbita el 15 de abril de 1999, con un nuevo sensor denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Su operación es administrada por la NASA (National Space and Space Administration) y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United Sates Geological Survey). Una imagen Landsat 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales de 30 m de resolución, una banda termal de 60 m de resolución y un sensor pancromático (PAN), con resolución de 30 m, que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento.

Tabla 1. Características del sensor LANDSAT 7

Anchura del barrido	185 Km.
Altitud	705 Km.
Quantizacion	8 bits
Capacidad de almacenamiento a bordo	375 Gb
Inclinación	Solar -sincrónica , 98,2 grados
Paso ecuatorial	Decendentes ; 10:00 AM +/- 15 min.

Tabla 2. Características espectrales y espaciales de las bandas LANDSAT 7

Espectro Electromagnético	No de Banda	Rango Espectral mm	Resolución Espacial
Visible azul	1	0.450– 0.515	30m
Visible verde	2	0.525– 0.605	
Visible rojo	3	0.630– 0.690	
Infrarrojo cercano	4	0.750– 0.900	30m
Infrarrojo de onda corta	5	1.550– 1.750	
Infrarrojo de onda corta	7	2.090– 2.350	
Termal	6	10.40 –12.50	60m
Pancromático	8	0.520– 0.900	15m

En la Figura 2.15 se observa el rango del espectro electromagnético para cada una de las 7 bandas del satélite LANDSAT 7.

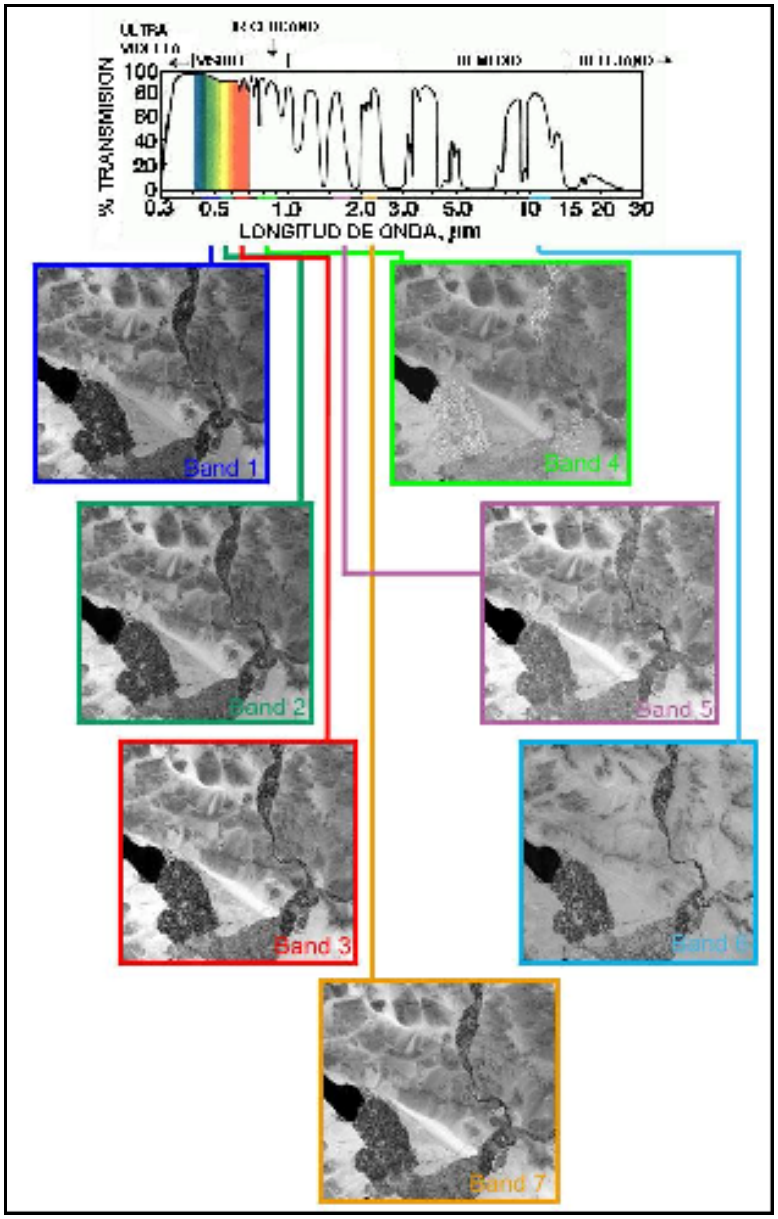


Figura 2.15. Regiones del espectro electromagnético para las bandas del LANDSAT 7. Modificado de http://landsat.gsfc.nasa.gov/education/compositor/graphics/spectrum_chrt.jpg

2.2.3 OTROS SISTEMAS SATELITALES DE SENSORES REMOTOS

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 funcionó 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).

2.2.4 CONCEPTOS GENERALES

2.2.4.1 TELEDETECCIÓN

La teledetección es una técnica que ha ido evolucionando aceleradamente durante las últimas décadas con la aparición de la tecnología satelital, sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principio de siglo XX, para ir evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales. Hoy en día, las definiciones de teledetección se utilizan para describir las actividades que realizan los satélites, trasbordadores espaciales o determinado tipo de aviones. A continuación se resaltan algunas definiciones:

1. La teledetección o lo que es lo mismo, la percepción remota, es la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la tierra (Chuvieco, 1996).

2. Obtención de imágenes u otro tipo de información acerca de un objeto, se realiza utilizando técnicas de mediciones hechas a distancia, además de procesar y analizar los datos (CCRS).

3. La percepción remota es la colección de información de un objeto sin estar en contacto físico con el objeto. Aeroplanos, aviones y satélites son las plataformas más comunes desde donde las observaciones remotas son realizadas. El término percepción remota es restrictivo a métodos que emplean energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto (Sabins, 1978).

2.2.4.2 IMÁGENES DE SATÉLITE

Las imágenes de satélite representan las formas de captura indirecta de la información espacial. Almacenadas como matrices, cada elemento de imagen (llamado "píxel") tiene un valor proporcional a la reflectancia del suelo para el área de la imagen. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas fila, columna. La imagen que más discriminación nos da de niveles de grises está configurada en 32 bits real (figura 2.16).



Figura 2.16. Imagen Satelital de Paris mostrando la calidad de la imagen satelital. Tomado de www.cicena.com.mx

Es el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen. Define el tamaño del píxel, que es la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información en la imagen. En sensores de antena, la resolución depende del radio de apertura, de la altura de la plataforma y de la longitud de la onda. A mayor radio, menor altitud y menor longitud de onda, la resolución es más detallada. Solo se pueden discriminar en la imagen, elementos de tamaño superior a la resolución espacial (es decir, al tamaño del píxel). La resolución espacial esta relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de la información (Chuvieco, 1996).

2.2.4.3 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

La unidad visual más pequeña que se puede visualizar en una imagen se denomina píxel. El sensor detecta la radiancia media de una parcela de terreno equivalente al tamaño del píxel. Este valor se traduce a un valor numérico al que llamamos nivel digital, a partir del cual se realiza el tratamiento digital de las imágenes. Cada píxel

tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al **nivel digital** (ND) percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o **nivel visual** (NV). (Alzate, 2001).

El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas fila, columna, cuyo valor (o valores) de celda corresponden a la dimensión espectral. En el caso de sensores multiespectrales se tienen muchas matrices o bandas para cada una de las cuales, existe un sensor. La imagen de radar tiene una sola banda, puesto que tiene sólo un sensor. Los sensores híperespectrales pueden tener cientos de bandas. Cada píxel se define por un byte y éstos pueden estar descritos con arreglos de 8 bits con 256 niveles digitales posibles (2^8, de 0 a 256 niveles); de 16 bits no signado con 65536 niveles digitales posibles (de 0 a 2^{16}); de 16 bits signado (desde $-2^{16}/2$ a $2^{16}/2$) (Alzate, 2001).

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 (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).

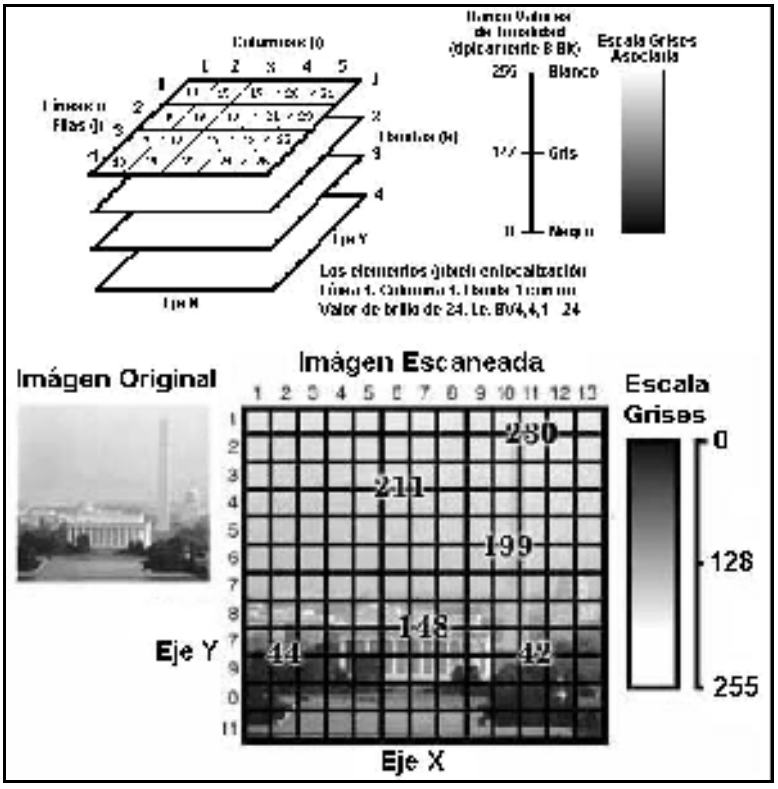


Figura 2.17. Componentes de una imagen digital. Modificado de Alzate (2001)

2.2.4.4 PERCEPCIÓN REMOTA

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). El sistema de percepción remota consta de componentes que se interrelacionan entre si.

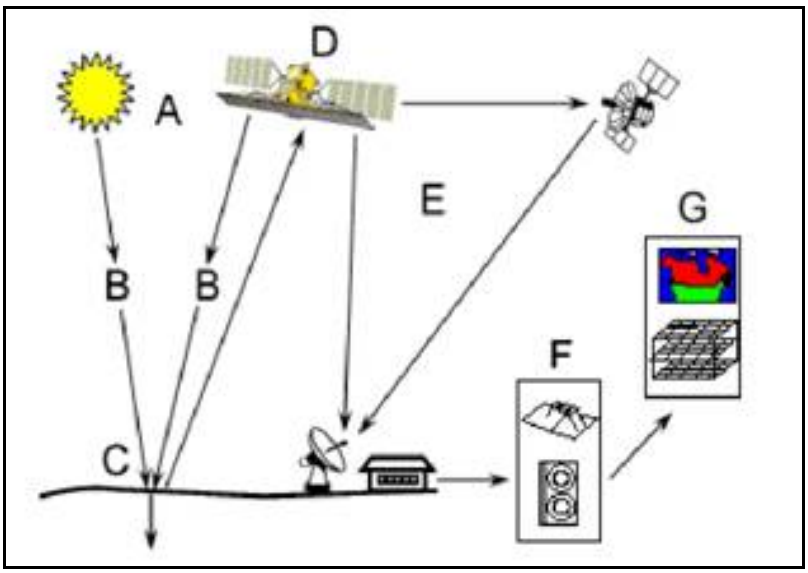


Figura 2.18. Proceso de la percepción remota. Tomado de: http://www.segemar.gov.ar/sensores/sensores_remotos_teledeteccion.htm

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).

2.2.4.5 PROCESAMIENTO DIGITAL

El procesamiento digital puede ser definido como el conjunto de tecnologías orientadas a la recopilación y tratamiento de información espacial con un objetivo específico. Así, las actividades que envuelven el procesamiento, son ejecutadas por sistemas específicos para cada aplicación. Se basa en que cada objeto o tipo de cubierta emite un espectro electromagnético específico, en función de su propia naturaleza y de las radiaciones que recibe. La reflectancia de un objeto o tipo de cubierta a lo largo de todo el espectro electromagnético se denomina firma espectral, estando caracterizado cada objeto por una firma espectral concreta, que lo distingue de los demás.

Este está destinado al procesamiento de datos referenciados geográficamente, desde su recopilación hasta la creación de salidas en forma de mapas convencionales, informes, archivos digitales, etc.; debiendo poseer la unidad recursos para su almacenamiento, administración, manipulación y análisis.

Las plataformas son los vehículos o sitios donde se transportan los sensores. Pueden ser plataformas satelitales o plataformas aéreas. 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).

2.2.5 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS SENSORES REMOTOS

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 muchas formas, como lo son: Ondas de radio, Microondas, Calor, Rayos ultravioleta, Rayos x, Rayos gamma, Luz visible (Alzate, 2001).

La percepción remota implica la medición de la energía que es reflejada o emitida por objetos, sin entrar en contacto con ellos. Esta energía electromagnética, viaja por el espacio como ondas electromagnéticas. Las ondas se diferencian por su longitud, que es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda (CICENA, 2004).

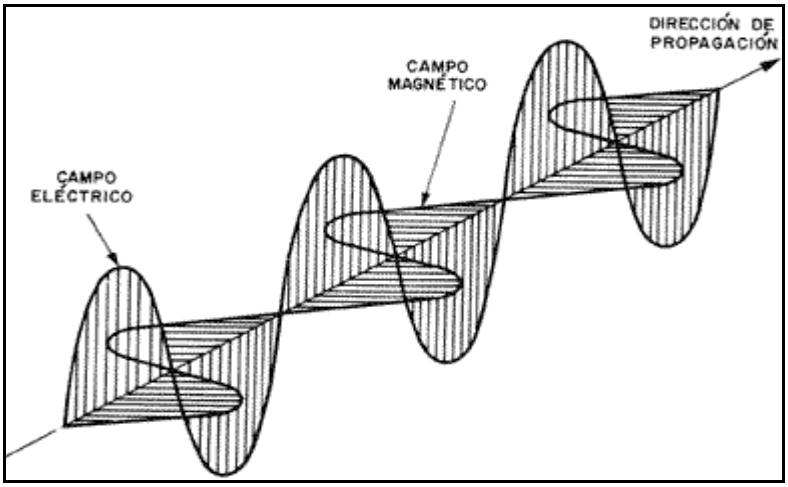


Figura 2.19. Campo eléctrico vertical y el campo magnético horizontal. Tomado de www.fisicanet.com.ar

El espectro electromagnético consiste en todas las longitudes de onda de la energía electromagnética. El espectro continuo se subdivide en algunos tipos de energía electromagnética como los rayos X, rayos ultravioletas (UV), visibles, infrarrojo (IR), microondas, y ondas de radio. Estos distintos tipos de energía electromagnética son categorizados por su posición, o longitudes de onda, en el espectro electromagnético. Los rayos X tienen longitudes de onda muy pequeñas, alrededor de 0.0001 micrómetros, y las ondas de radio pueden tener longitudes de onda grandes, hasta 100 m (CICENA, 2004).

2.2.5.1 FUENTES DE ENERGÍA DE PERCEPCIÓN REMOTA

Ya que la luz del sol es la fuente más común de energía usada en la percepción remota, las longitudes de onda predominantes en la luz solar son las más importantes. Para las aplicaciones agronómicas, la porción de interés es la que va desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). La mayor parte de la luz solar esta en estas bandas y tiene longitudes de onda entre 0.2 y 0.4 micrómetros. (CICENA, 2004)

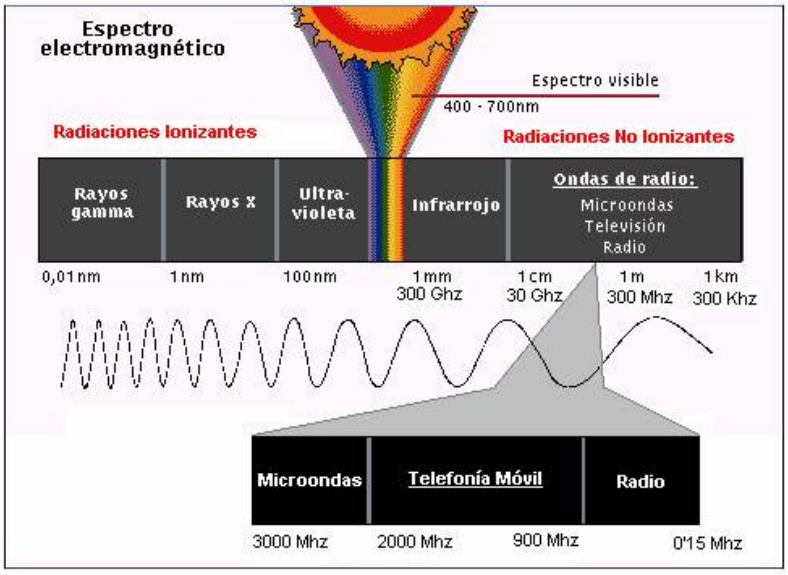


Figura 2.20. Espectro electromagnético. Tomado de http://www.obarenes.net/~Fisica/1B6atoenla_archivos/image002.jpg

La luz visible, la porción del espectro que puede ser detectada por el ojo humano, también se encuentra entre el UV y el IR. La banda del visible se extiende de 0.4 a 0.7 micrómetros. La luz azul se encuentra cerca de la región de 0.4 μm y la luz roja cerca de los 0.7 μm. Justo sobre la región del rojo se encuentra la banda del infrarrojo cercano (NIR). No existe una distinción clara entre el NIR y el IR. Esta región del infrarrojo cercano, aunque es indetectable por el ojo humano, puede ser detectada por sensores artificiales y es muy importante en la percepción remota (Alzate, 2001).

La energía que recibe el sensor depende de las propiedades de la superficie (reflectividad de la cubierta, condiciones atmosféricas, geometría de la observación, rugosidad de la superficie), con base en ello, se dan varias denominaciones de acuerdo a su comportamiento, por ejemplo, los cuerpos negros absorben y emiten toda la energía, los cuerpos blancos reflejan la energía por completo y los cuerpos grises absorben y emiten en forma constante la energía incidente en diferentes longitudes de onda (Alzate, 2001).

2.2.5.2 INTERACCIÓN DE LA ENERGÍA CON LA ATMOSFERA TERRESTRE

La atmósfera no es un cuerpo transparente, en ella se encuentra pequeñas partículas en suspensión que interactúan con la radiación incidente del sol. La energía al chocar con estas partículas puede ser dispersada, absorbida o emitida dependiendo de la longitud de onda. Por lo general a mayor longitud de onda la dispersión disminuye, en tanto, la absorción presenta comportamientos variables. Las porciones del espectro electromagnético donde la radiación no es absorbida y llega a la superficie de la Tierra se denominan ventanas atmosféricas y son de gran importancia para diseñar los sensores de los satélites para captar dentro de estas longitudes de onda (CIAT, 2004).

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) (Alzate, 2001).

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 en días húmedos y calientes, debido a que esta densidad en las capas atmosféricas se altera (Alzate, 2001).

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 27 micrómetros.

Ventana atmosférica

La ventana atmosférica es el nombre de las longitudes de onda en las que la atmósfera es "translúcida" y a través de las cuales la emisión y la reflexión pasan con mayor facilidad. En otras longitudes de onda, la radiación es absorbida por varios gases de invernadero. Incluso si la teledetección se realiza en ventanas atmosféricas, ésta se ve interferida hasta cierto punto por la difusión y la absorción de la atmósfera. Por eso, la teledetección a menudo queda ligeramente distorsionada y debe ajustarse mediante una posterior manipulación digital de la imagen (Alzate, 2001).

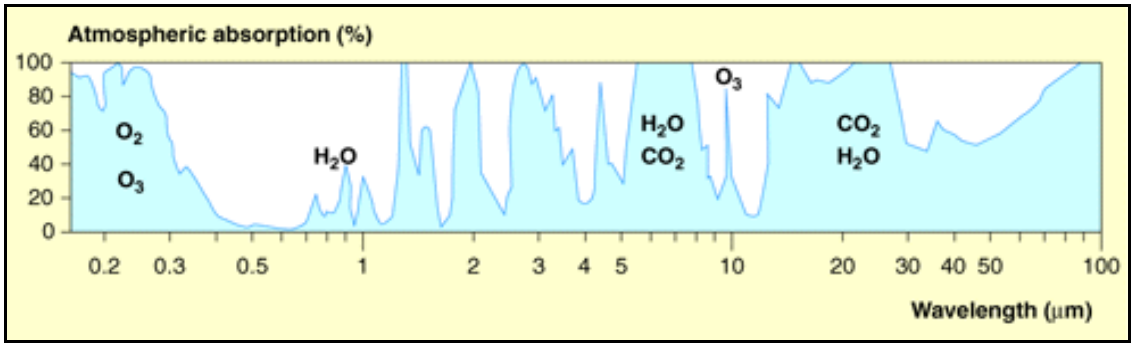


Figura 2.21. Ventanas atmosféricas. Modificado de http://www.eduspace.esa.int/subtopic/images/07-atmosvindue.gif

2.2.5.3 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, 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. 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).

La radiación electromagnética al interactuar con los objetos es modificada de manera que la energía resultante incorpora información que caracteriza al objeto y en consecuencia indirectamente permite su análisis (Méndez, 2002).

2.2.5.3.1 INTERACCIÓN, RADIACIÓN Y SUPERFICIE

La energía que llega a los cuerpos incide en la superficie y puede sufrir tres procesos: ser reflejada (R), absorbida (A) o transmitida (T), por lo tanto la energía incidente (I) será la sumatoria de todos los anteriores procesos.

$$\mathbf{I = R + A + T}$$



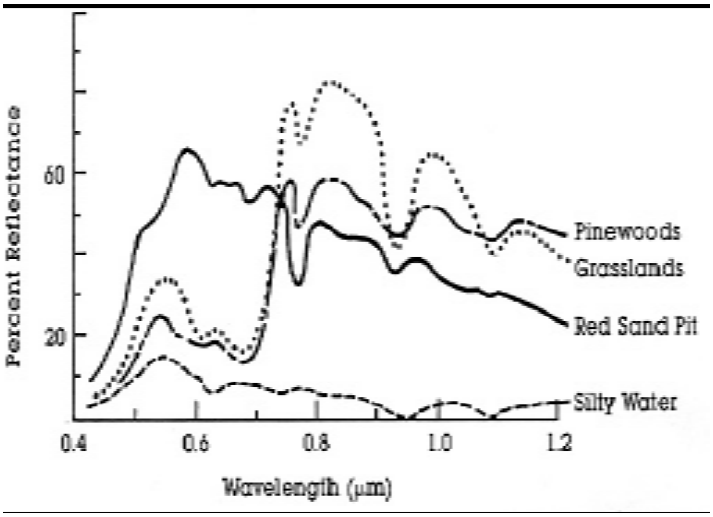
Figura 2.22. La energía incidente, A absorción, R reflexión, T transmisión Tomado del CCRS (2007)

La energía reflejada y el calor que los cuerpos emiten, es la energía que los sensores de los satélites reciben después de interactuar nuevamente con la atmósfera.

Respuesta espectral

La respuesta espectral es el comportamiento de los cuerpos ante la incidencia de radiaciones electromagnéticas de distinta frecuencia. La respuesta de los cuerpos a la energía incidente no siempre será la misma, dependerá de varios factores tales como:

- Angulo de incidencia de la energía con el cuerpo (varia según fecha, año y recorrido del satélite).
- Aspecto del relieve.
- Interacción atmosférica con las distintas longitudes de onda.
- Variaciones ambientales.
- Angulo de observación.



• Bosque de Pinos
• Pastizal
• Arenisca roja
• Aguas con sedimentos en suspensión

Figura 2.23. Firmas espectrales de distintas cubiertas terrestres Tomado de: http://fanpaulieb.blogspot.com/

Reflectividad

La reflectividad de los cuerpos varía según la longitud de onda que incide sobre ellos, normalmente la reflectividad de los cuerpos aumenta a medida que la longitud de onda disminuye, no obstante existen cuerpos donde esta relación es inversa (nieve) o irregular (vegetación).

Repuesta de la vegetación

Para realizar un análisis de la superficie de la vegetación a través de imágenes de satélite hay que tener en cuenta aspectos como la morfología de la cubierta (estado fenológico, proporción de sombras, geometría del follaje, etc.), y el estado fenológico, la ubicación en el relieve y su asociación con otras cubiertas o especies.

Repuesta del suelo

La respuesta del suelo a la reflectividad de las longitudes de onda está influenciada por características como la composición química, textura, estructura y contenido de humedad.

Repuesta del agua

La respuesta del agua varía según la longitud de onda; dentro del espectro óptico e infrarrojo, el agua tiende a absorber la energía a medida que la longitud de onda aumenta; en el caso de las microondas, éstas son reflejadas especularmente si el agua está tranquila, cuando hay turbulencia u oleajes la energía es reflejada en varias direcciones.

2.2.5.4 REFLACTANCIA ESPECTRAL

Todos los elementos de la naturaleza tienen una firma espectral. 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).

La intensidad de la energía que un objeto radia depende básicamente de su temperatura en una relación directa. Se usa el término "Longitud de Onda" para definir esta energía radiada (o radiación), porque sabemos que la forma en la que la energía viaja por el espacio o a través de cuerpos y fluidos se asemeja a una onda sinusoidal. Las diferentes cubiertas no presentan un comportamiento único y permanente que coincida con las curvas de reflectividad espectral y que permitan reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. Cada cubierta tiene una variabilidad determinada por varios factores (ángulo de iluminación solar, relieve, influencias atmosféricas, ángulo de observación.) que dificultan en algunos casos su discriminación.

El parámetro que mide las características de los objetos ante la reflexión, es la llamada “reflectancia espectral” y se mide como una función de la longitud de onda. Los blancos tales como tierra y agua en la superficie, y las gotas de agua y los cristales de hielo en la atmósfera, reflejan, absorben, emiten y transmiten la energía radiante sobre un amplio rango de longitudes de onda.

La reflectancia espectral puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{R_\lambda = (E_R (\lambda) / E_i (\lambda)) X 100}$$ donde,

$\mathbf{R_\lambda}$ es la reflectancia espectral

$\mathbf{E_R (\lambda)}$ es la energía de longitud de onda λ reflejada por un objeto

$\mathbf{E_i (\lambda)}$ es la energía de longitud de onda λ que incide sobre el objeto

La teledetección se basa en la interacción del espectro electromagnético y la cubierta terrestre. Cuando realizamos un gráfico en el que representamos la cantidad de la radiación reflejada por una superficie y la relacionamos con la longitud de onda de la onda electromagnética, obtenemos lo que se denomina firma espectral.

Conociendo la firma espectral de la cubierta que necesitamos estudiar, podemos clasificar de manera más o menos sencilla, los píxeles correspondientes a dicha cubierta. La firma espectral de los objetos contenidos en una imagen es lo que con más frecuencia se utiliza para clasificar las imágenes y obtener mapas temáticos categorizados en diferentes clases, que brindan información sobre la superficie terrestre (Campbell, 1981).

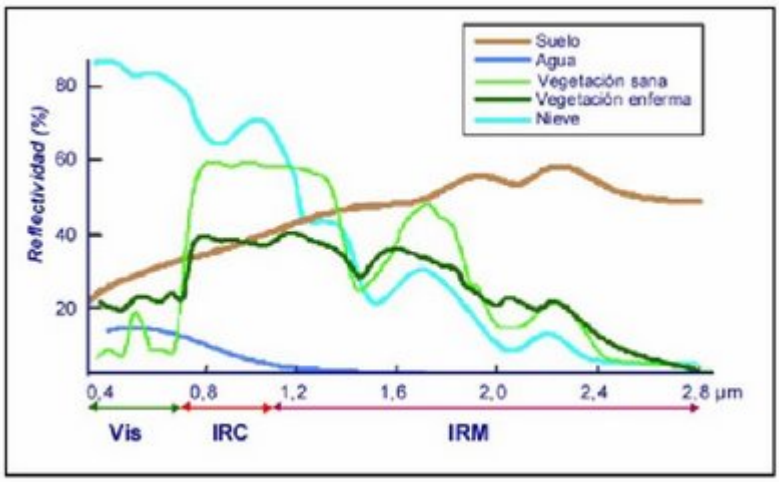


Figura 2.24. Firma espectral para distintos tipos de cubiertas. Tomado de: http://fanpaulieb.blogspot.com/

Estas propiedades se pueden representar en la firma espectral que muestra la reflectancia de cualquier cubierta en función de la longitud de onda. La figura 2.24 representa la gráfica de la firma espectral de tres cubiertas. La curva que toma los valores más altos corresponde a la hierba verde y húmeda, la curva intermedia es la reflectancia que muestra un tipo de pino forestal representativo y la tercera curva corresponde a la hierba seca con poca actividad fotosintética (Campbell, 1981).

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. Lo inverso 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).

2.2.5.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información.

Existe una gran variedad de software diseñado para este fin. Entre algunos de los más versátiles se encuentran: ENVI® 4.2, ArcGIS® 9.1 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:

2.2.5.5.1 ENVI® 4.2

ENVI es un sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral 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 (INNOVA CAD VISION, 2001).

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 (INNOVA CAD VISION, 2001).

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 (INNOVA CAD VISION, 2001).

2.2.5.5.2 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).

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. 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 Geoprocesamiento.
• 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.

2.2.5.5.3 ERDAS IMAGINE® 8.5

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 y la interfaz fácil de usar, presenta a los usuarios con un 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 hiperespectrales en ambientes de dos (2D) y tres dimensiones (3D) (IDAS, 2008).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología en el manejo de la imagen Landsat 7 ETM

El objetivo fundamental del procesamiento digital de las imágenes es permitir manipular y analizar los datos de las mismas, las cuales para un optimo empleo se requieren correcciones que remueven los efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales, dichas correcciones son consideradas como pre-procesamiento de las imágenes. Primero que nada se procede a 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, azimut, etc., misma información que se necesita para el procesamiento de las imágenes. 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 80 pues el rango en el espectro electromagnético en el que se encontraban no aportaba información útil o relevante, pero si se descargaron y emplearon las imágenes correspondientes a las bandas 10, 20, 30, 40, 50 y 70, a las cuales se le aplicaron las debidas correcciones.

La imagen empleada en este trabajo, que cubría la zona de estudio, fue la identificada en la grilla de la Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility, con el número P008R053, Una vez adquirido el conjunto de imágenes en formato TIFF y la metadata, se realizan los siguientes pasos:

El PRE-Procesamiento consiste en calibrar la imagen de acuerdo a un conjunto de correcciones que minimizan errores generados en la toma de la misma

como lo son el ruido atmosférico, etc. y así obtener imágenes más puras visualmente para el ojo humano con el fin de que las mismas sean útiles para poder interpretarlas.

3.1.1 Corrección de Radianza.

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 conversión del ND a radiancia absoluta es un procedimiento necesario para comparar imágenes tomadas por diferentes sensores.

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 (Lmin) y la máxima (Lmax) radiancia medida por un detector sobre la banda espectral del canal. Lmin es la radiancia espectral correspondiente al valor del ND mínimo (usualmente 0). Lmax es la radiancia espectral correspondiente al máximo ND (usualmente 255). No solamente cada sensor, sino cada banda dentro del mismo sensor tienen su propio Lmax y Lmin. 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).

Con estas correcciones minimizaremos los defectos encontrados en estas imágenes producto de elementos distorsionantes como gases en la atmósfera y vapor de agua. Los comandos principales para realizar dichas correcciones, son los siguientes:

1. En el menú principal de ENVI, 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 ETM (Figura 3.1.)

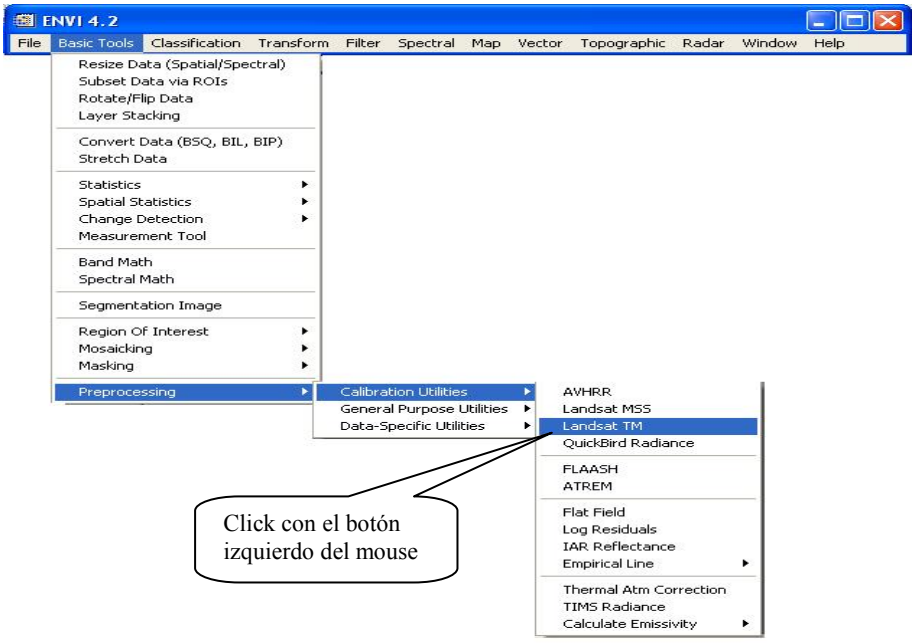


Figura 3.1. Modulo de la calibración LANDSAT ETM

Una vez aplicada la corrección en cada una de las siete (7) bandas, se obtienen estas, con los mínimos defectos distorsionantes (figura 3.2.).

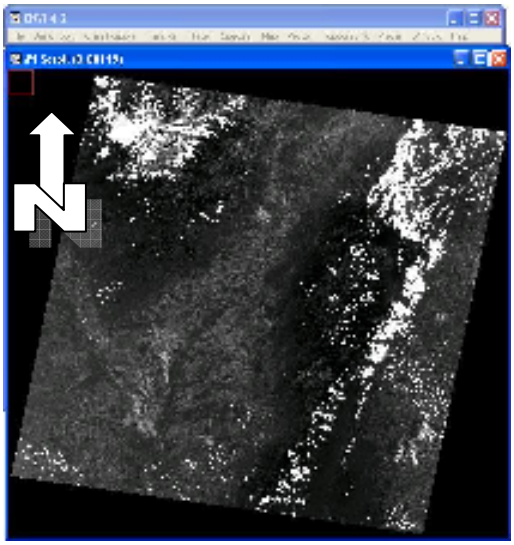


Figura 3.2. Banda 10 LANDSAT ETM debidamente corregida, las correcciones no muestran muchos cambios ya que estos son perceptibles a los comandos de ENVI.

3.1.2 Fusión de Bandas

Cada imagen TIFF representa a una imagen obtenida en una banda del sensor. Todas las imágenes anteriormente corregidas de la radianza, deben ser apiladas en una sola imagen, para seguirle realizando los debidos procedimientos y correcciones pertinentes, 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. Este procedimiento nos permite confinar todas las bandas en una sola y así realizarle las combinaciones de bandas. Para esto se sigue del siguiente modo:

1. En el menú principal de ENVI, se selecciona la opción Basic Tools. Luego en el menú desplegable que aparece, se sitúa el puntero del ratón en la opción Layer Stacking (Figura 3.3).

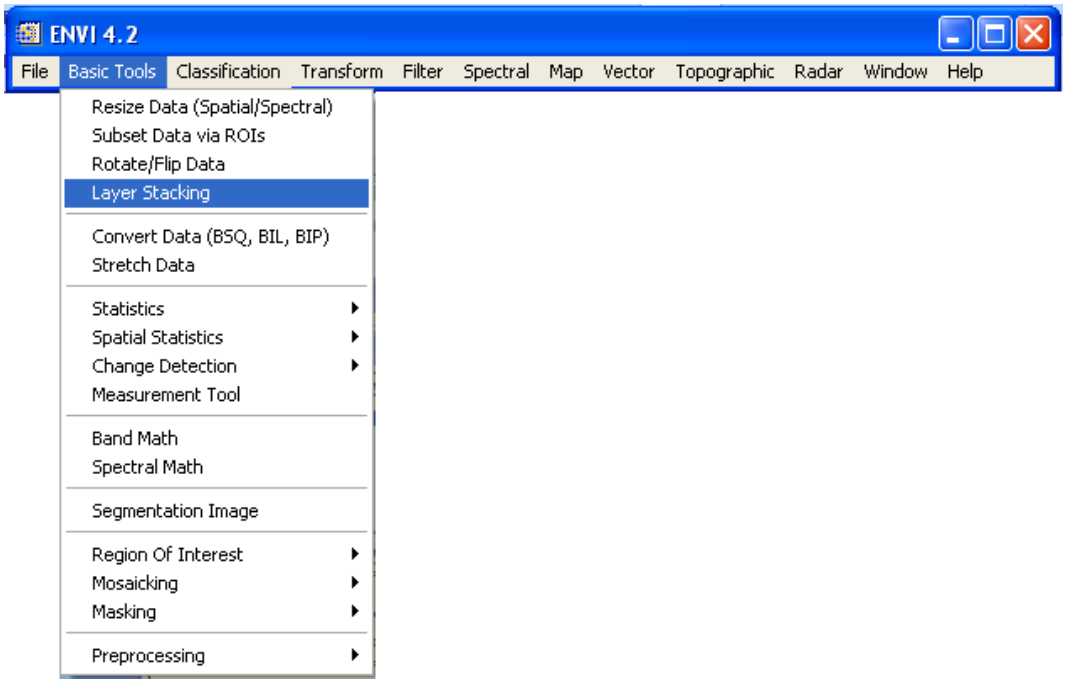


Figura 3.3. Comando para realizar el Layer Stacking.

2. Posteriormente se introducen los parámetros, la ruta y nombre de salida del procedimiento, con lo cual obtendremos el siguiente resultado. (Figura 3.4.)

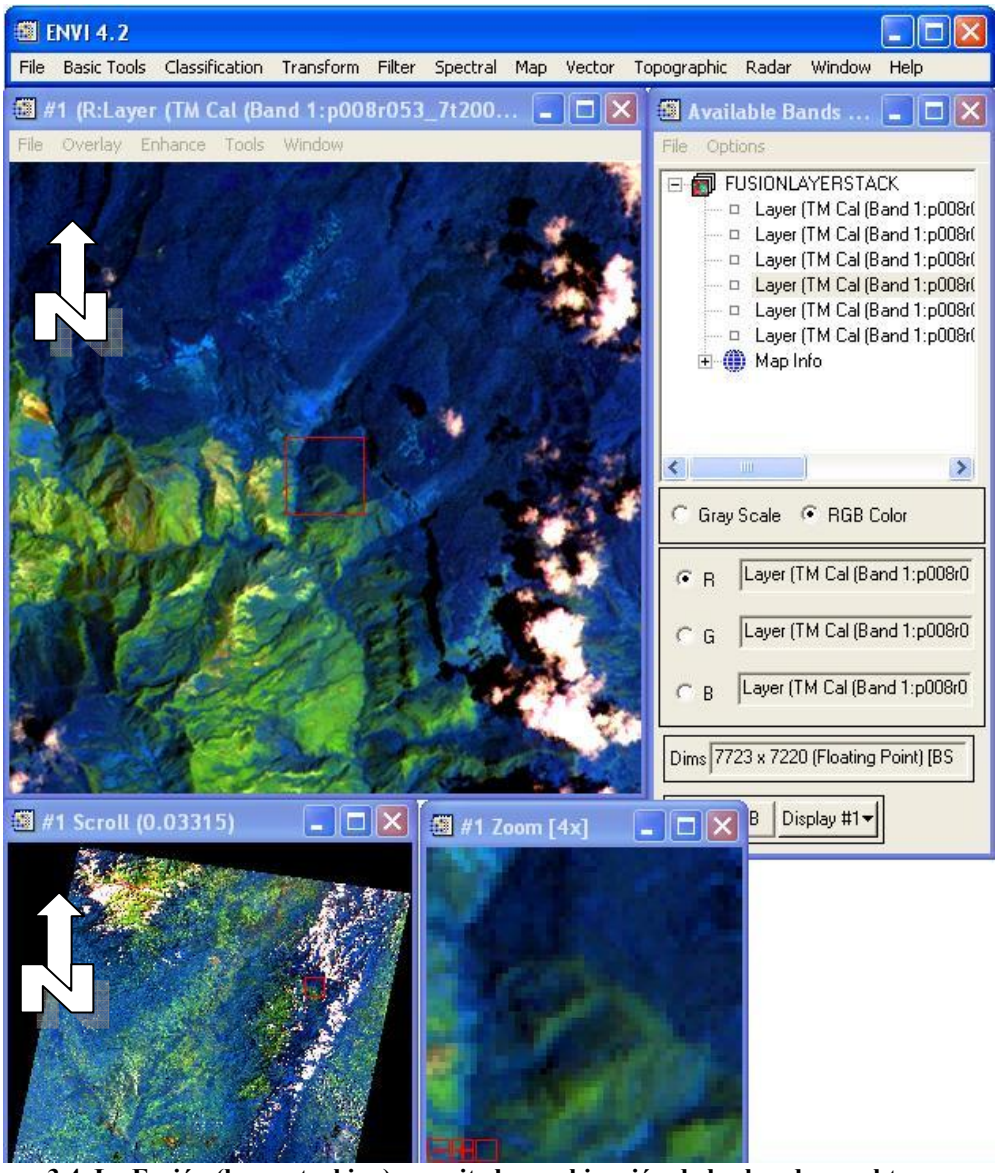


Figura 3.4. La Fusión (layer stacking) permite la combinación de las bandas, y obtener un solo archivo. Combinación: R G B 30, 50 y 40.

3.1.3 Conversión a Formato BIL

Los archivos de salida generados en el paso anterior (Layer Stacking) 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 3.5.)

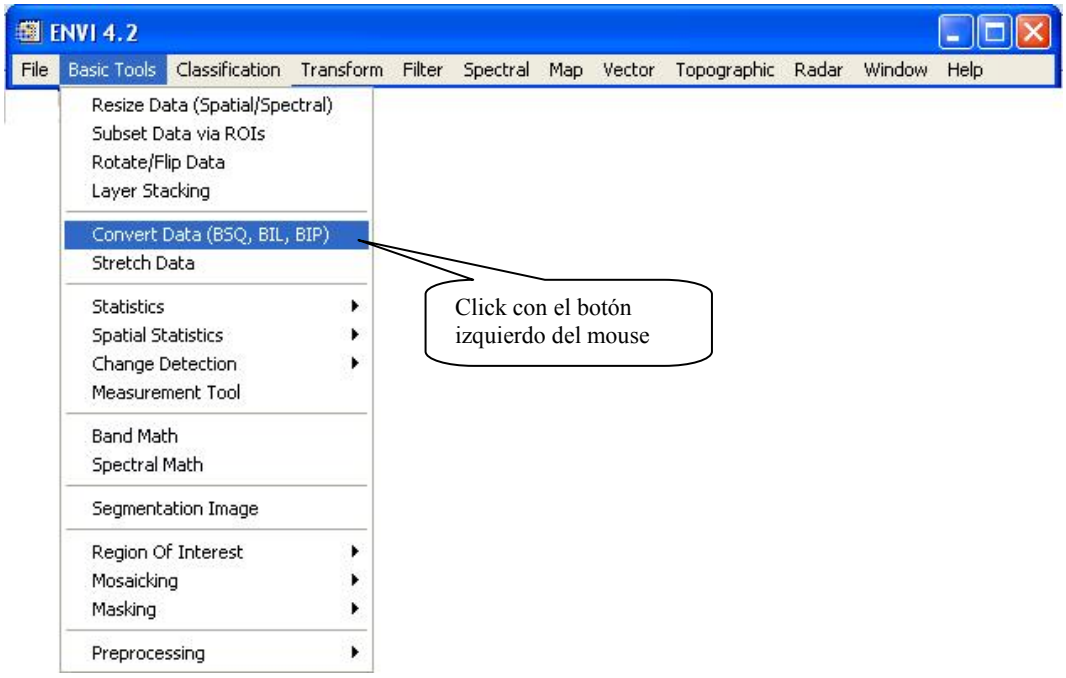


Figura 3.5. Comando de transformación de BSQ a BIL.

2. Finalizado el procedimiento, queda una imagen en formato BIL, formato que sirve para obtener imágenes corregidas geométricamente de gran utilidad para la cartografía de la zona, después de la utilización de técnicas de tratamiento digital.

3.1.4 Corrección Atmosférica (FLAASH)

El comando de corrección atmosférica utilizado por el ENVI® 4.2 es llamado FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Análisis 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**, y se selecciona la opción **FLAASH** (Figura 3.6).

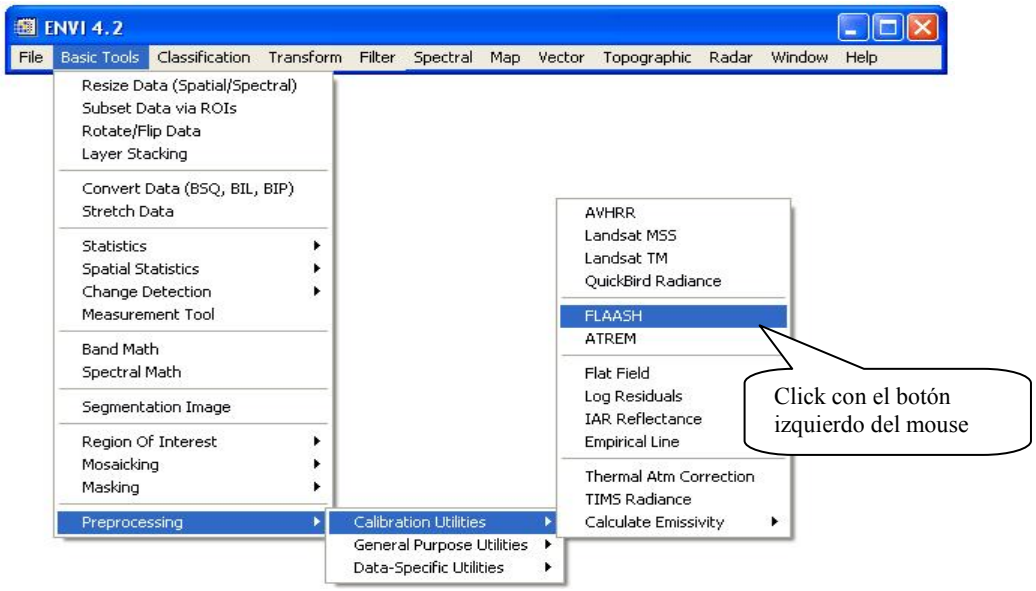
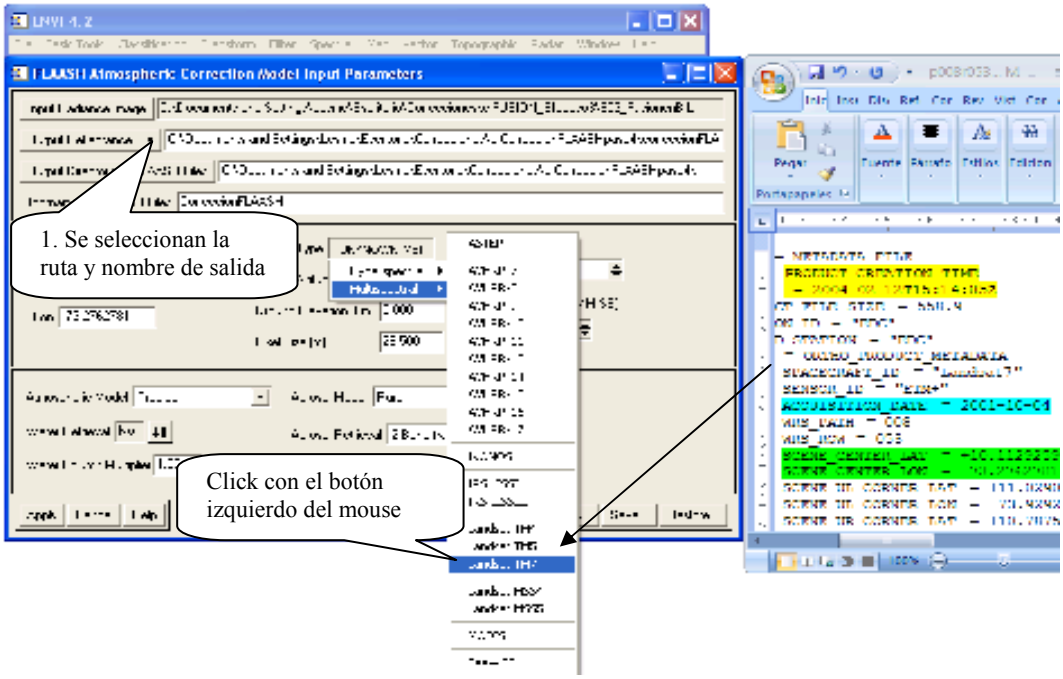


Figura 3.6. Comando para la calibración FLAASH

3. Posteriormente se introducen todos los parámetros que se requieren para la corrección, dados en la metadata, seleccionando incluso ruta y nombre de salida. (Figuras 3.7, 3.8, 3.9.)



3.7. Comando para la corrección atmosférica FLAASH.

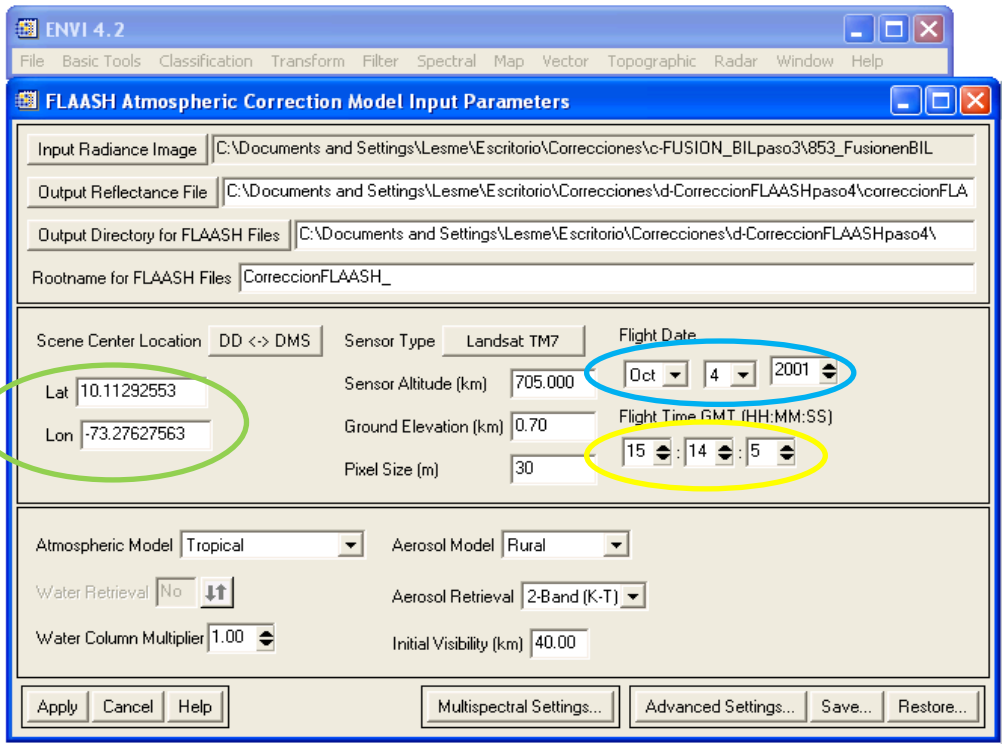


Figura 3.8. Modulo de la corrección FLAASH, mostrando la inserción de los valores encontrados en la metadata.

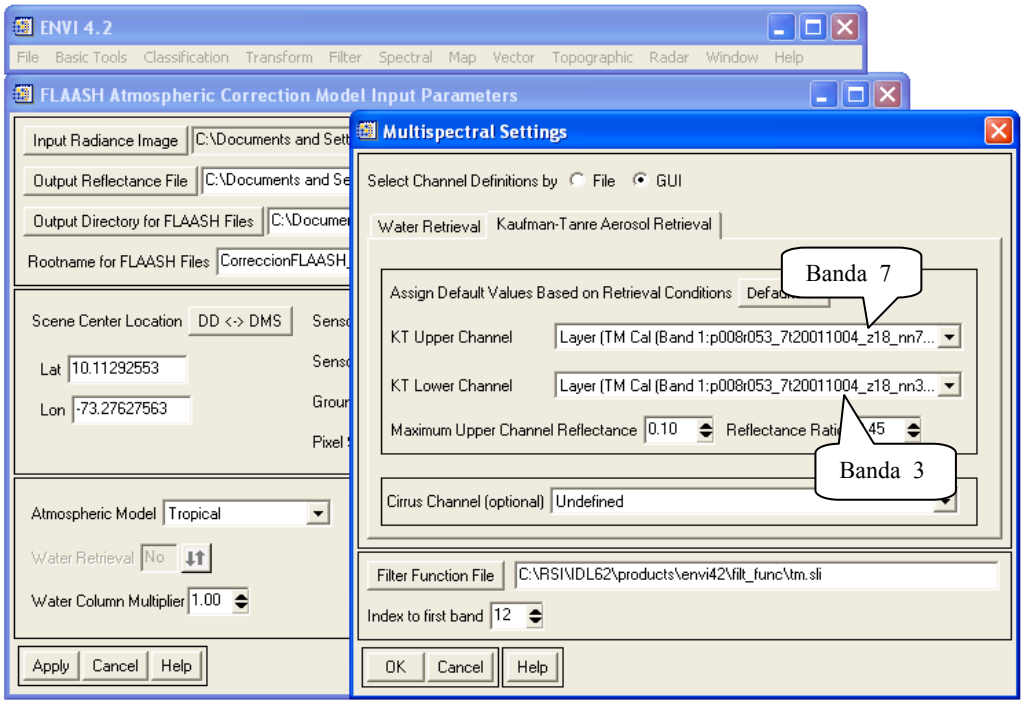


Figura 3.9. Parte de la calibración FLAASH.

4. Una vez realizados los pasos e ingresados los valores requeridos se pulsa el botón de acción **Apply**, mostrando una ventana de progreso y se observan los resultados de la corrección FLAASH (Figura 3.10).

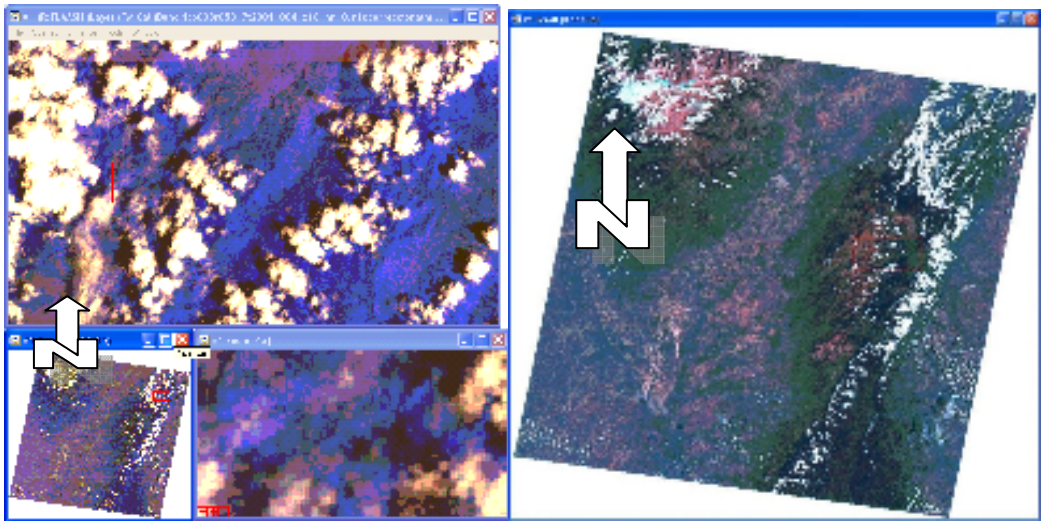


Figura 3.10. Resultado de la corrección FLAASH, se obtiene una única imagen sin efectos de distorsión atmosférica.

3.1.4 Corrección de la Fracción Mínima de Ruido (MNF)

Las interferencias mecánicas ocurridas en el sistema mientras se toman los datos producen efectos de ruido en las imágenes, degradando la señal registrada o eliminando la información radiométrica contenida.

Mediante este procedimiento de corrección de la Fracción Mínima de Ruido se 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. Antes de la corrección de la fracción mínima de ruido se deben extraer da la imagen las nubes y sus sombras, debido a que representan valores extremos en la imagen, y al realizar el procedimiento estos extremos no resultan

útiles para el análisis. Para esto se procede a generar un archivo "shapefile" en ArcGis® 9.1 en el cual se procede a realizar el "shapefile" de nubes o como se conoce vectorizar las nubes y sus sombras.

Para la realización del proceso antes descrito se requiere que la imagen "raster" o la imagen a trabajar se encuentre en extensión IMG, ya que este es el formato que requiere el ArcGis® 9.1. El archivo de salida de la corrección FLAASH realizado en el paso anterior se encuentra en formato TIFF, y requerimos transformarlo a IMG con el modulo del paquete ERDAS IMAGINE® 8.5 de la siguiente manera:

1. Conversión de cada banda en IMG: en la barra de menú principal del ERDAS se presiona el botón que corresponde a la opción **Import,** 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.** Luego se selecciona la ruta y nombre de salida (Figura 3.11). Este paso se aplica para todas las bandas.

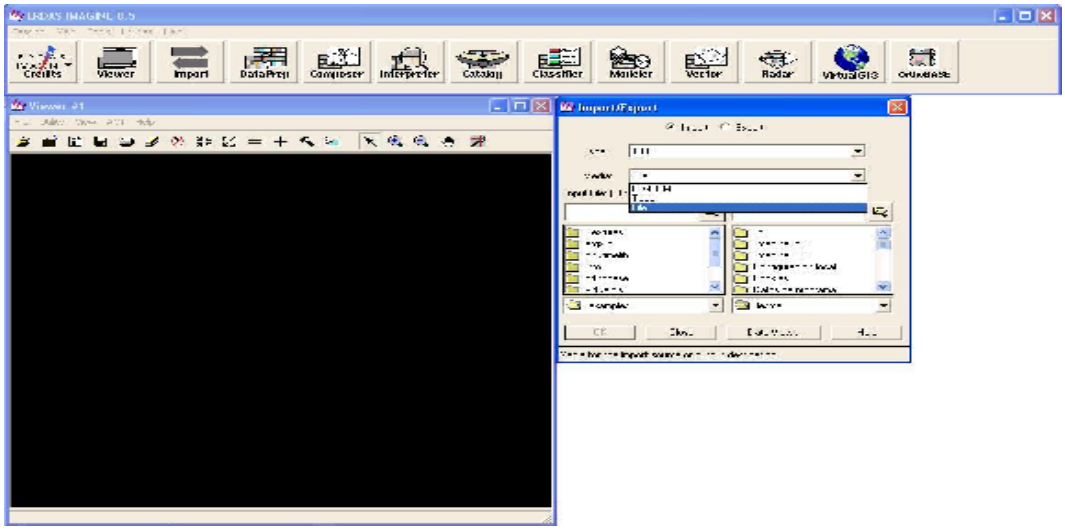


Figura 3.11. Comando para la conversión de TIFF a IMG.

2. Unión de bandas en IMG: debido a que en el paso anterior obtenemos seis (6) imágenes correspondientes a cada una de las bandas: 10, 20, 30, 40, 50 y 70, debemos proceder a unirlas en una sola para realizarle los consecutivos procedimientos, para esto seguimos del siguiente modo:

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, seleccionando cada archivo creado anteriormente, se elige la ruta y nombre de salida. (Figura 3.12).

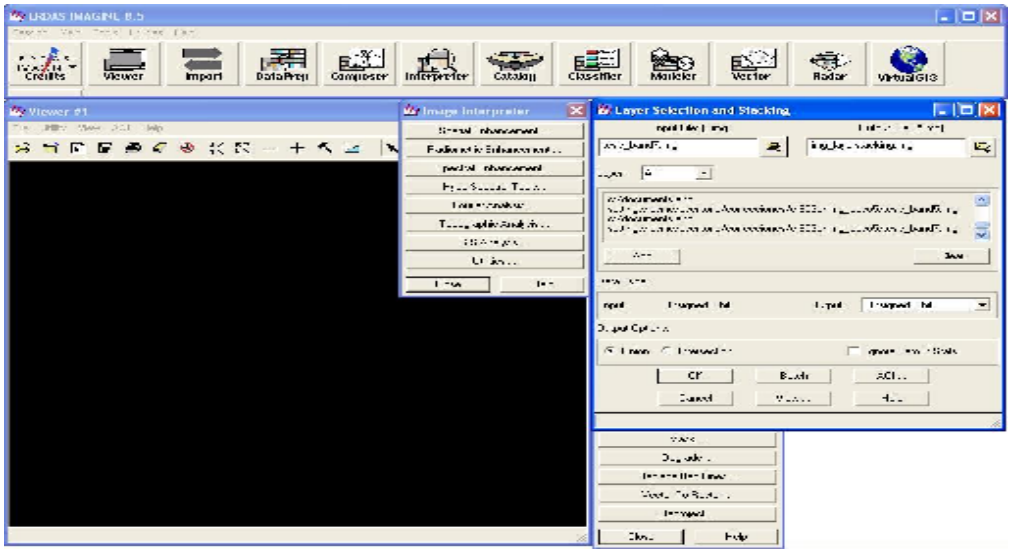


Figura 3.12. Comandos para fusionar las bandas de IMG en ERDAS

3.1.6 Creación y Georeferenciación del Archivo Shapefile en ArcGIS® 9.1

En el menú principal de **ArcGis**, se abre la sección **Arc Catalog** del software **ArcGis**, a continuación pulsar el botón derecho del ratón y en el menú desplegable seleccionar la opción **New** y luego **Shapefile**, 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** y luego pulsar el botón de acción **Ok**. (Figura 3.13)

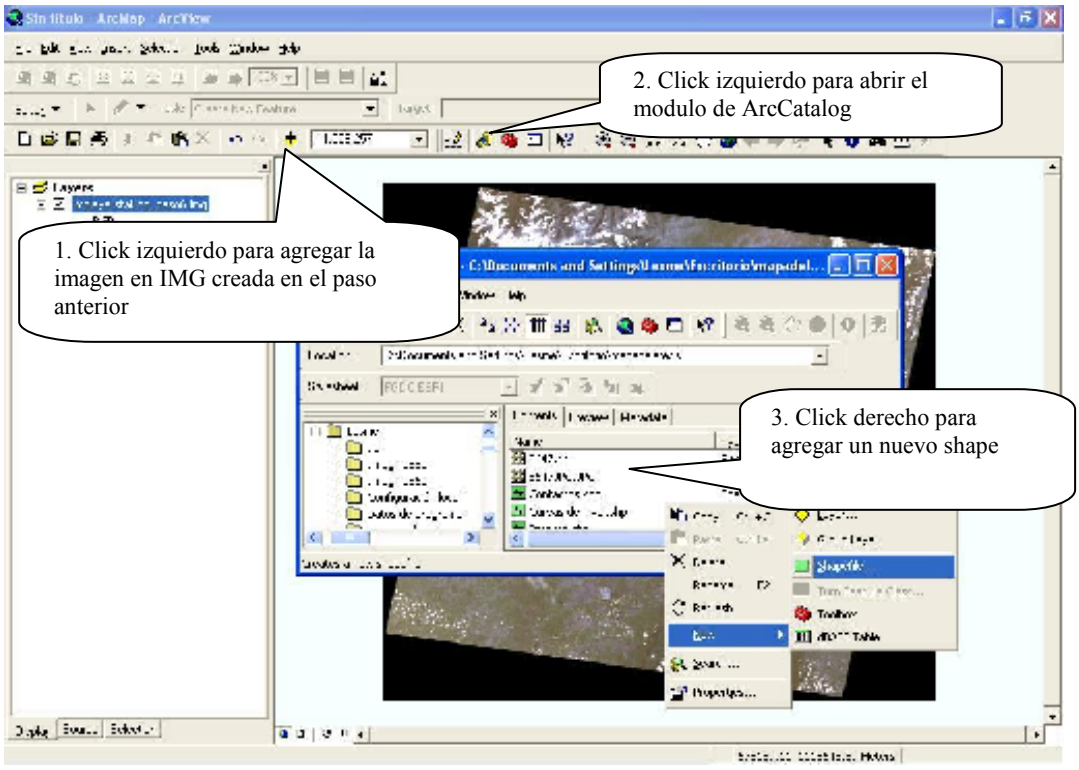


Figura 3.13. Creación del Archivo Shape en ArcGIS® 9.1

Georeferenciación del Archivo Shape: luego de creado el archivo shape debe ser georeferenciado, para esto se hace click derecho sobre el shapefile a editar y luego click al botón "edit…", con lo cual se despliega la ventana propiedades de **Properties of Spatial Reference**, se hace click sobre el botón "import…" 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 3.14).

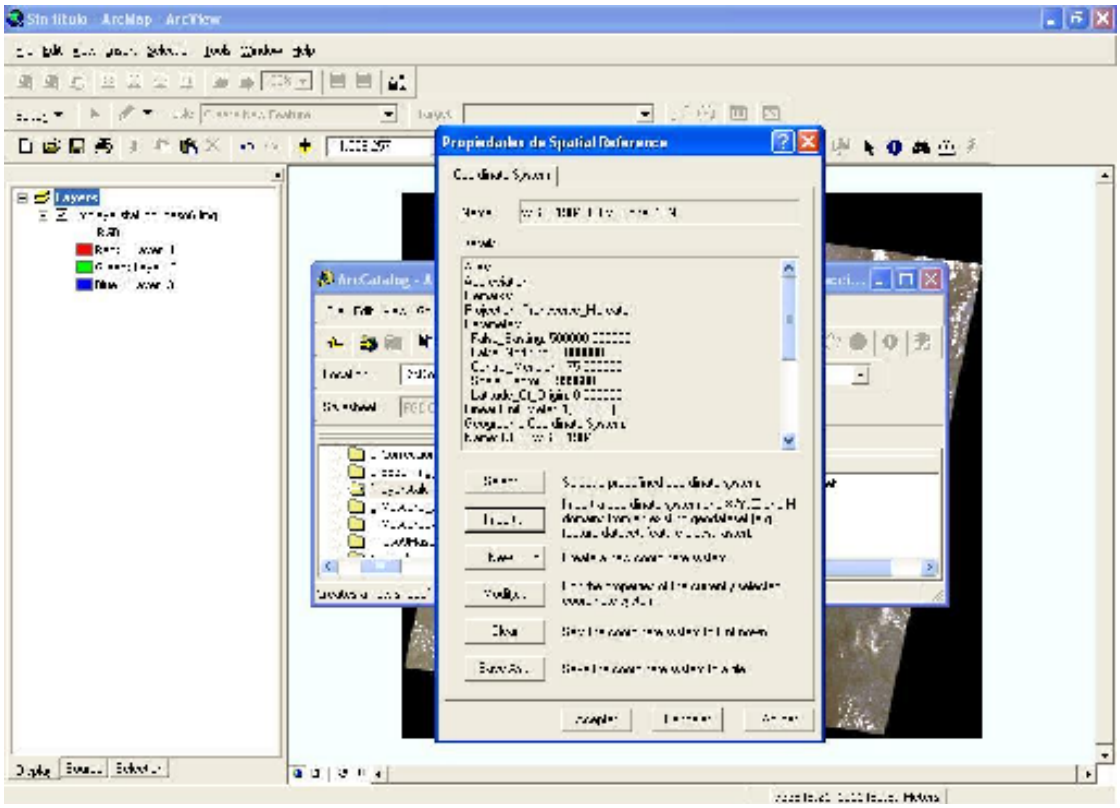


Figura 3.14. Georeferenciación de la máscara de nubes.

Una vez creado y georeferenciado el shape se procede a editar los polígonos para lo cual se debe pulsar el botón Editor ubicado en la barra de herramientas y en el menú desplegable seleccionar la opción **Start Editing**, y luego se pulsa sobre el icono **Sketch Tool** y se empieza el proceso de delimitar el borde de las nubes y de sus respectivas sombras, creando un polígono cerrado (Figura 3.15).

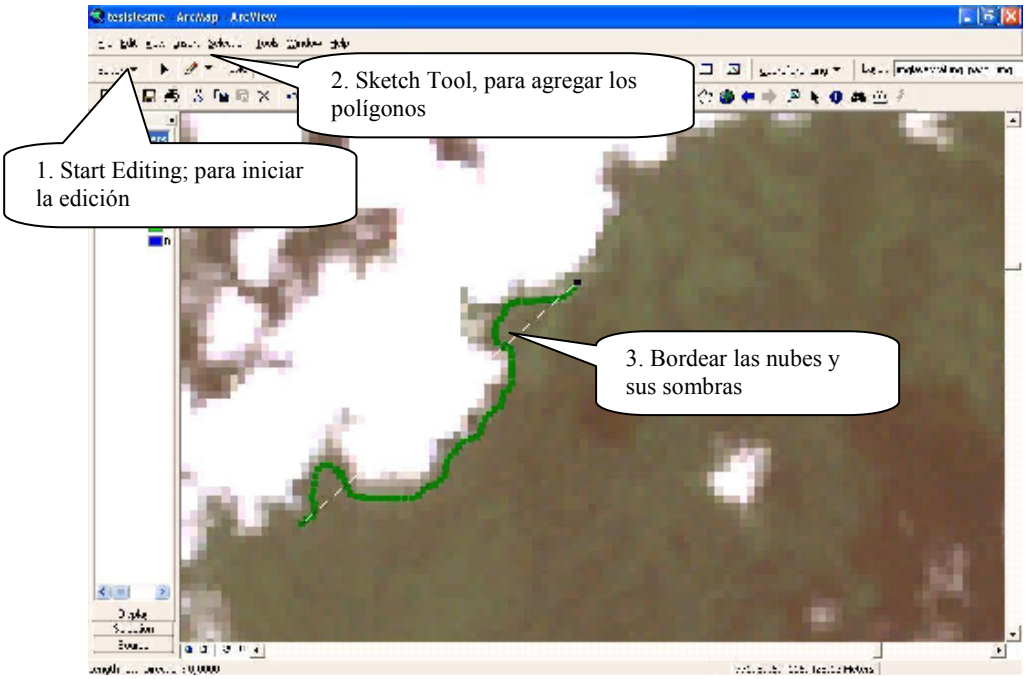


Figura 3.15. Edición de los polígonos del shapefile para hacer la mascara de nubes.

El archivo generado denominado shapefile (mascara de nubes) se debe importar al programa ENVI® 4.2, para continuar realizando los procedimientos del análisis de la imagen satelital, para esto se generara una máscara que se adjunta a la imagen concebida 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:

3.1.7 Construcción de la Mascara

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) (Figuras 3.16 y 3.17).

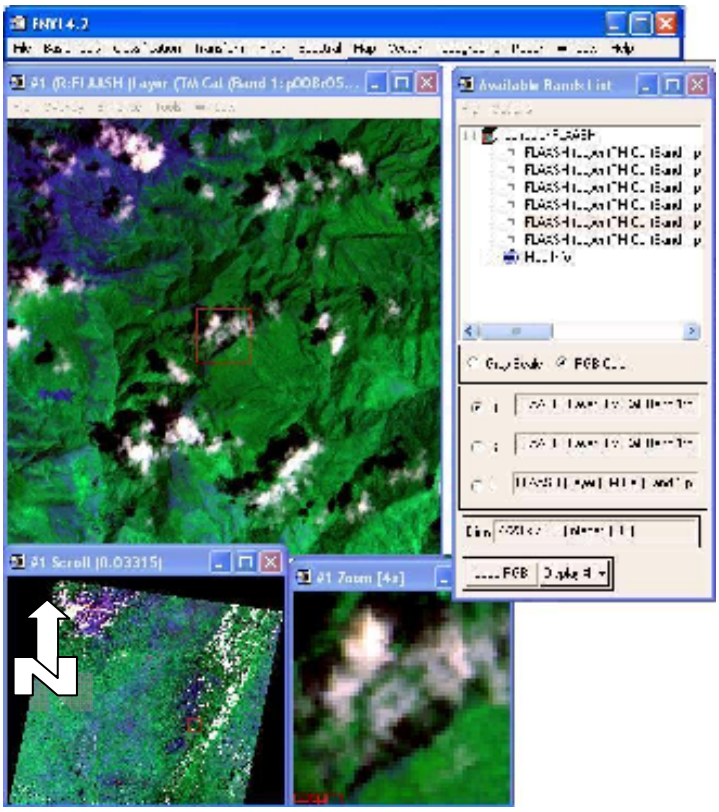


Figura 3.16. Construcción de la máscara a ENVI

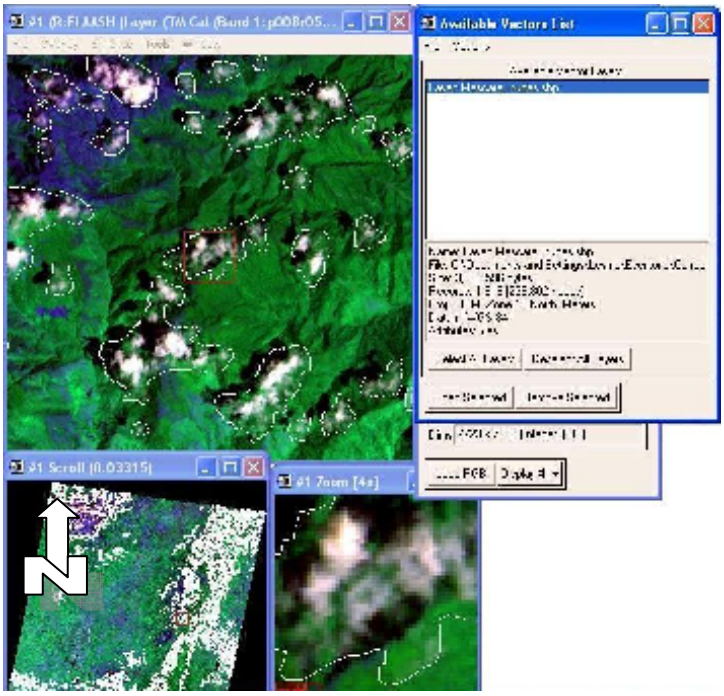


Figura 3.17. Transformación de la máscara de las nubes y sombras, se aprecia el contorno del polígono sobre las nubes.

Una vez ingresados todos los parámetros del procedimiento para exportar la máscara de extensión .evf o archivo creado en ArcGIS a ROI, que es la extensión necesaria para realizar las correcciones en ENVI, se procede a realizar finalmente la corrección de la fracción mínima de ruido:

3.1.8 Corrección de la Fracción mínima de ruido.

En el menú principal del ENVI® 4.2 se opta el comando **Spectral** y en el menú expandido que surge, se seleccionan las opciones **MNF Rotation**, luego **Forward MNF** y **Estimate Noise Statistics from Data** (Figura 3.18).



Figura 3.18. Comando de la corrección MNF

Aparecen una serie de ventanas en las cuales se deben de realizar un conjunto de pasos e ingresar una variedad de parámetros, seleccionando de entrada el archivo de corrección atmosférica FLAASH. En este paso se elige el los límites de la corrección encerrando en un rectángulo el área de interés, con el comando **Subset by Image** (Figura 3.19). A continuación se selecciona la ruta y nombre de archivo de salida para las opciones **Output Noise Stats Filename (.sta)**, **Output MNF Stats Filename (.sta)** y **Output Filename**. (Figura 3.20).

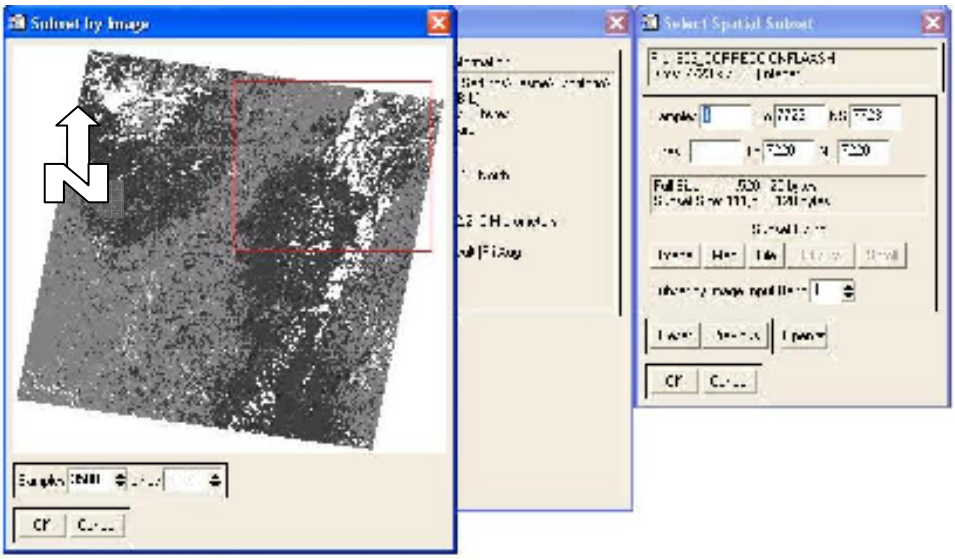


Figura 3.19. Selección del área de interés con Subset by image, se aprecia el rectángulo del área de interés

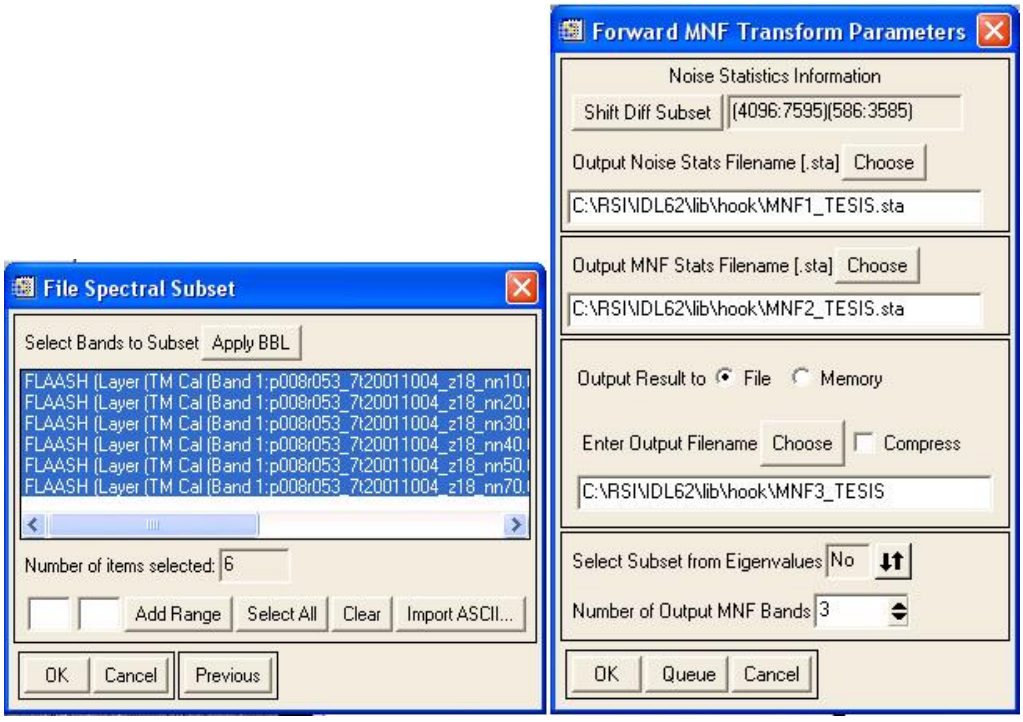


Figura 3.20. Selección de bandas, ruta y nombre de salida.

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 3.21).

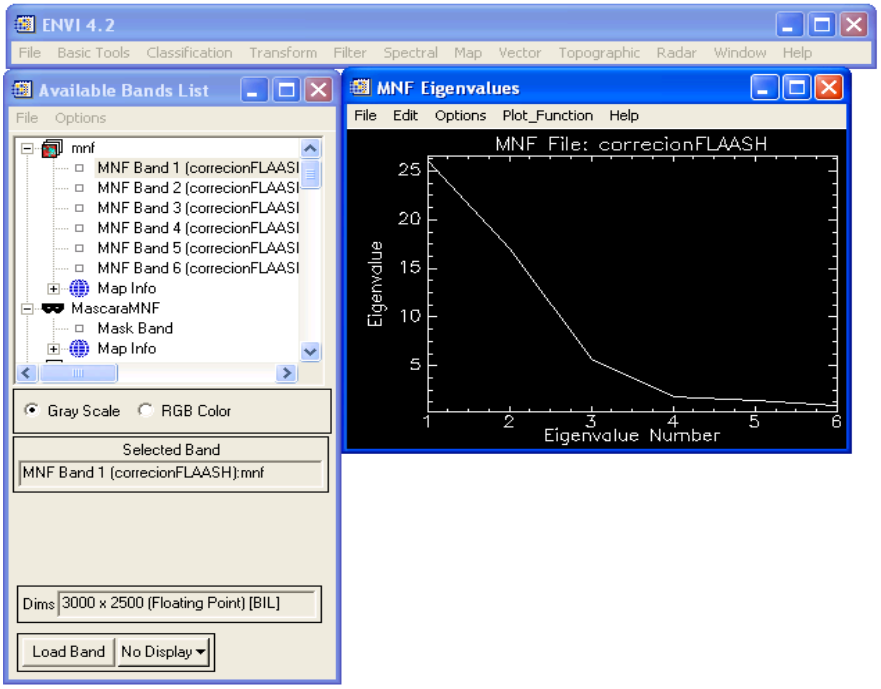


Figura 3.21. Gráfica de los MNF Eingevalues, mostrando los autovalores decrecientes con la varianza.

Por último se observa el resultado obtenido con el procedimiento del MNF (Figura 3.22).

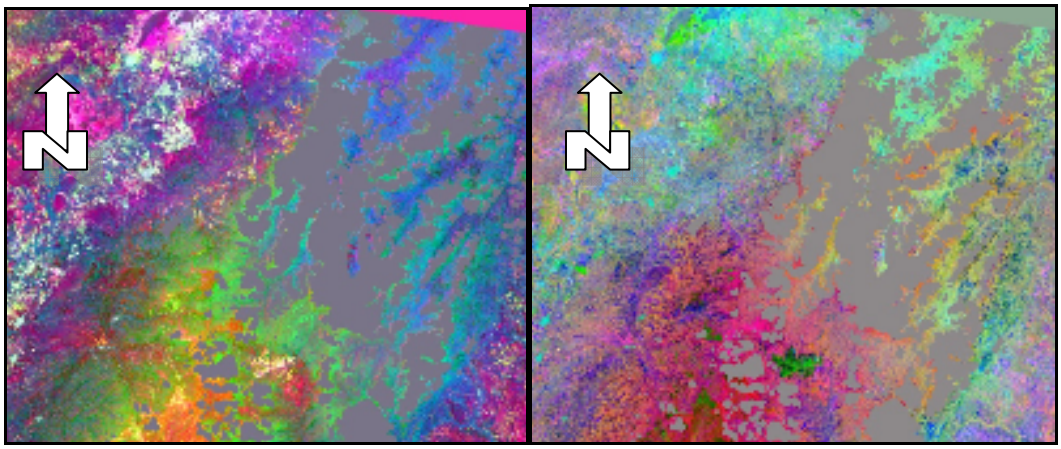


Figura 3.22. Resultado obtenido en la imagen aplicando el MNF, a la izquierda con la combinación de bandas RGB 135, y a la derecha la combinación RGB 754, se resaltan contrastes de tonalidades indicando variabilidad de litologías.

3.1.9 Índice de Pureza de Píxel (PPI)

Cuando trabajamos con datos multiespectrales, como lo son las imágenes satelitales, debemos encontrar aquellos espectralmente puros o píxeles extremos, para así trabajar con la mayor cantidad de píxeles verdaderos y eliminar aquellos que no aportan información para el análisis, por ello se emplea la herramienta Índice de Pureza de Píxel (PPI) del ENVI® 4.2.

El procedimiento para realizar este proceso 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 3.23).

2. Se selecciona el archivo de salida de la corrección atmosférica FLAASH y luego Ok, con lo cual se genera un gráfico que muestra el progreso del procedimiento 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 3.24).

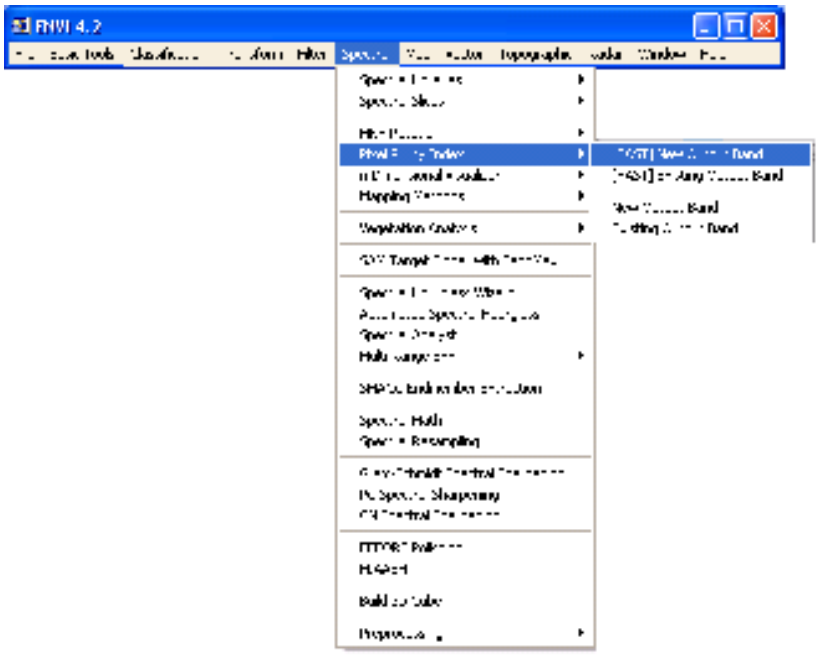


Figura 3.23. Comando para el índice de pureza de píxel.

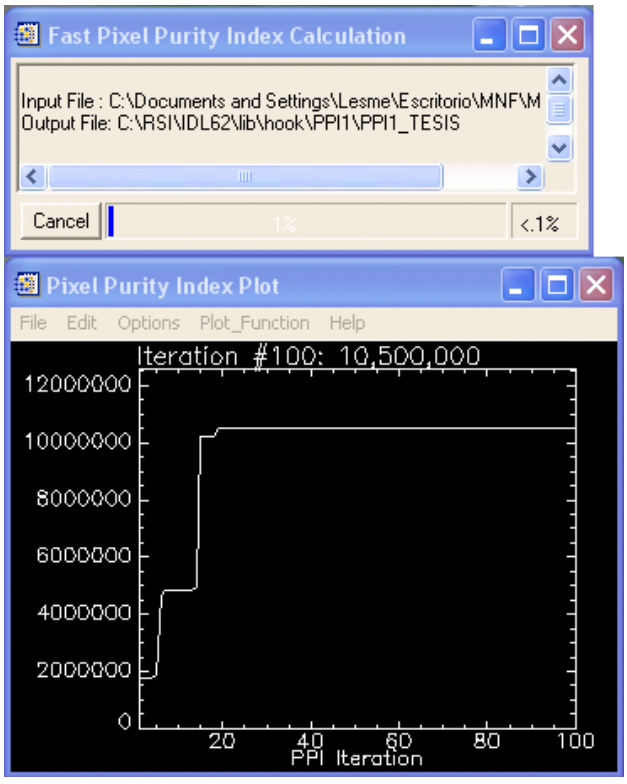


Figura 3.24. Grafica de progreso de PPI

Por último se observa el resultado obtenido con el procedimiento del PPI (Figura 3.25).

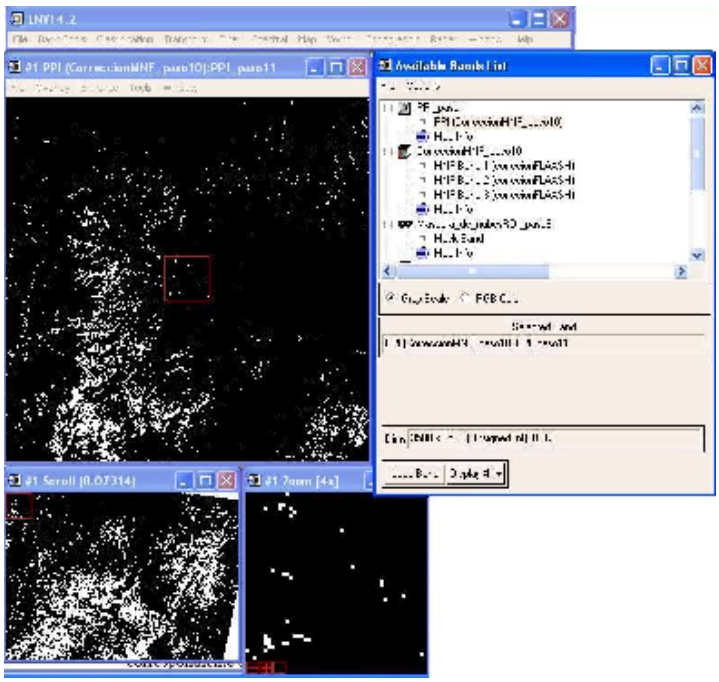


Figura 3.25. Resultado del procedimiento PPI. Muestra agrupados los pixeles espectralmente puros encontrados en la imagen.

3.1.10 Visualizador N Dimensional

El visualizador N dimensional es una herramienta del paquete ENVI® 4.2 que permite obtener los píxeles puros de la imagen, a través de la distribución del espectro de valores extremos (endmember). La distribución de los puntos permite estimar el número de valores extremos (edmember) puros espectrales, así como sus firmas espectrales. Los píxeles puros se localizan en los vértices de la figura geométrica. Para el uso de esta herramienta se debe contar con el PPI de la imagen convertido en un archivo de extensión ROI.

1. Distribución de rangos de PPI y su cantidad de píxeles.

1.1. Se abre el archivo de extensión PPI, en la barra de menú de la imagen, se selecciona la opción **Overlay** y del menú desplegable que aparece se selecciona la opción **Density Slice**, luego en la ventana de título **Density Slice Band Choice** se selecciona la banda correspondiente al **PPI** (Figura 3.26).

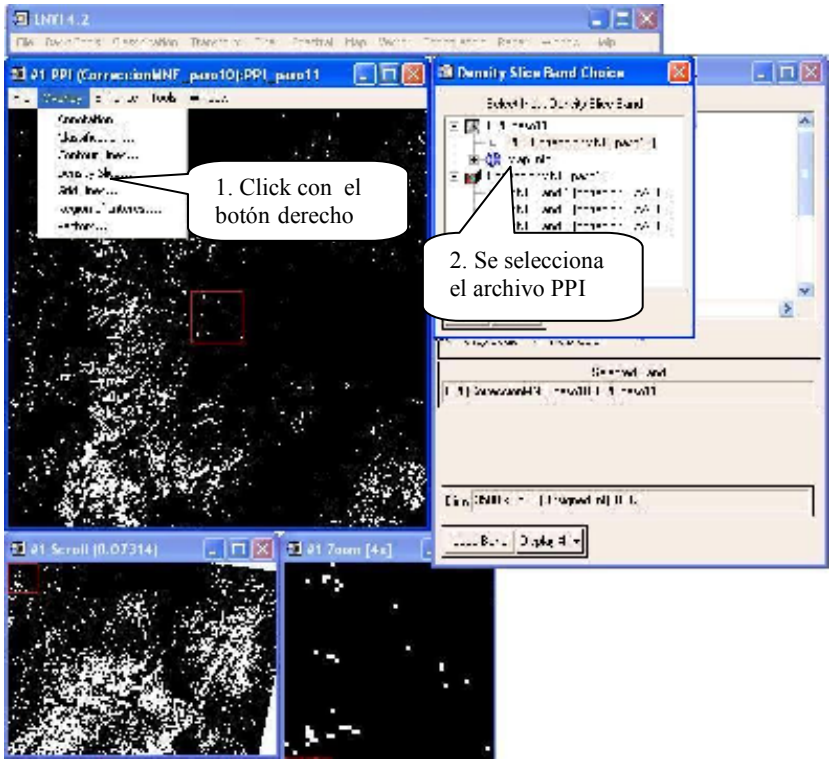


Figura 3.26. Comandos para la conversión de PPI a ROI

1.2. A continuación aparece una ventana de título **#1 Density Slice**, donde se muestra los rangos en cantidad de píxeles para cada banda (Figura 3.27).

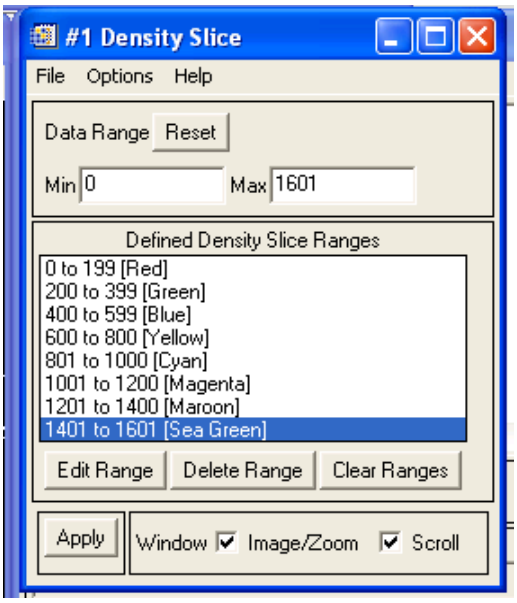


Figura 3.27. Ventana que muestra la cantidad de píxeles para cada banda.

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

2. Conversión de 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** posteriormente 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 3.28).

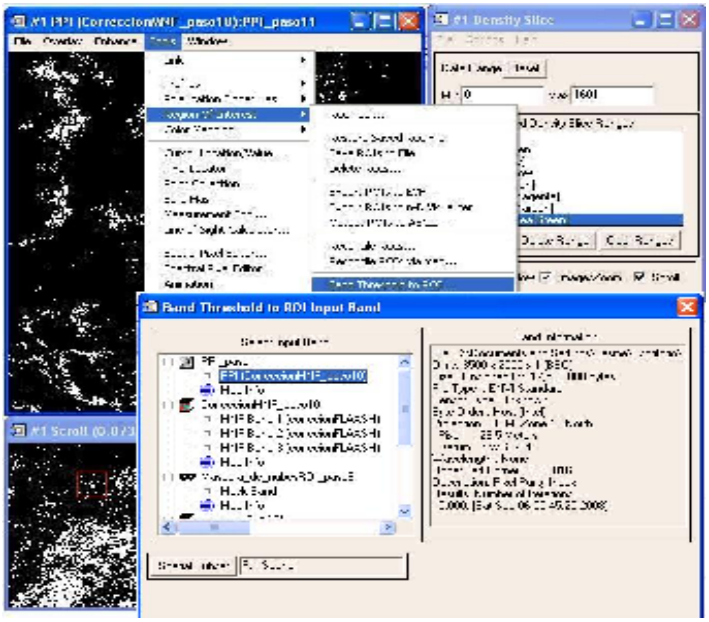


Figura 3.28 Modulo de conversión de PPI a ROI

2.2. Cuando se muestre la ventana de título **Band Threshold To ROI Parameters**, se ingresan los valores (mínimo y máximo) obtenidos de la operación de distribución de rango de los PPI. Seguidamente se pulsa el botón de acción **Ok**. 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 3.29).

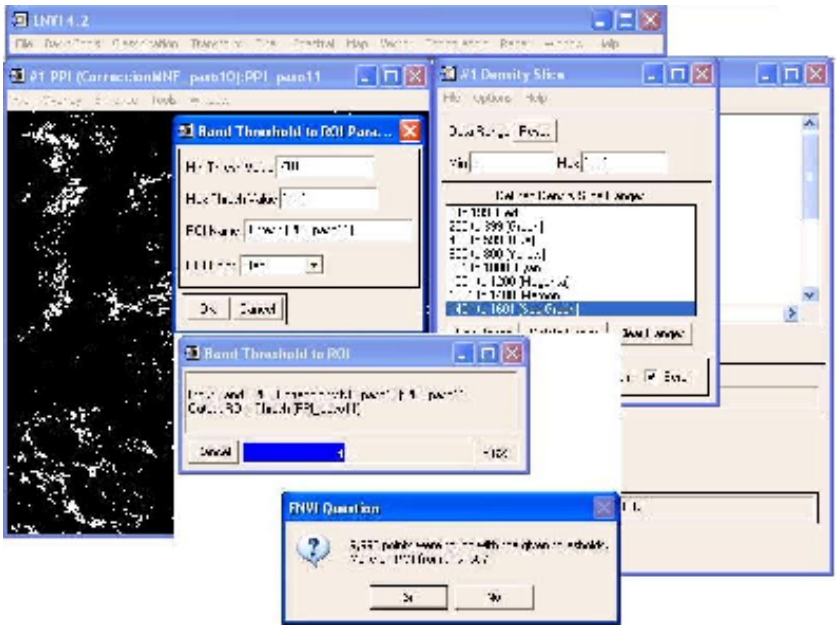


Figura 3.29. Procedimiento para la conversión de los PPI a ROI.

2.3. Seguidamente aparece una ventana de título **#1 ROI Tool**, en la cual se selecciona el archivo generado en el paso anterior y se pulsa la opción **File** del menú y se selecciona **Save ROIs**. Luego se escoge el nombre y la ruta del archivo a generar (Figura 3.30).

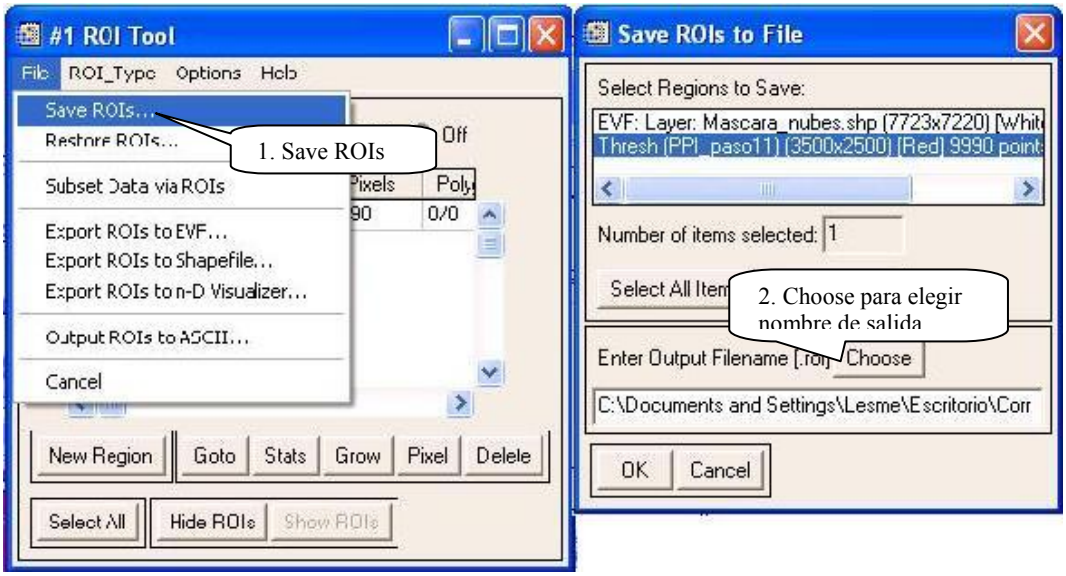


Figura 3.30. Salida del Archivo ROI

2.4. 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 3.31). Luego 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.** Posteriormente 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.**

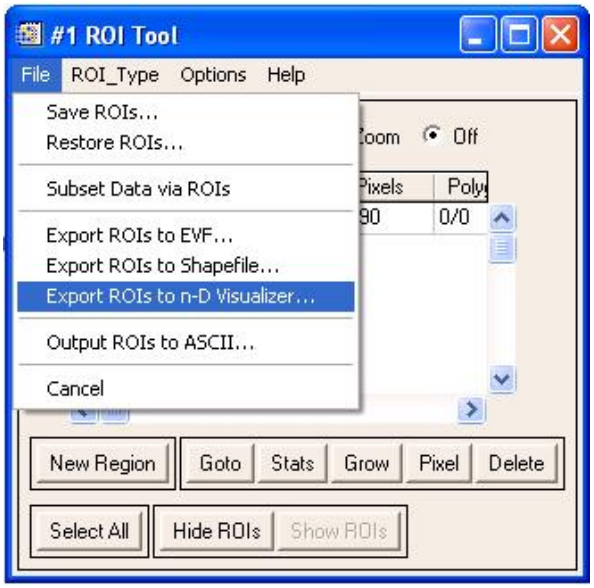


Figura 3.31. Modulo para exportar ROI a n-D Visualizer.

2.5. Aparecen las ventanas de título **n-D Visualizer** y **n-D Control**. En las cuales se seleccionan las 3 bandas que aparecen en el recuadro **n-D Selected Bands** y se pulsa el botón de acción **Start**. A continuación se muestra en la ventana **n-D Visualizer** la distribución de puntos (Figura 3.32).

2.6 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. Este 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 número de clases y la distribución de puntos dependen de la imagen con la que se esté trabajando.

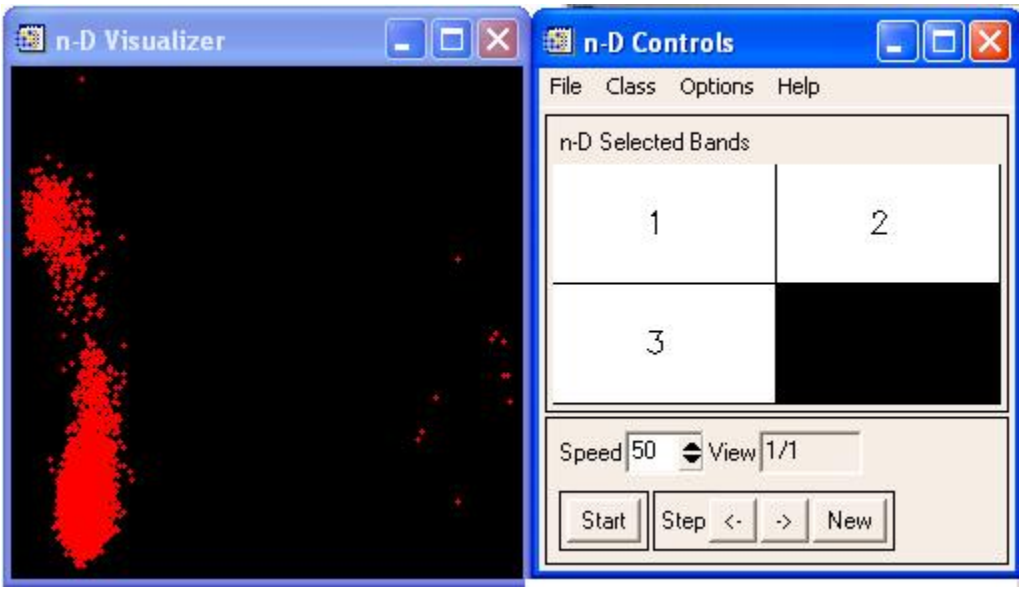


Figura 3.32. Ventanas del proceso de n-D Visualizer. A la izquierda se observa la distribución de los pixeles en la imagen.

2.7 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,** a continuación aparecen en la ventana de título **ROI Tool**, todas las clases asignadas. Posteriormente se elige la ruta y el nombre del archivo generado.

3.1.11 Angulo de referencia espectral (Spectral Angle Mapper)

Esta herramienta denominada SAM, es un algoritmo del paquete ENVI® 4.2 determina el ángulo de separación que existe entre un píxel cualquiera con respecto al espectro de referencia, con lo cual se filtra el número de pixeles existentes en la data cuando estos tengan un ángulo mayor al del 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. Para este procedimiento se sigue de la siguiente manera:

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 3.33).

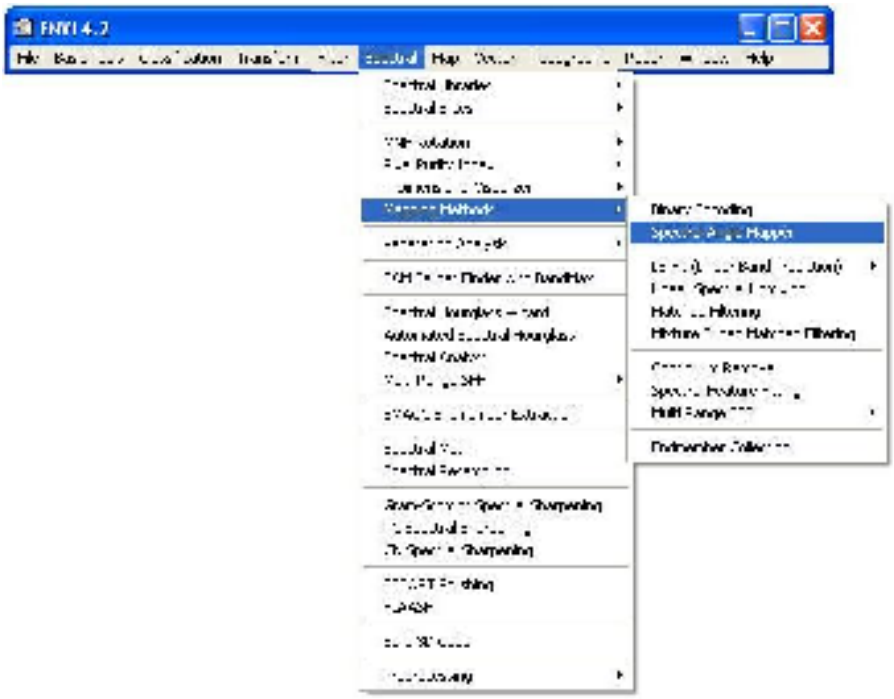


Figura 3.33. Modulo para aplicación algoritmo SAM

2. Posteriormente se abre una ventana titulada **Clasification Input File**, en la cual se selecciona el archivo 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**. Inmediatamente se despliega la ventana **Endmember colletion**: **SAM**, se pulsa la opción **Import** y del menú desplegable se selecciona la opción **from ROI/EVF from Input File**. Se abre dentro de la misma ventana una tabla en la que se muestran

las clases, se seleccionan todas y se presiona el botón **Ok**, se despliega la ventana **Spectral Angle Mapper Parameters** en la cual se da ubicación y nombre al archivo de salida con la corrección SAM. (Figuras 3.34 y 3.35)

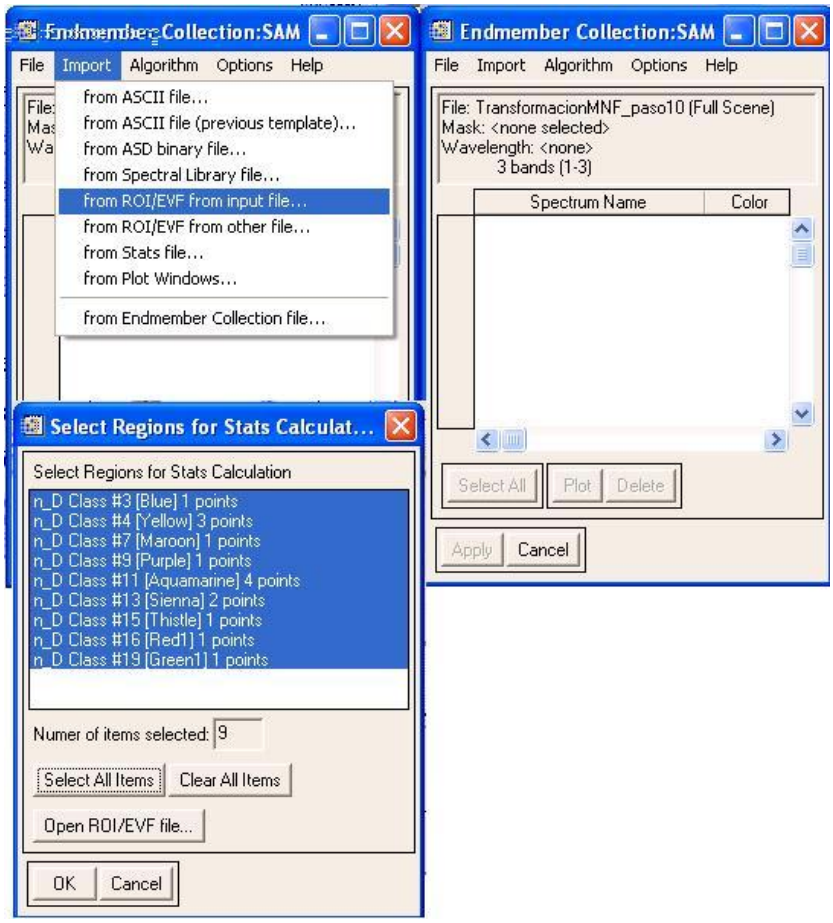


Figura 3.34 Proceso de construcción del SAM

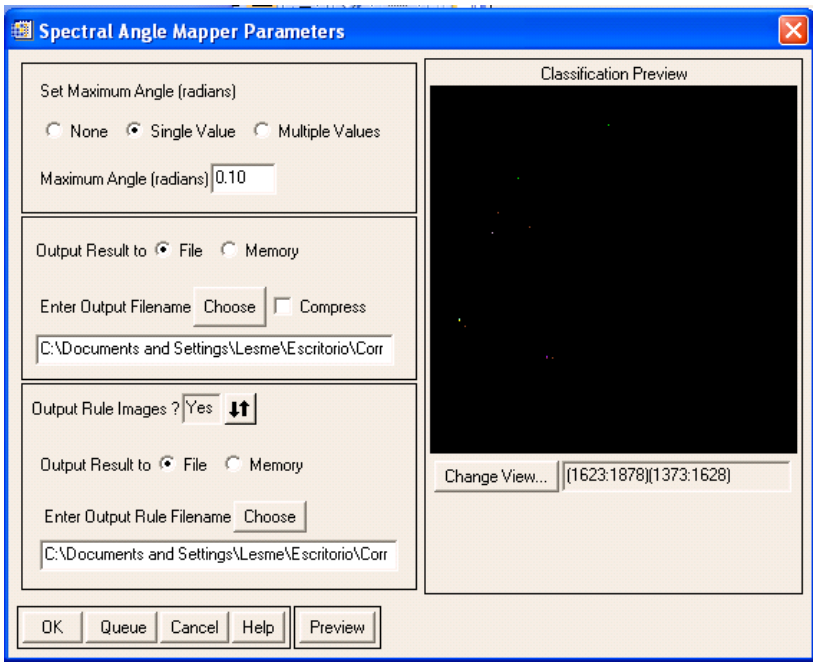


Figura 3.35. Parámetros de salida del proceso.

Por último obtenemos un conjunto de bandas que podemos utilizar para posterior análisis del mapa y filtrar los píxeles con un ángulo mayor al del espectro, si superponemos estas bandas con las imágenes. (Figura 3.36)

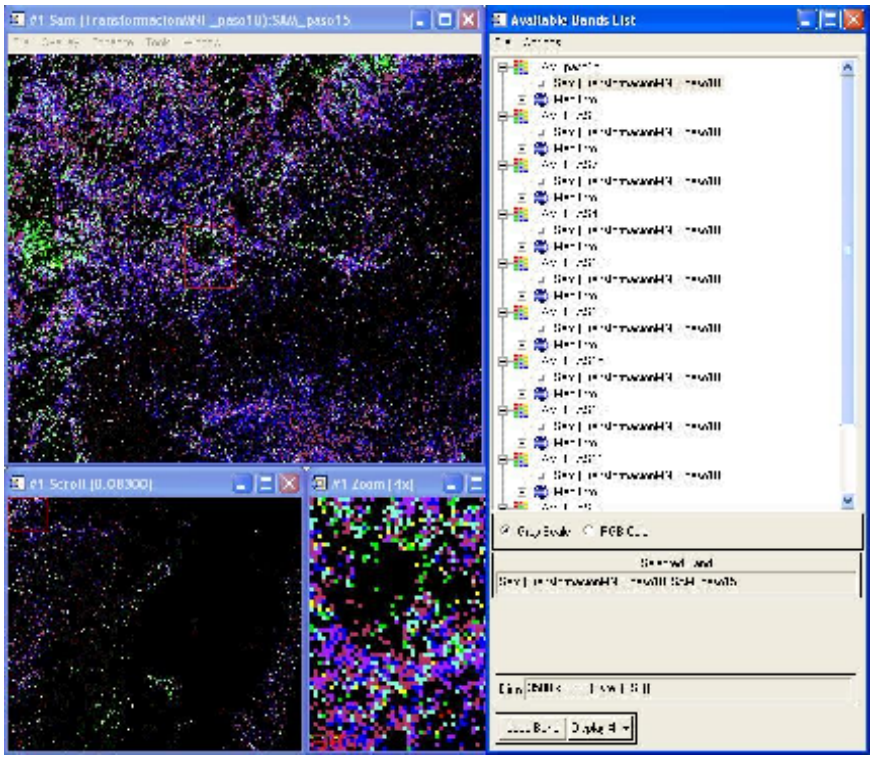


Figura 3.36. Resultado del Spectral Angle Mapper, mostrando las clases donde el ángulo de separación espectral es inferior al valor predefinido

3.1.12 Clasificación No Supervisada

Con este proceso se definen las clases espectrales presentes en la imagen, que deberían definir las clases temáticas de interés, realizando una búsqueda automática de valores homogéneos. La intervención humana se centra más bien 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.

Esta 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.

Los pasos para obtener esta clasificación son los siguientes:

1. Conversión del archivo FLAASH a IMG: Esta conversión se realiza en el paquete ENVI® 4.2 en el cual se abre la imagen con corrección atmosférica FLAASH. En la ventana de título **Avaliable 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** para guardar la imagen, en formato **ERDAS IMAGINE,** escogiendo igualmente la ruta y nombre de salida, este proceso se repite para las siguientes tres bandas. (Figura 3.37).

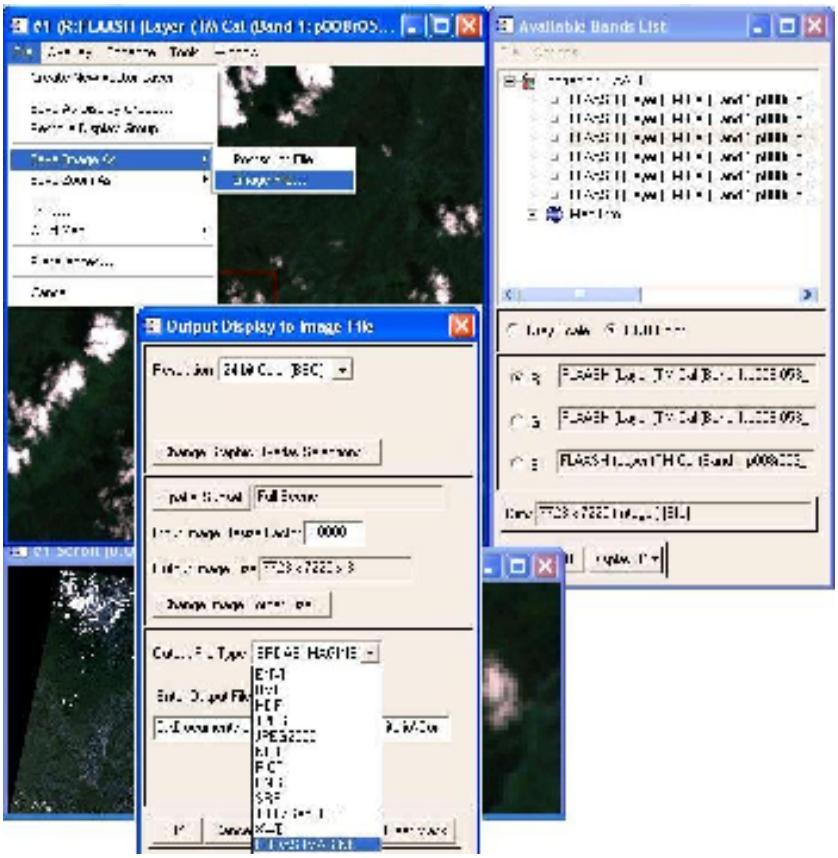


Figura 3.37. Conversión de FLAASH a IMG.

2. Unión de Imágenes: debido a que en el proceso anterior se generaron 2 imágenes, estas se deben fusionar en una sola, en el ERDAS IMAGINE® 8.5 se realiza este proceso con la función **Layer Stacking.**

2.1. En el menú principal se pulsa la opción **Interpreter** y en el menú desplegable se seleccionan las opciones **Utilities** y luego **Layer Stacking**

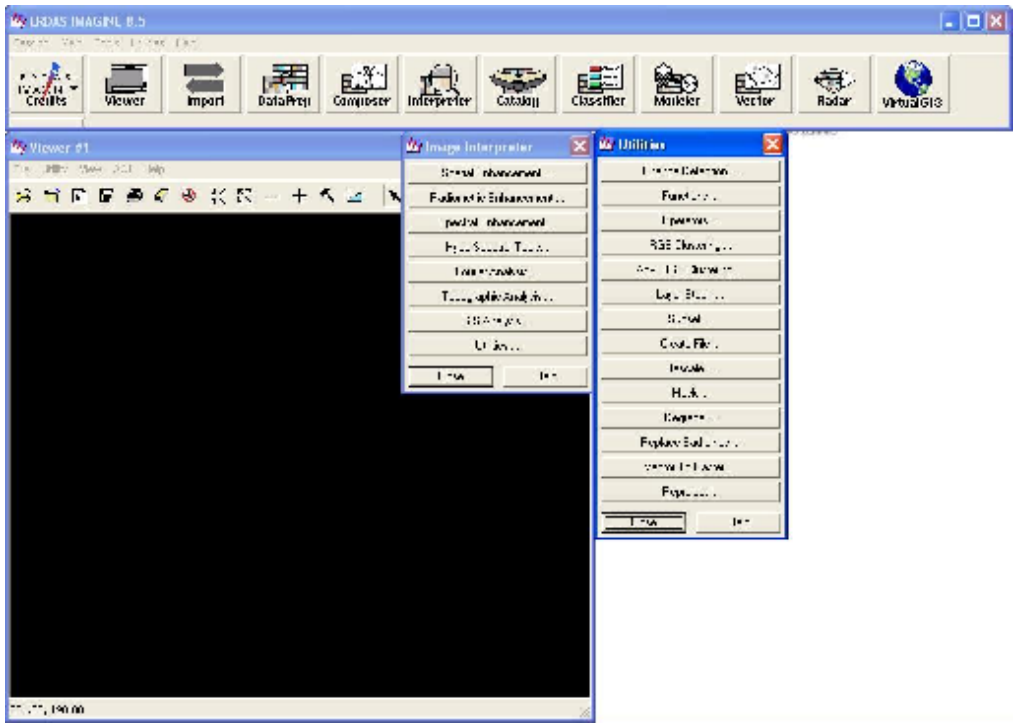


Figura 3.38. Modulo de Layer Stacking, Paquete ERDAS IMAGINE ® 8.5

2.2. Posteriormente se introducen los parámetros para la fusión de las dos imágenes, y luego se selecciona la ruta y nombre de salida con **Output File** y luego **Ok.** (Figura 3.39).

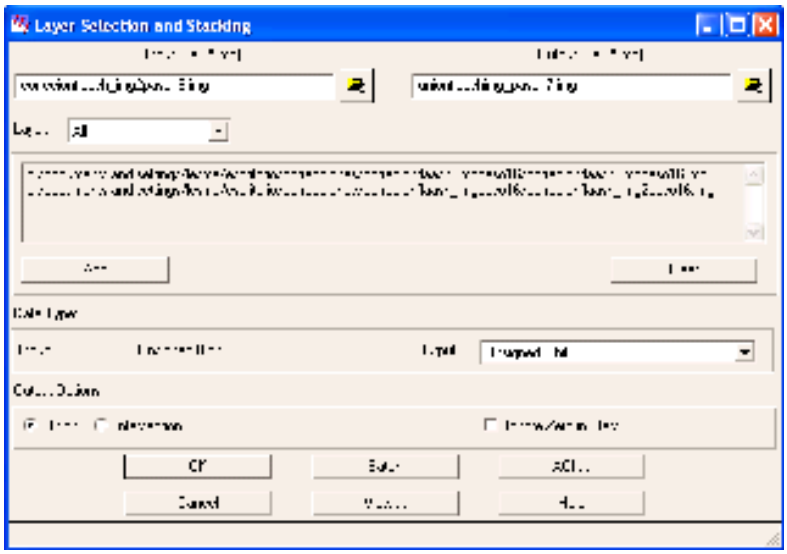


Figura 3.39. Salida del Layer Stacking en IMG con ERDAS IMAGINE ® 8.5

3.1.13 Clasificación Supervisada

1. En la barra de menú principal se pulsa la opción **Classifier** y en el menú desplegable se seleccionan la opción **Unsupervised Classification,** en la siguiente ventana **Unsupervised Classification (Isodata),** y en la opción **Input Raster** se introduce el archivo 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 3.40).

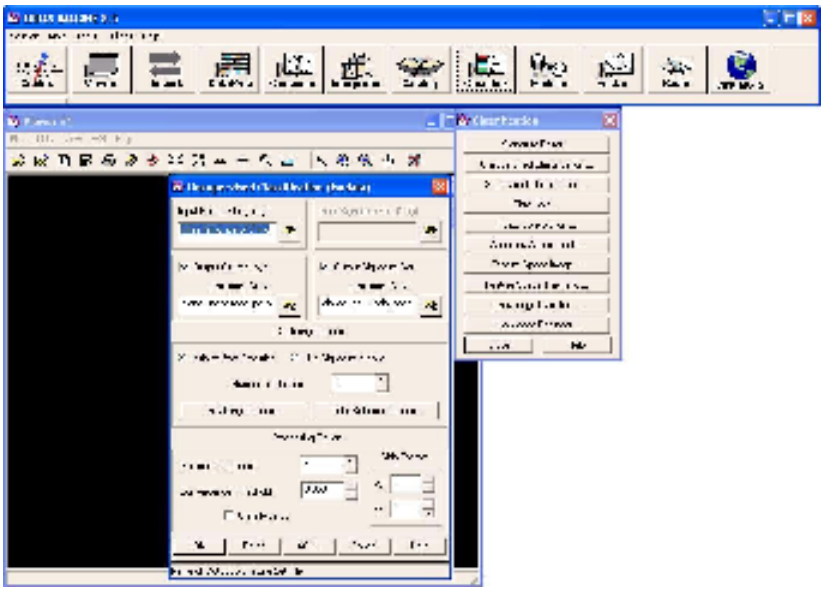


Figura 3.40. Clasificación no supervisada

2. Una vez finalizado el proceso, en la ventana de título Viewer #1 donde se abre el archivo generado anteriormente, luego 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**, 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** para así obtener una ventana que contiene todas las clases obtenidas donde se procede a realizar la interpretación (Figura 3.41).

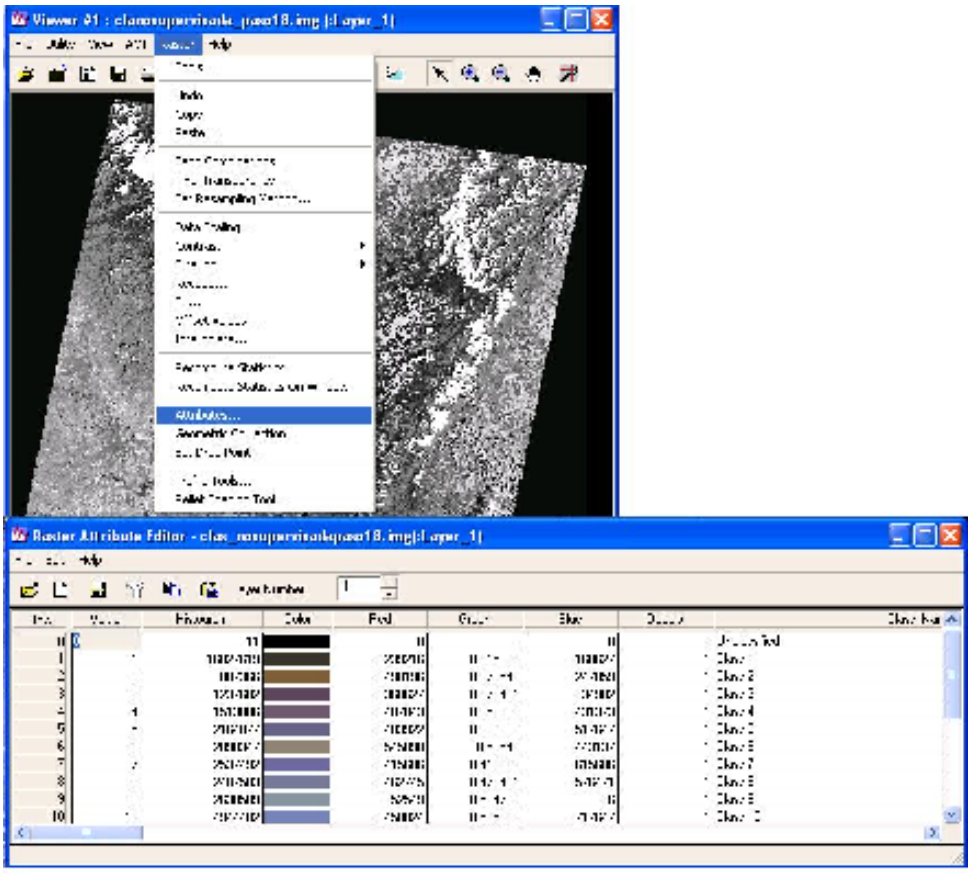


Figura 3.41. Imagen y clases obtenidas con la clasificación no supervisada. Muestran la variabilidad de clases encontrada en la imagen, reconocidos por el software.

Permite también definir las clases espectrales presentes en la imagen, consiste en hacer una clasificación de los píxeles con características similares, que el usuario define mediante la observación de la imagen discriminando visualmente 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.

Para realizar el procedimiento se sigue de la siguiente manera en el ERDAS IMAGINE ® 8.5:

1. Se abre la imagen con ERDAS, posteriormente en el menú principal pulsar la opción **Classifier** y en el menú desplegable se selecciona la opción **Signature Editor**, donde se creara el archivo que contendrá las clases clasificadas por el usuario, se pulsa la opción **Raster** y 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 3.42).

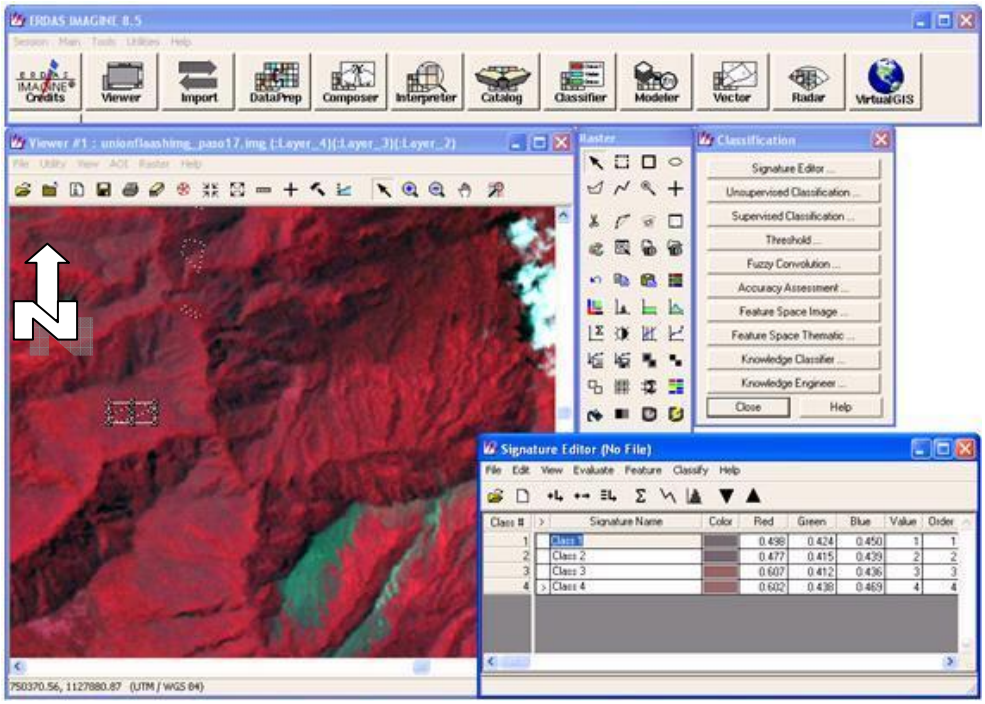


Figura 3.42. Aplicación de las firmas espectrales para la clasificación supervisada.

2. El procedimiento se repite para cada clase de la que se tenga información. Una vez finalizada la designación de clases, se guarda en un archivo que contendrá todas estas clases editadas (Figuras 3.43 y 3.44).

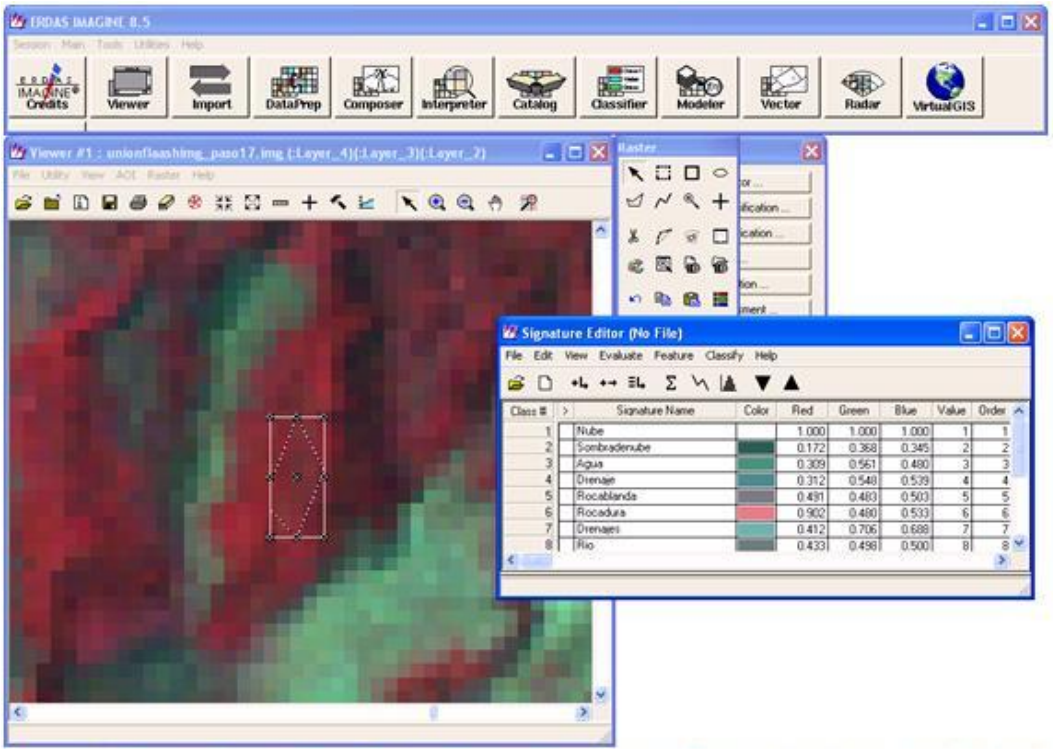


Figura 3.43. Resultado de la clasificación supervisada

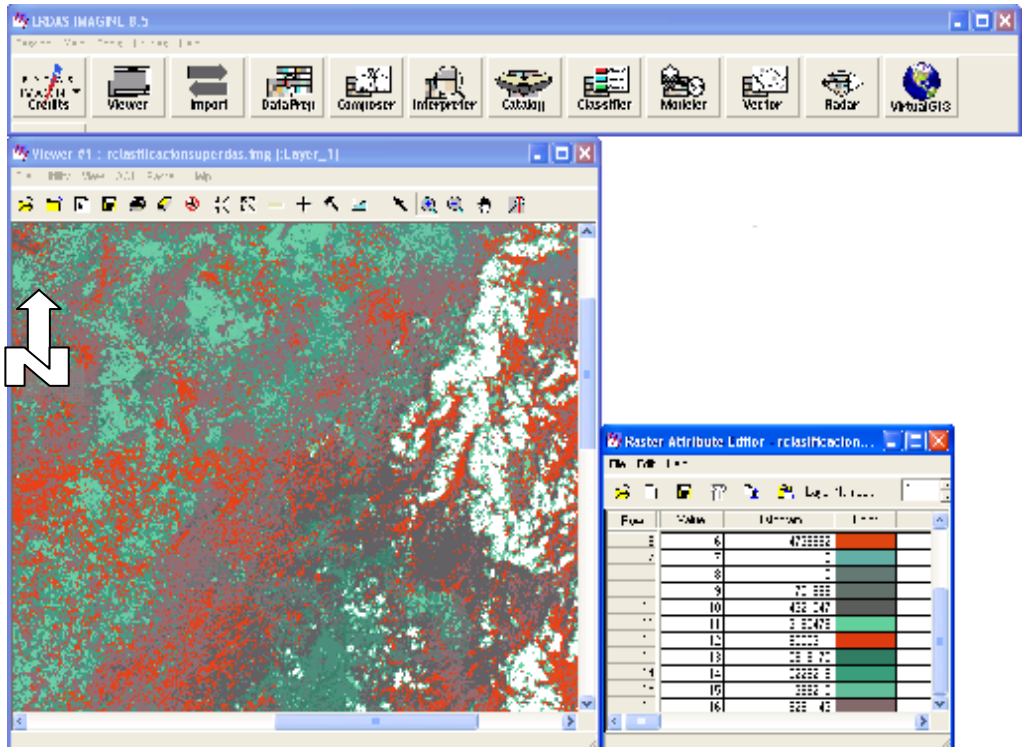


Figura 3.44. Resultado de la clasificación supervisada, muestra las clases asignadas por color en la imagen, indicando cambios espectrales.

3.1.14 Operaciones entre bandas

Estas operaciones generalmente consisten en cocientes entre bandas, adición y luego cociente, con el objetivo de resaltar características específicas de la imagen. Este procedimiento se cumple en el software ENVI ® 4.2, de la siguiente manera:

1. En el menú principal se selecciona **Transform,** del menú desplegable se selecciona **Band Ratios**, con lo cual se despliega la ventana **Band ratios Input Bands** y se introducen las bandas a ejecutar para el proceso, en primer lugar se introduce el numerador y en segundo lugar la banda que ocupará el denominador, se pulsa **Enter Pair** y para finalizar **OK** (Figuras 3.45 y 3.46).

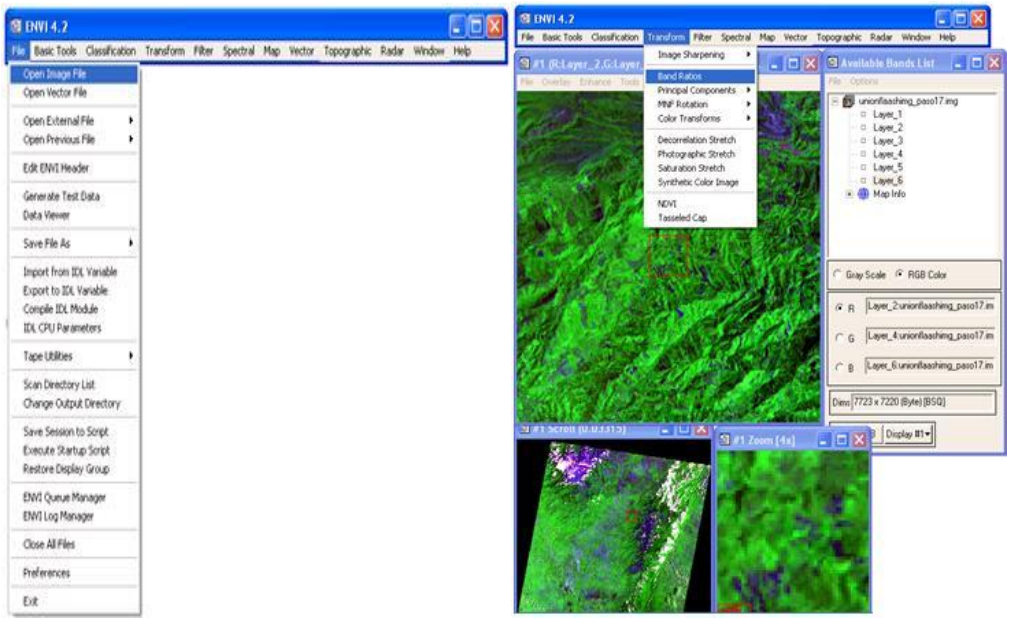


Figura 3.45. Comandos para realizar el cociente de bandas

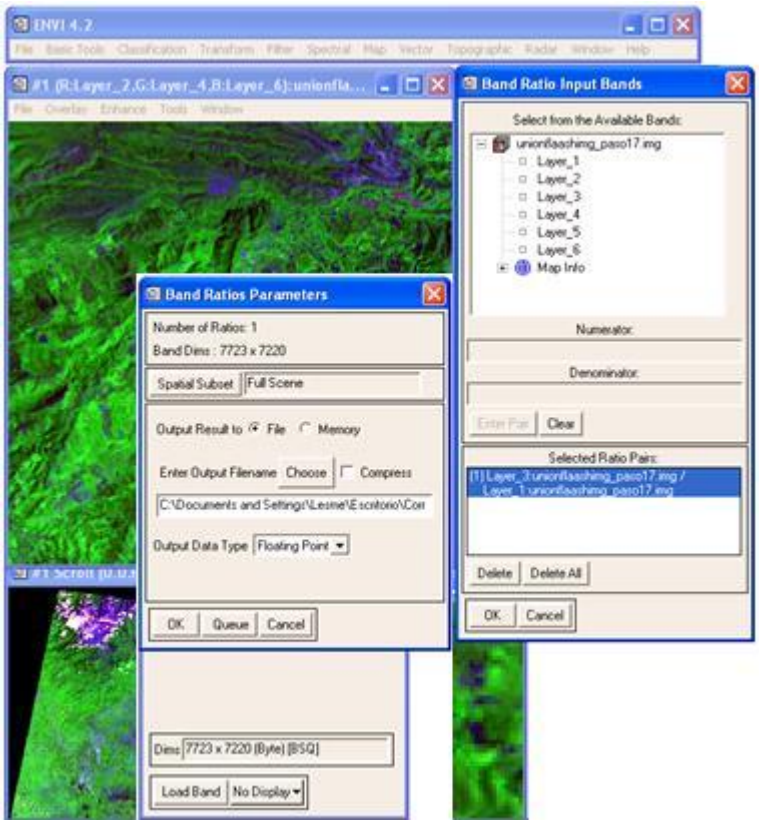


Figura 3.46. Salida del cociente de banda 3/1.

Este proceso se realiza tantas veces como cocientes de bandas se quieran obtener. La utilidad de los cocientes de bandas radica en las combinaciones en falso color RGB que se pueden obtener de estos, por ejemplo existen cocientes de bandas que han demostrado su efectividad para resaltar ciertos aspectos de las imágenes tratadas como lo son: R: 3/1 G: 5/4 B: 5/7 en donde se resalta la geología y R: 1/4 G: 3/5 B: 7/4, en donde obtenemos un realce en la información de los sectores ambientales.

3.1.15 Índice de vegetación

Este proceso consiste en identificar la cantidad de material vegetal existente en la superficie con lo cual obtenemos otro criterio para la clasificación litológica, considerando que en rocas competentes se observa poca litología. Para efectuar esto procedemos de la siguiente manera:

1. En el menú principal del software ERDAS IMAGINE ® 8.5 se pulsa la opción **Interpreter**, se despliega la ventana **Image interpreter**, luego se hace clic sobre el botón **Spectral Enhancement** y posteriormente en **Indices**. En la misma se establece el archivo al cual se le va a aplicar el procedimiento, y se le da una ubicación y nombre de salida. Por último en **Select Functions** se selecciona **NDVI** (Indice de vegetación de diferencia normalizada) con la cual se asumen valores en un rango de -1 a 1, y en sensor se selecciona **Landsat TM**, posteriormente **OK** (Figura 3.47).

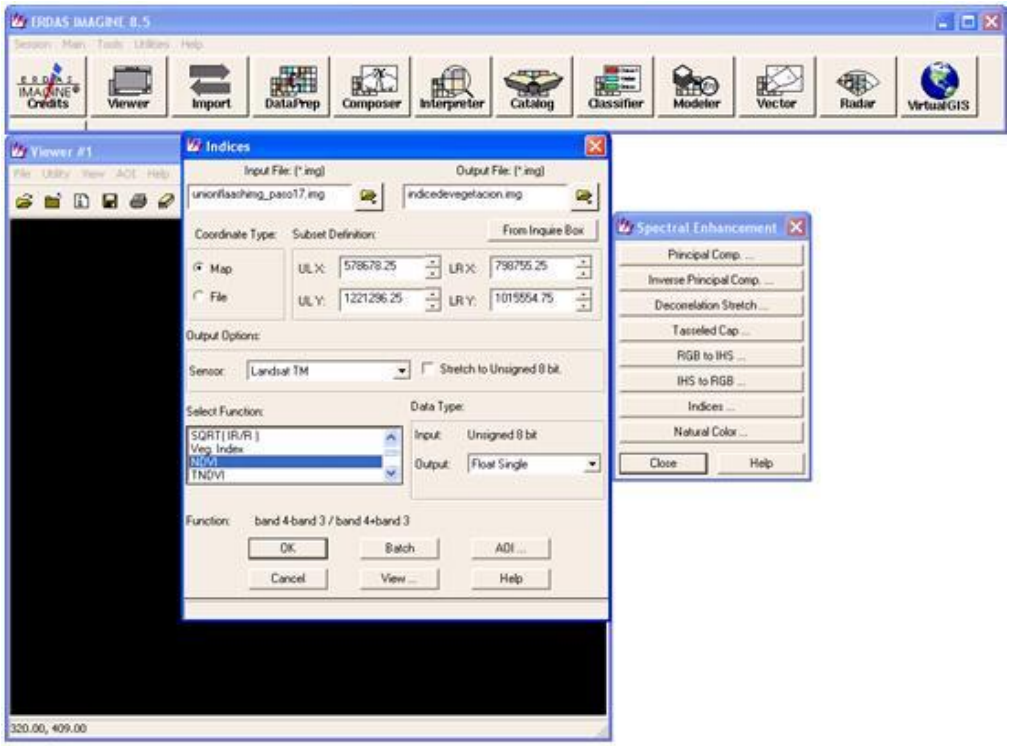


Figura 3.47. Comandos para aplicar índice de vegetación en ERDAS IMAGINE

3.1.16 Análisis de componentes Principales

Este procedimiento transforma las variables originales (correlacionadas) en nuevas variables decorrelacionadas o independientes entre sí, lo que facilita la

interpretación de los datos, ya que identifica los posibles variables latentes o no observadas, para este procedimiento se sigue de la siguiente manera:

1. En el menú principal de ERDAS IMAGINE ® 8.5, se pulsa la opción **Interpreter**, luego se pulsa **Spectral Enhancement,** con lo cual se abrirá un nuevo submenú, se pulsa en **Principal Comp.** En el cual se ingresa la imagen como entrada y se selecciona nombre y ruta de salida. (Figura 3.48)

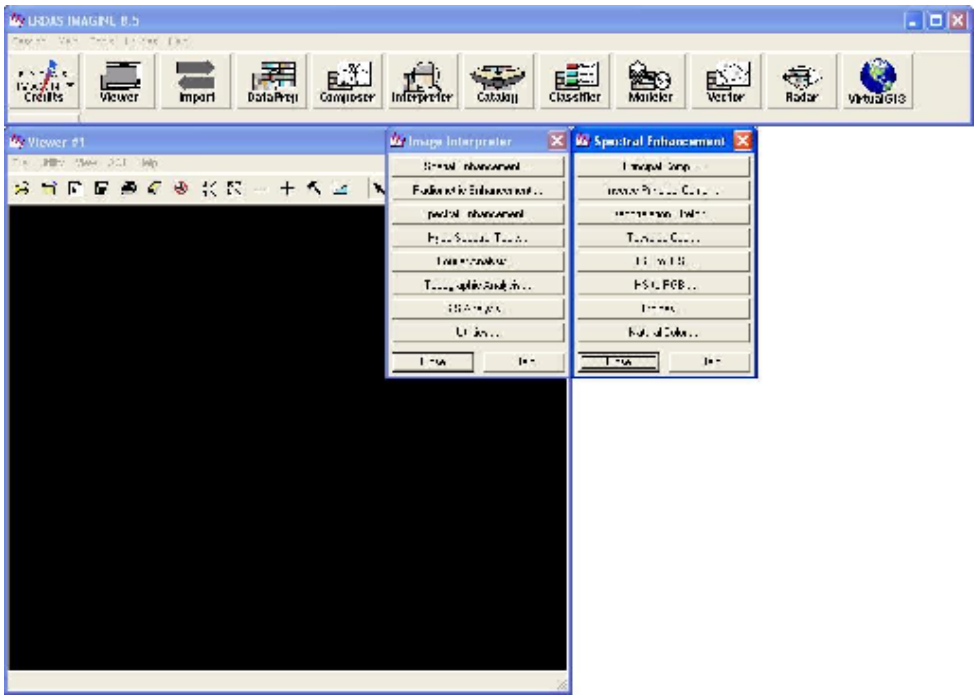


Figura 3.48 Modulo para Análisis de Componentes Principales

2. Por último se observa una imagen producto del análisis de los componentes principales en donde se resalta información útil para el análisis (figura 3.49).

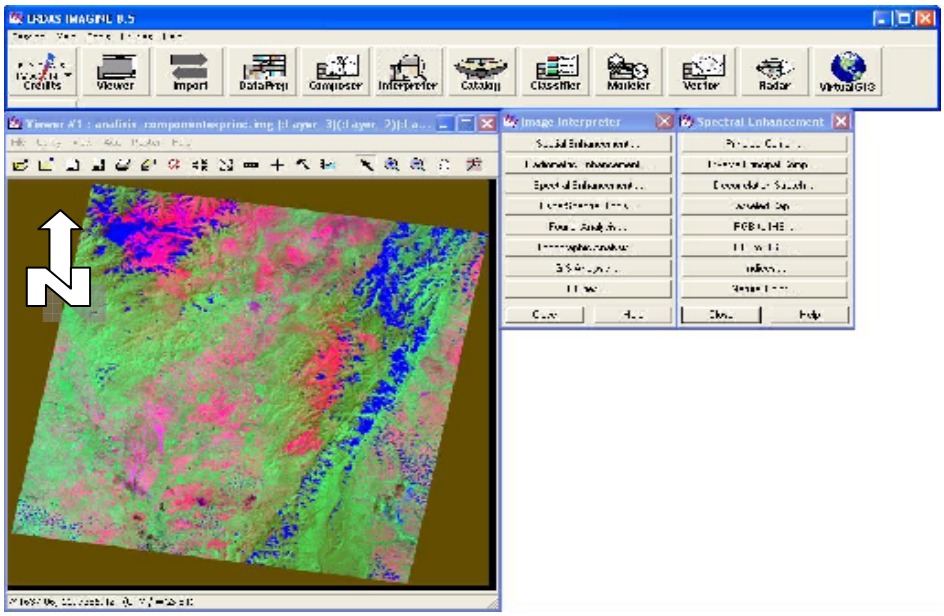


Figura 3.49. Resultado del Análisis de los componentes principales, se observan las variables no observadas por lo métodos anteriores, lo que facilita la interpretación.

3.1.17 Modelo de Elevación Digital (MED)

El modelo de elevación Digital es una herramienta que proporciona el paquete ENVI® 4.2 a fin de observar la topografía con más claridad y apreciar los desniveles topográficos de la zona de estudio, esta herramienta permite la exageración de la escala vertical para así categorizar con mayor precisión las zonas montañosas de las planicies o valles.

Los pasos para realizar dicho procedimiento son los siguientes:

1. Se abre la imagen de la corrección atmosférica en FLAASH, donde se selecciona una combinación de bandas cualquiera, de preferencia se escoge alguna con realce en la geología, como lo es R: 70 G: 50 B: 20. Posteriormente en la imagen se pulsa en **Tool** y del menú **3D surfaceView**, para luego ingresar los parámetros y ruta de salida (Figura 3.50).

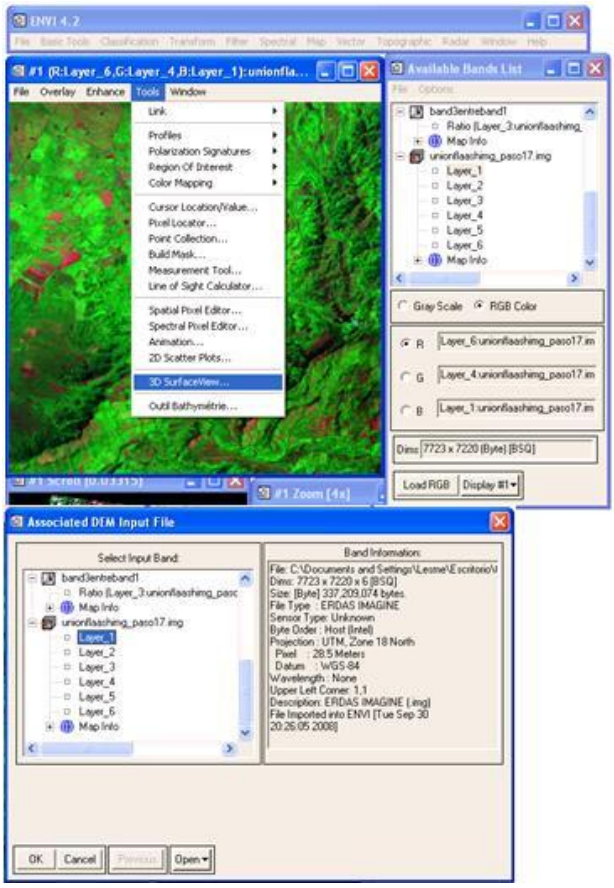


Figura 3.50. Comando para la realización del modelo de elevación digital en ENVI.

El modelo de elevación para la zona de estudio es el siguiente (Figura 3.51):

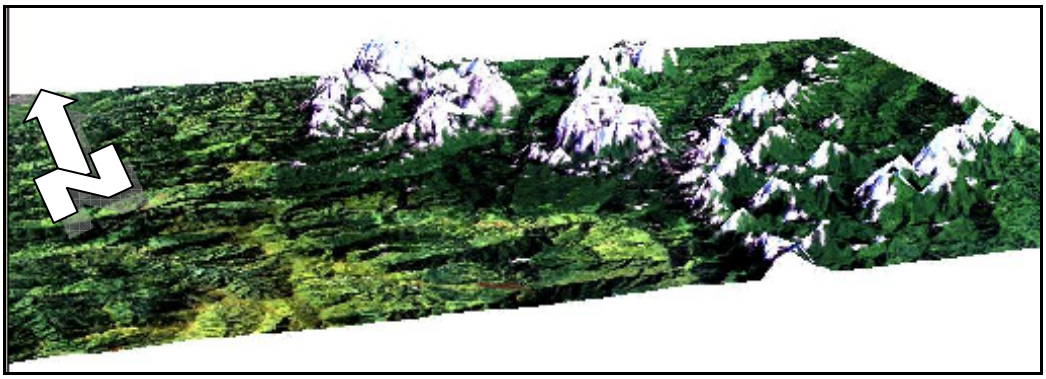


Figura 3.51. Modelo de elevación a escala vertical exagerada 1: 20, con dirección N20ªE

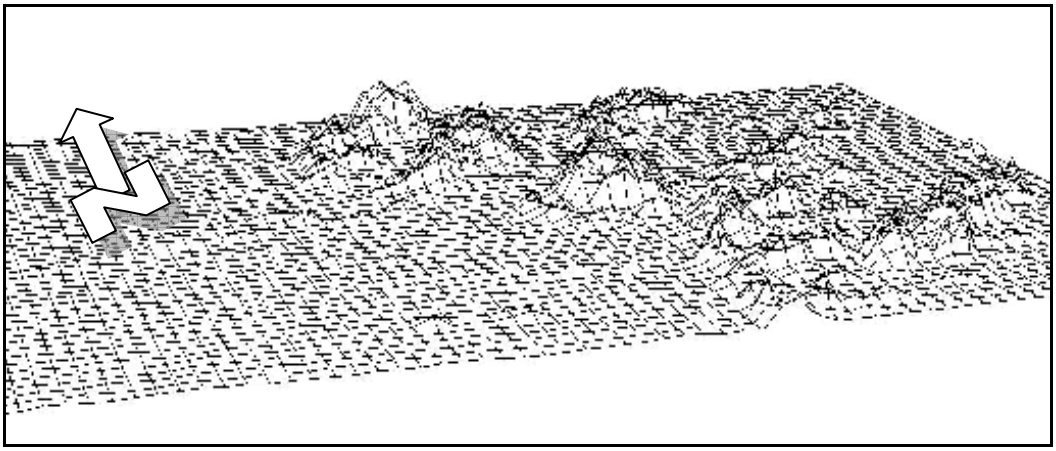


Figura 3.52. Modelo de elevación a escala vertical exagerada 1: 20, con dirección N20ªE



Figura 3.53. Modelo de elevación, vista de perfil lateral Este-Oeste escala 1:15

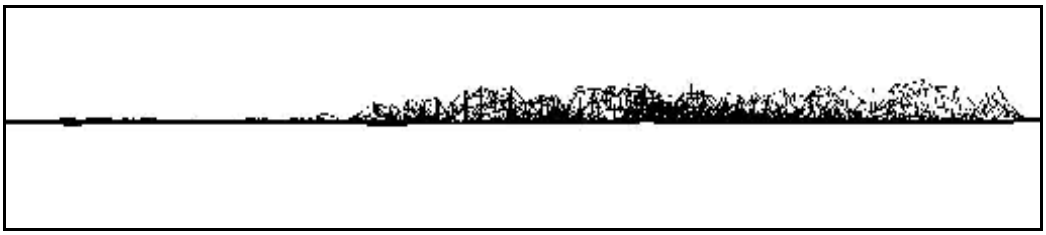


Figura 3.54. Modelo de elevación, vista de perfil lateral modo WIRE Este-Oeste escala 1:15.

CAPITULO IV

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Producto de la corrección de la Fracción Mínima de Ruido MNF

El resultado obtenido luego de aplicar la transformación de la fracción mínima de ruido en la imagen muestra diferencias de tonalidades entre las litologías que afloran en la zona de estudio, destacando los contrastes litológicos en tonos violetas y en tonos rojizos, esta se apreció con una combinación de los cañones RGB 135 las cuales no marcan una geometría definida de los cuerpos rocosos mencionados por autores anteriores y no se puede inferir nada en este caso (Figura 4.1)

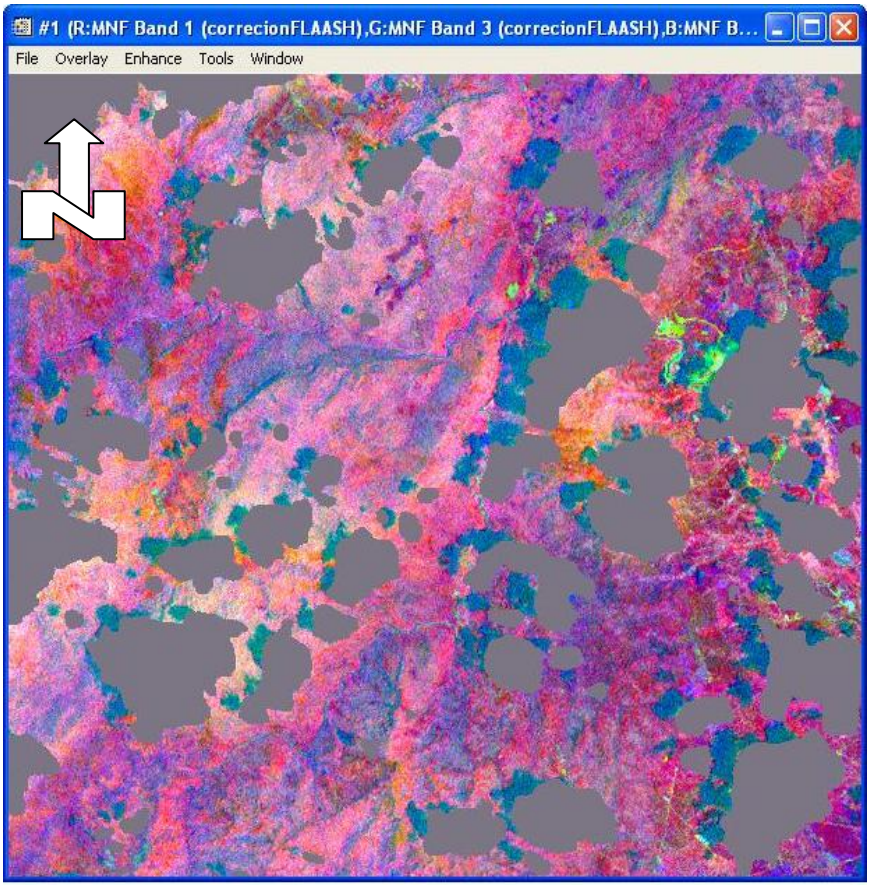


Figura 4.1 Parte de la imagen resultado de la corrección MNF, donde se resaltan contrastes de tonalidades indicando variabilidad de litologías

4.2 Resultado del índice de pureza de pixel PPI

El resultado obtenido tras la aplicación del producto PPI a la imagen muestra una distribución de píxeles con presencia de una menor densidad (píxeles más oscuros) y hacia la zona correspondiente al material de tipo aluvial y una mayor densidad (píxeles blancos) hacia la zona de litología más competente (Figura 4.2).

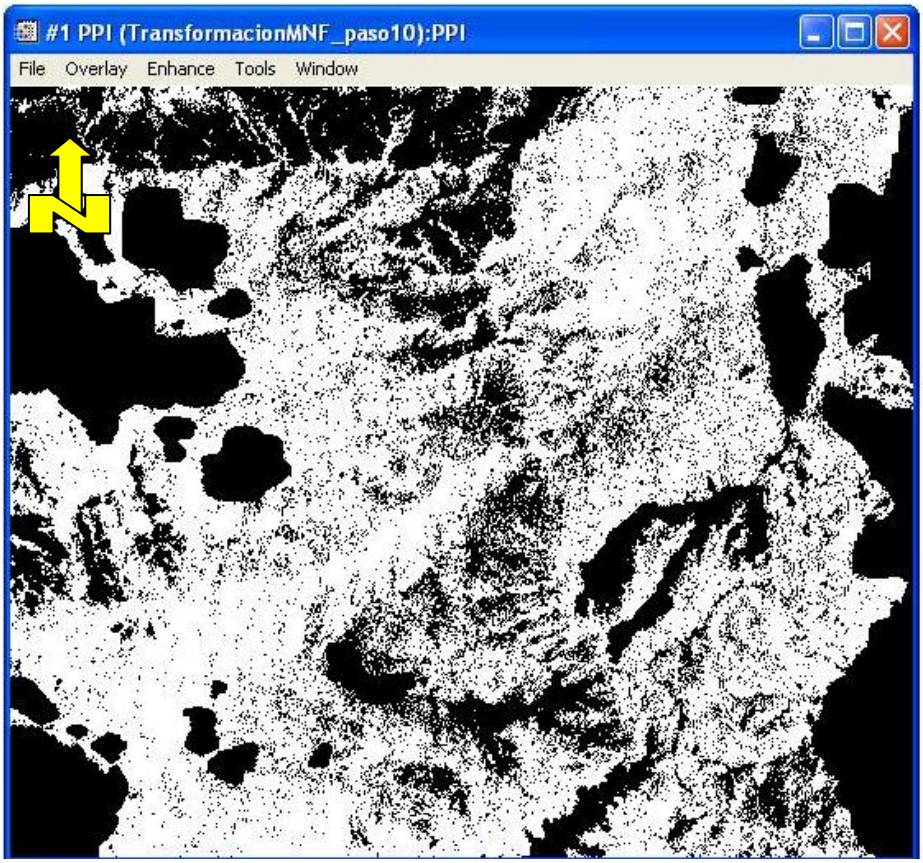


Figura 4.2. Imagen con la corrección PPI. Se muestra una parte de la imagen discriminando entre los pixeles puros, para extraer la mayor información posible.

Angulo de referencia espectral (Spectral Angle Mapper)

Mediante el empleo de este proceso denominado Spectral Angle Mapper, logramos una serie de bandas que se combinaron con las bandas espectrales de la imagen y así destacar las distintas características geológicas, litológicas y/o

características ambientales. Con estas combinaciones se logro obtener realces de estas características y así facilitar el proceso de la interpretación geológica donde la agrupación de ciertos pixel de igual color nos marcan características distintivas de algunas zonas las cuales coinciden con las descripciones y ubicación de autores anteriores como lo muestra la figura (4.3) en donde se nota una tonalidad de pixeles verdes agrupados que coinciden con las geometría de la Formación Rio Negro y el grupo Cogollo, hacia la parte sur de la zona de estudio, otra agrupación de pixeles que se puede ver en la foto son las de una tonalidad rojiza que marca la zona done hay dos formaciones del paleozoico y una tonalidad amarilla hacia el sureste donde hay una formación jurasica. Todas estas tonalidades no dan una geometría concluyente de cada cuerpo.

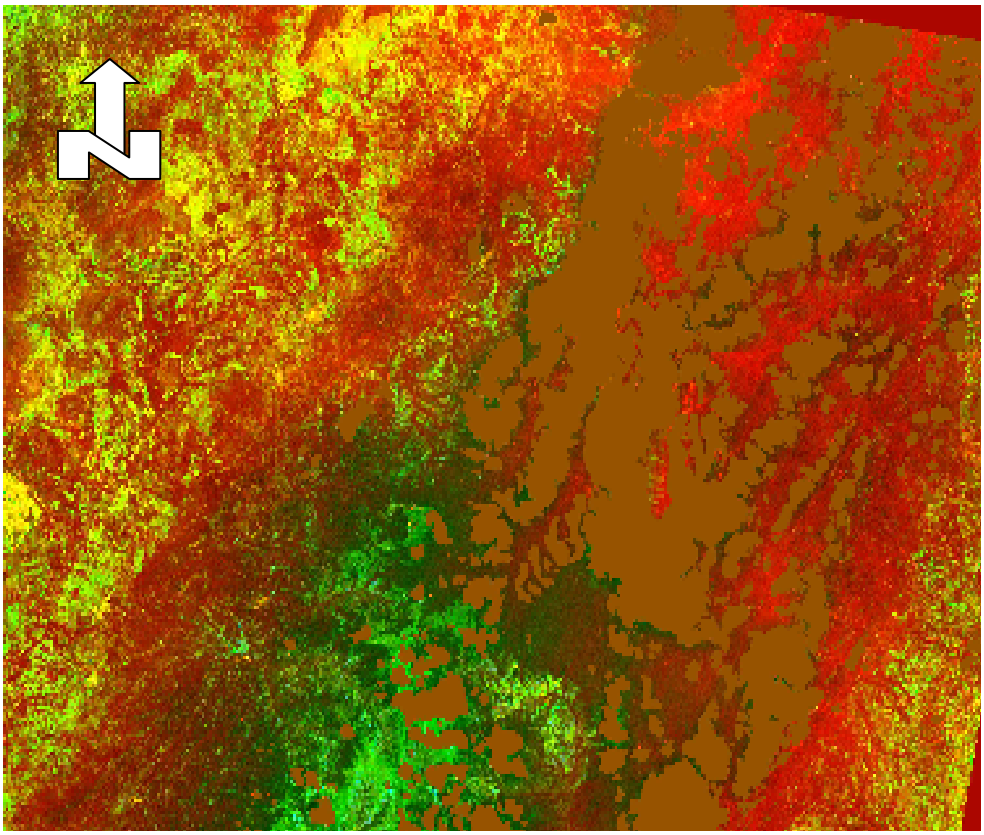


Figura 4.3. Muestra la combinación de MNF con SAM, correspondiente a R:3 G:1 y una de las clases del SAM, en la cual se resalta la litología de la zona.

4.3 Combinación de Bandas

En el paquete ENVI ® 4.2 se pudo combinar los distintos cañones RED GREEN BLUE (RGB, Rojo, Verde y Azul) y las distintas bandas de la imagen satelital (10, 20, 30, 40, 50, 70) y se seleccionaron para trabajar aquellas combinaciones con contenido temático más útil, o que de mas aportes a la investigación que se lleva a cabo, por sus características proporcionaban mayor información visual a los elementos geológicos o hidrográficos de la región, dichas combinaciones se indican en la siguiente tabla.

4.1 Tabla de combinación de bandas.

(RGB)	APORTE AL ESTUDIO	FIGURA
135	Muestra diferencias litológicas y de texturas en tonos de azul. Los drenajes se distinguen claramente en tonalidades verdes.	4.4
354	Muestra 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.	4.5
357	Muestra diferencias litológicas y de texturas en tono de verde oscuro y mayor contraste en las zonas con contenido de humedad en el suelo en color verde claro. Los drenajes se muestran en tonos rojizos	4.6
432	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-	4.7

	azulado.	
453	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.	4.8
534	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.	4.9
543	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.	4.10
752	Se resaltan la vegetación, litología y estructura en tonos verde oscuro, con mayor contraste en las zonas con contenido de humedad en el suelo en tonos amarillos, con los drenajes en tonos azules.	4.11
754	Se 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.	4.12

Conjunto de Imágenes obtenidas luego las combinaciones en falso color RGB:

Todas las combinaciones de bandas dan como resultado visual cambios de colores los que nos permiten hacer una interpretación de las características superficiales del

área, mas sin embargo las nubes representa una pérdida de información de la superficie y con las diferentes combinaciones se puede inferir que por medio de las tonalidades de pixeles las formaciones referidas por otros autores, esto nos lleva a que cada combinación da realces de colores diferente y esta información indica donde puede haber un cambio de litología para que se prueben las firmas espectrales en ella y se corrobore si existen diferentes características de la superficie. En el caso de las estructuras hay combinaciones que permiten ver de una mejor manera esas características que ya no son del tipo litológica si no dela geomorfología del terreno dándonos también información donde podemos caracterizar alguna estructura.

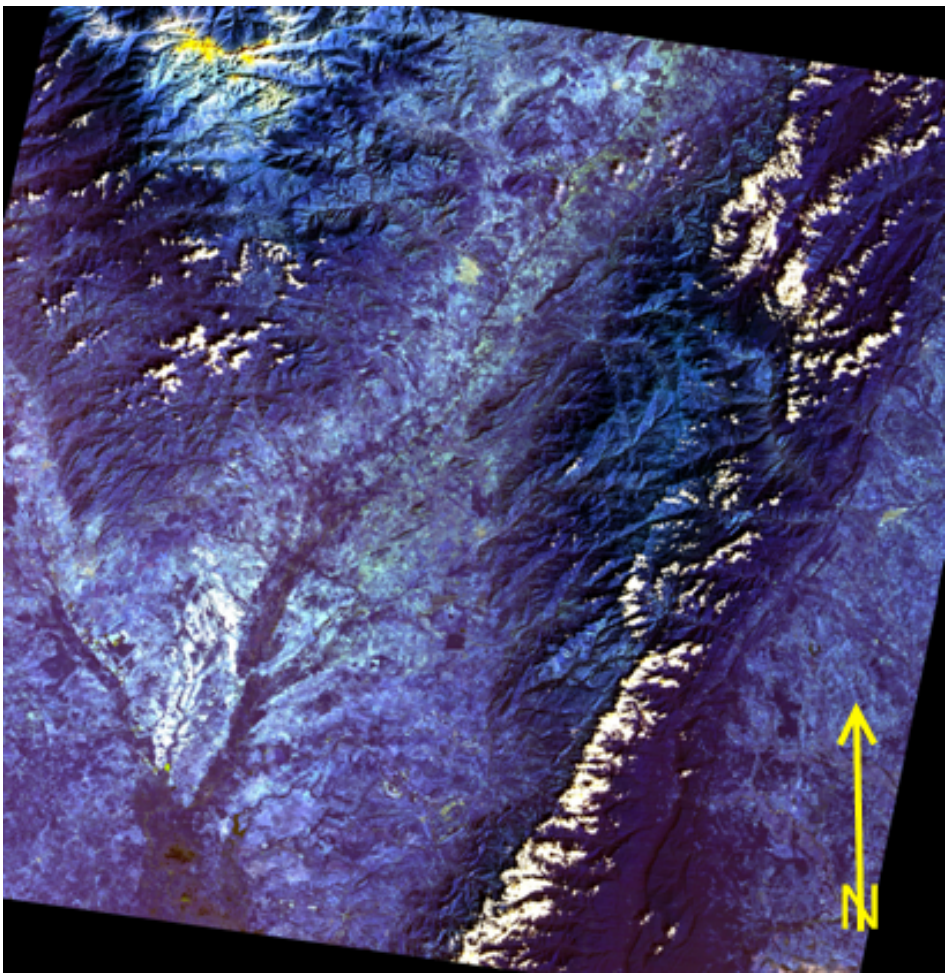


Figura 4.4. Combinación RGB 135. Se resalta las litologías (ver tabla 4.1)

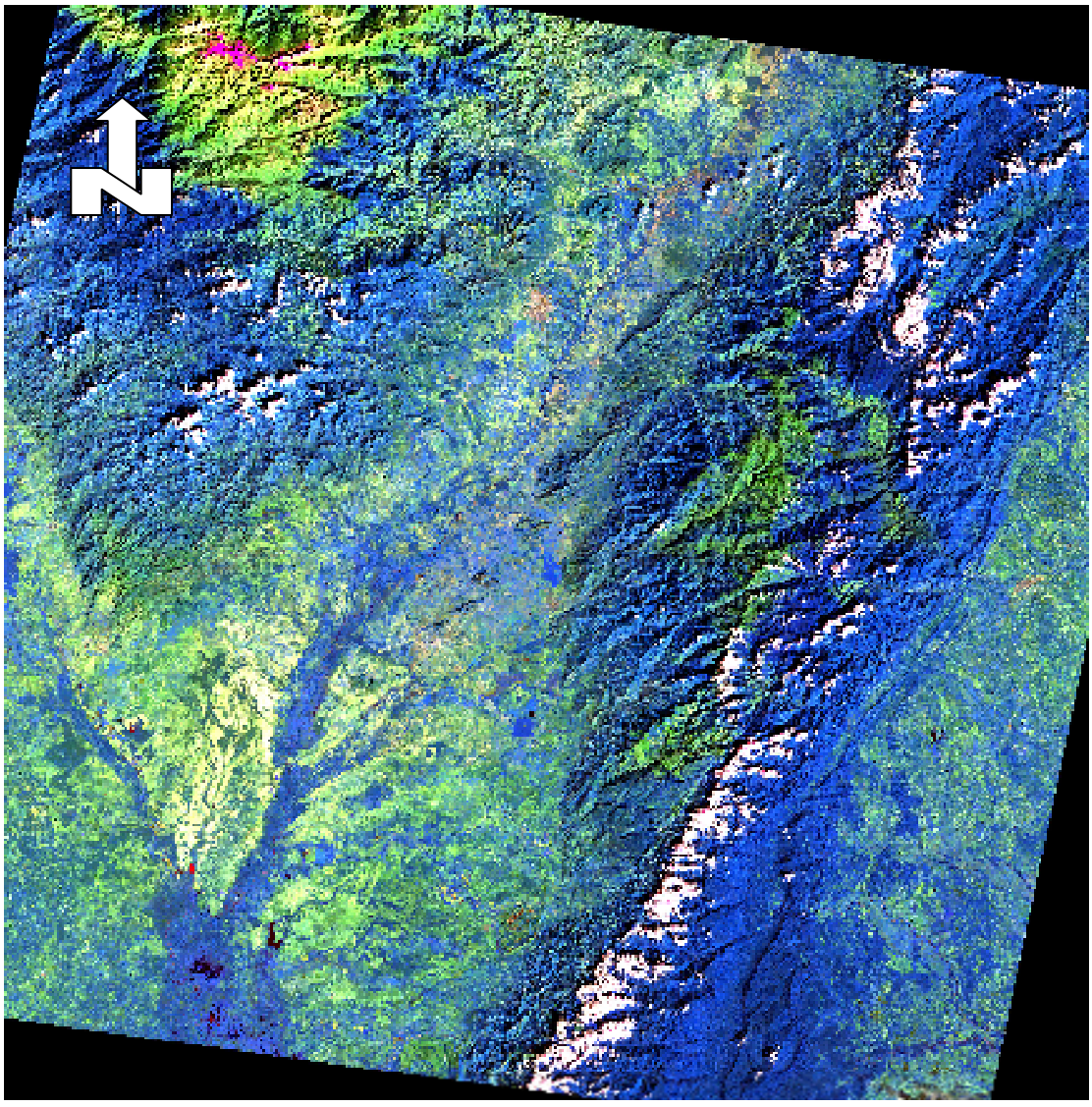


Figura 4.5. Combinación RGB 354 Muestra las texturas y litologías (ver tabla 4.1)

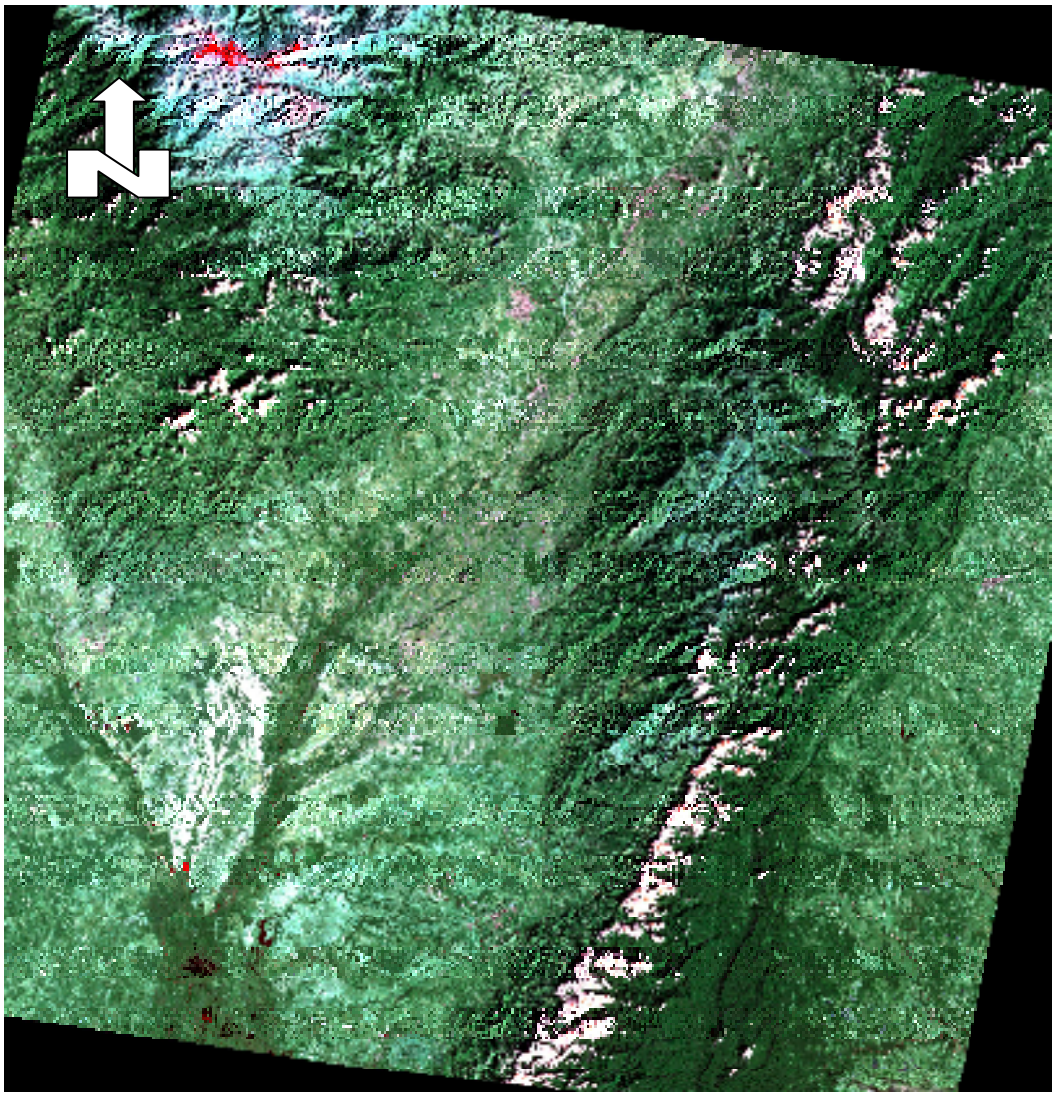


Figura 4.6. Combinación RGB 357. Se resalta la litología en tonos verdes (ver tabla 4.1)

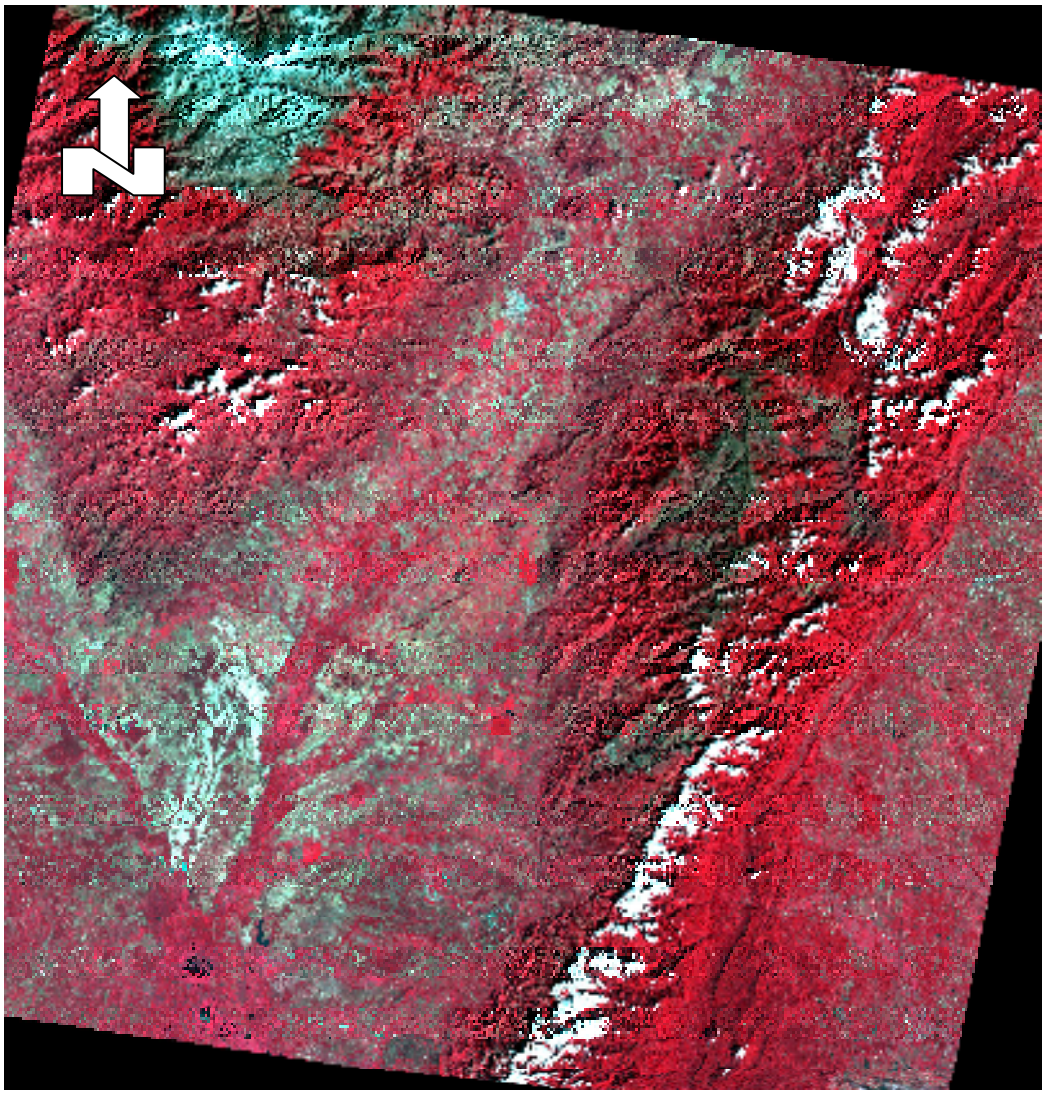


Figura 4.7. Combinación RGB 432. Se resalta el vigor de la vegetación (ver tabla 4.1)

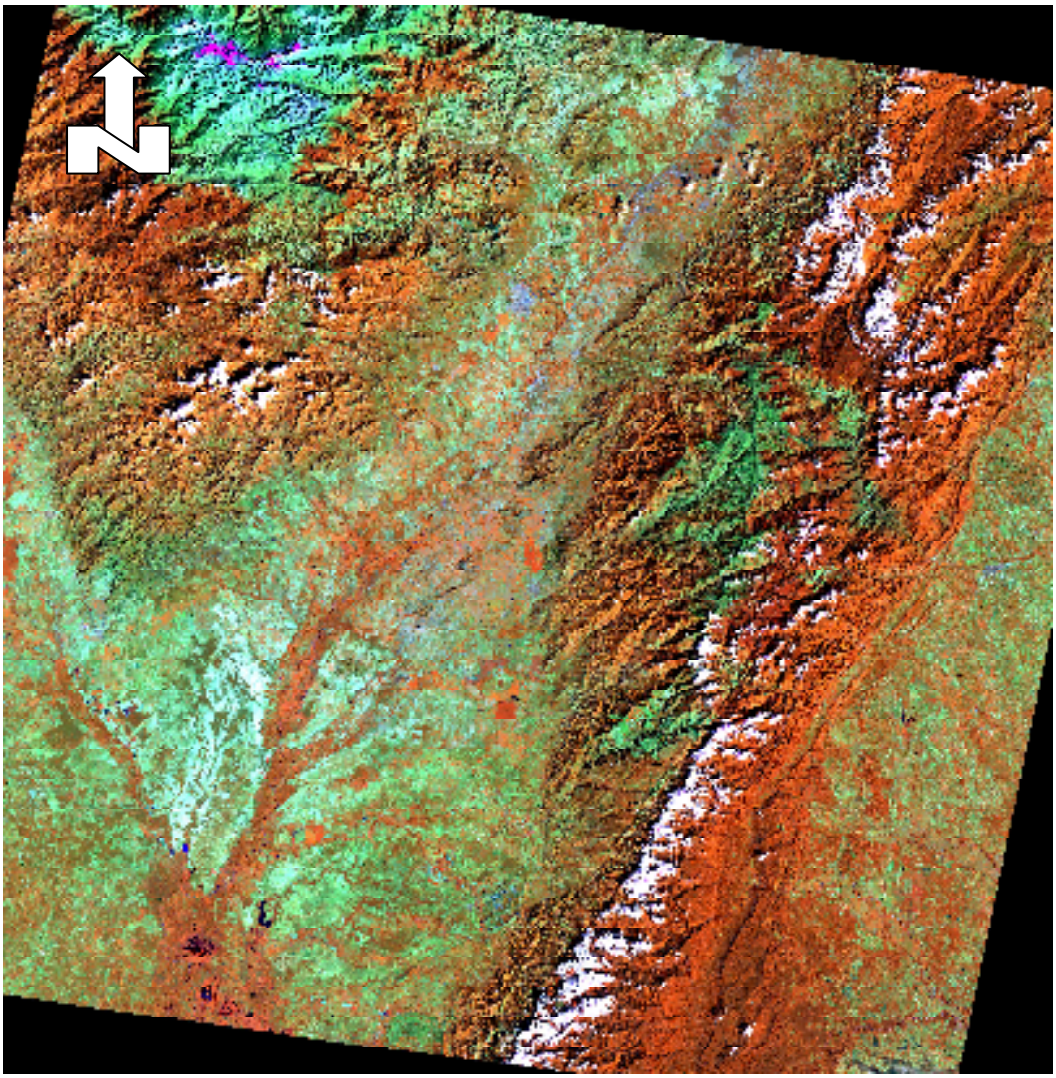


Figura 4.8. Combinación RGB 453, Se observa en más detalle la vegetación (ver tabla 4.1)

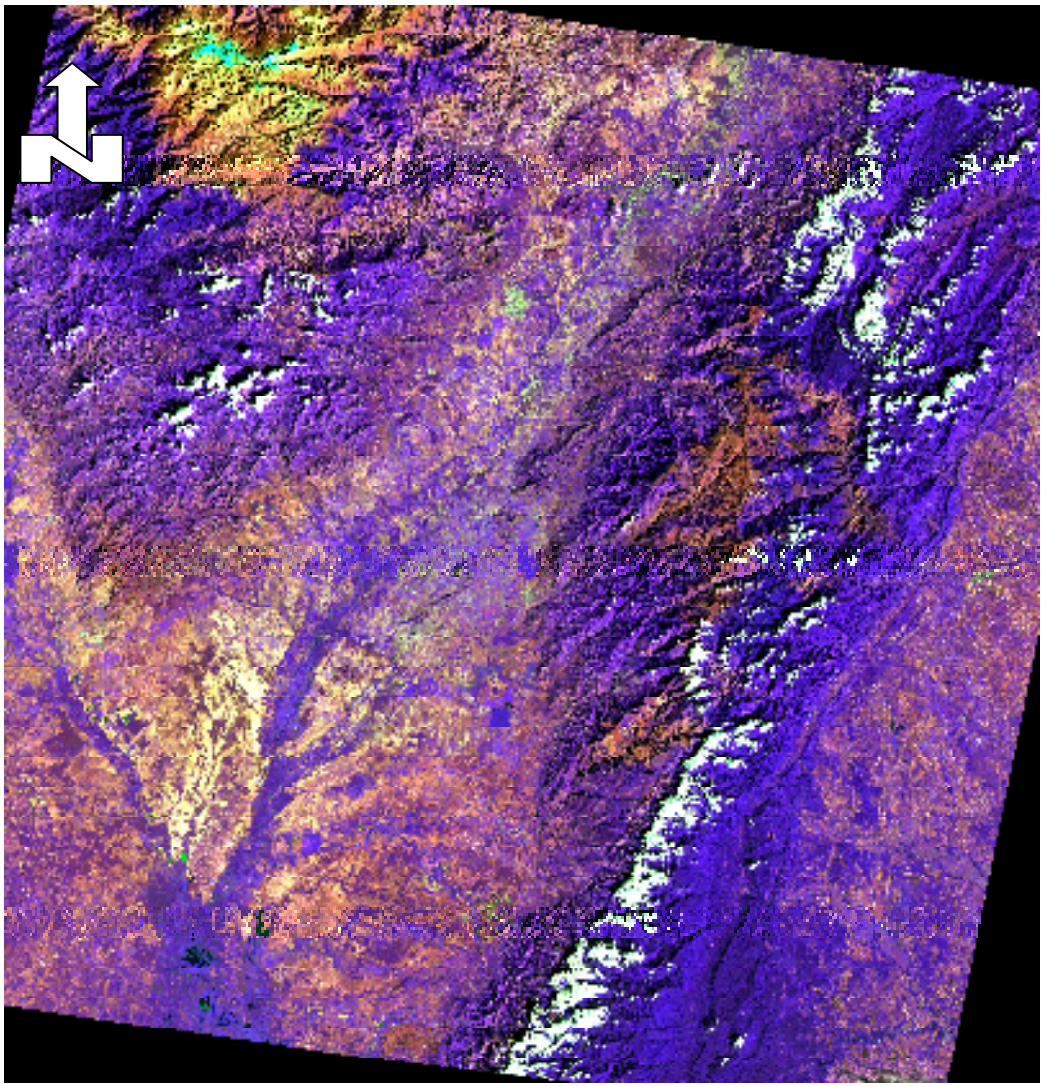


Figura 4.9. Combinación RGB 534 los tonos ocre corresponden a humedad (ver tabla 4.1)

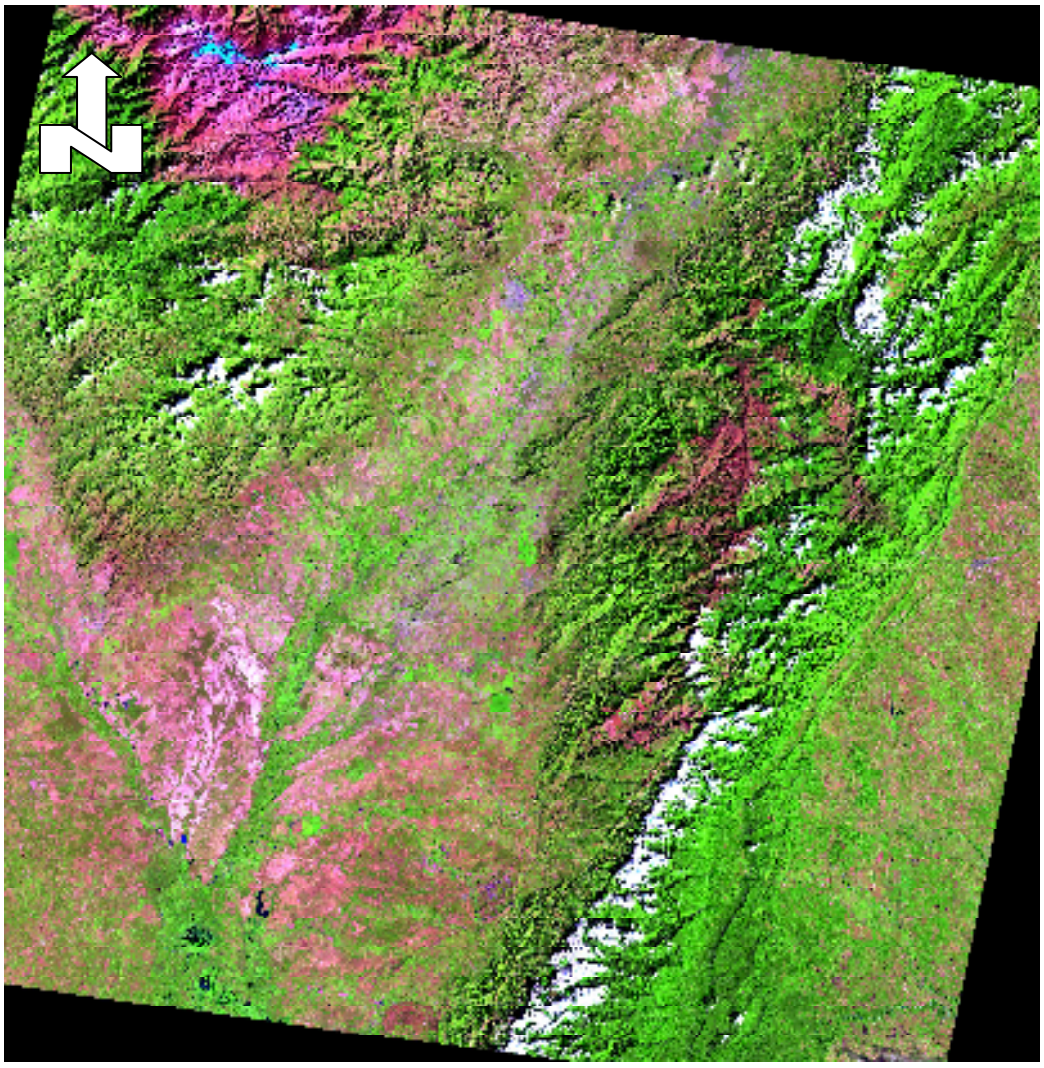


Figura 4.10. Combinación RGB 543 Se detalla en tonos rosados la humedad y resalta las estructuras (ver tabla 4.1)

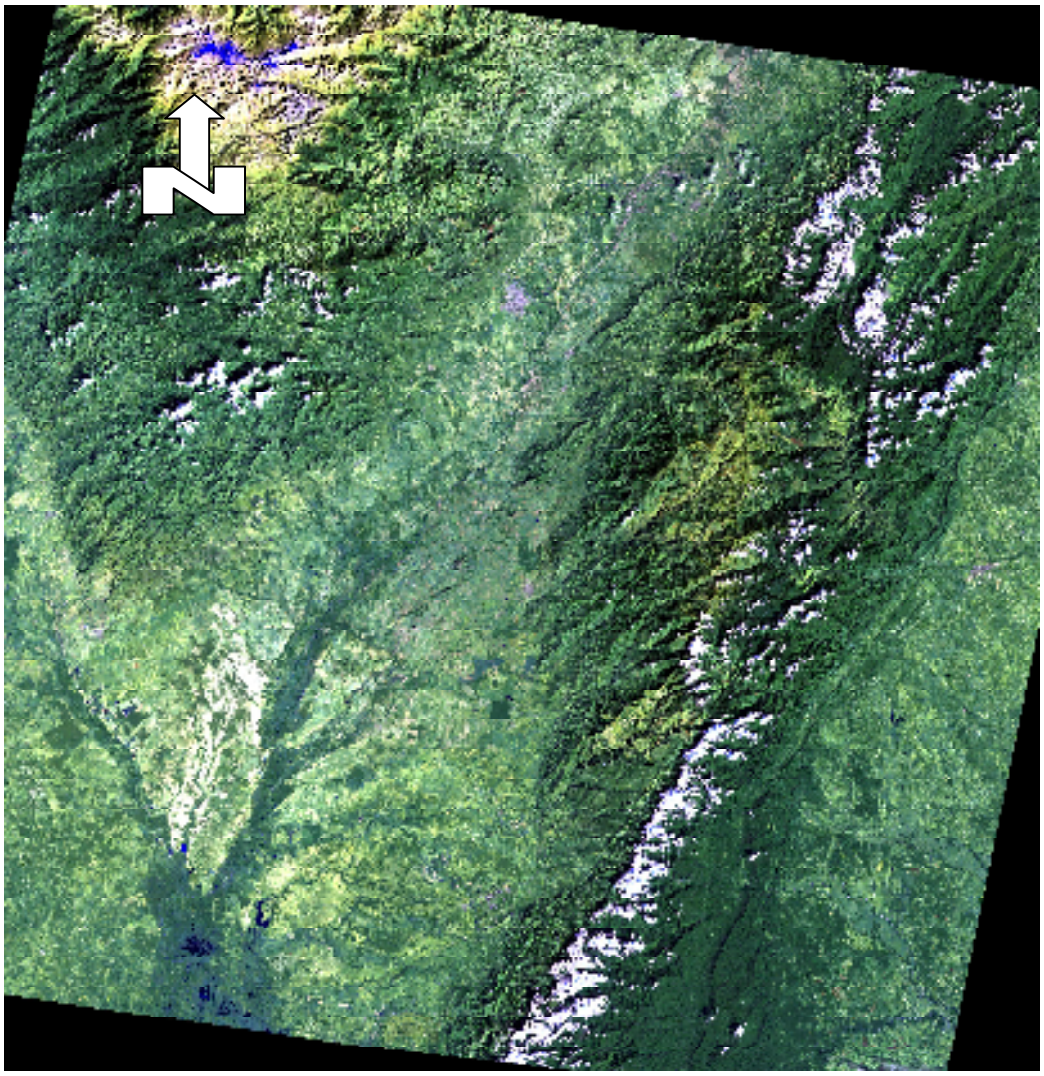


Figura 4.11. Combinación RGB 752. Resalta la vegetación, litologías y estructuras, donde los drenajes resaltan en tonos azules (ver tabla 4.1)

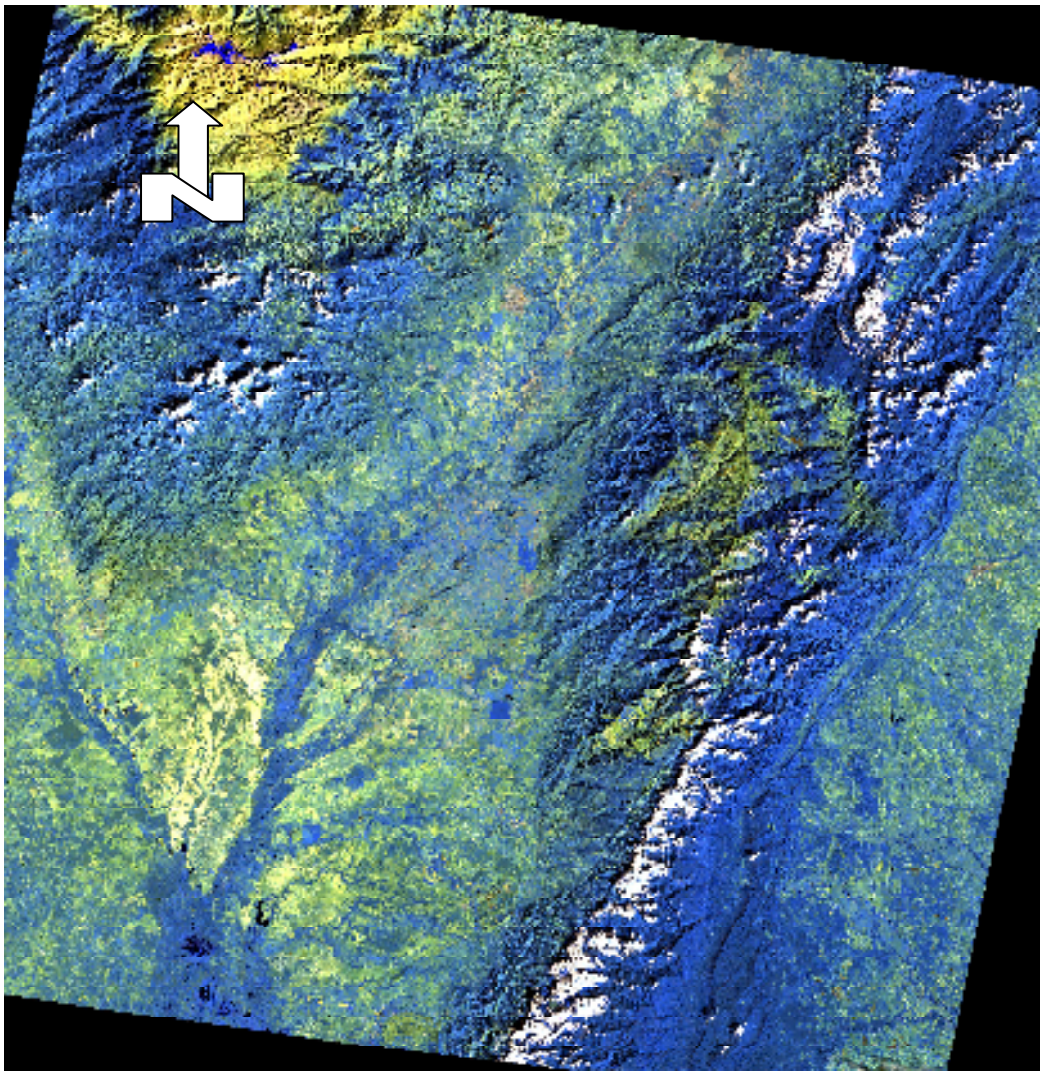


Figura 4.12. Combinación RGB 754 La humedad en el suelo resalta en tonos dorados, presenta el mismo realce que la figura anterior (ver tabla 4.1)

4.4 Operaciones entre bandas

Mediante el empleo de este procedimiento a través del paquete ENVI ® 4.2, se logro resaltar las características específicas en la imagen, ya que el mismo consistió en aplicar una serie de cocientes entre bandas y luego combinarlas entre sí (ver tabla 3.2). Las más resaltantes de esta operación son las siguientes:

Tabla 4.2. Combinación de cociente de bandas

Cocientes empleados	Combinaciones obtenidas (RGB)	Resultado	Figura
5/3 4/7 2/4	R: 5/3 G:4/7 B:2/4	Geología, zonas de aluviones y contrastes de litología	4.13
3/5 5/7 7/4	R: 3/5 G:5/7 B:7/4	Cuerpos de agua y geología	4.14
7/1	R: 7/1 G:5 B:7	Litología	4.15
3/1 5/4 5/7	R: 3/1 G:5/4 B:5/7	Geología	4.16
5/1 4/7 2/4	R: 5/1 G:4/7 B:2/4	Geología	4.17
4/3 5/7 3/2	R: 4/3 G:5/7 B:3/2	Geología	4.18
3/5 4/3 7/4	R: 3/5 G:4/3 B:7/4	Geología	4.19

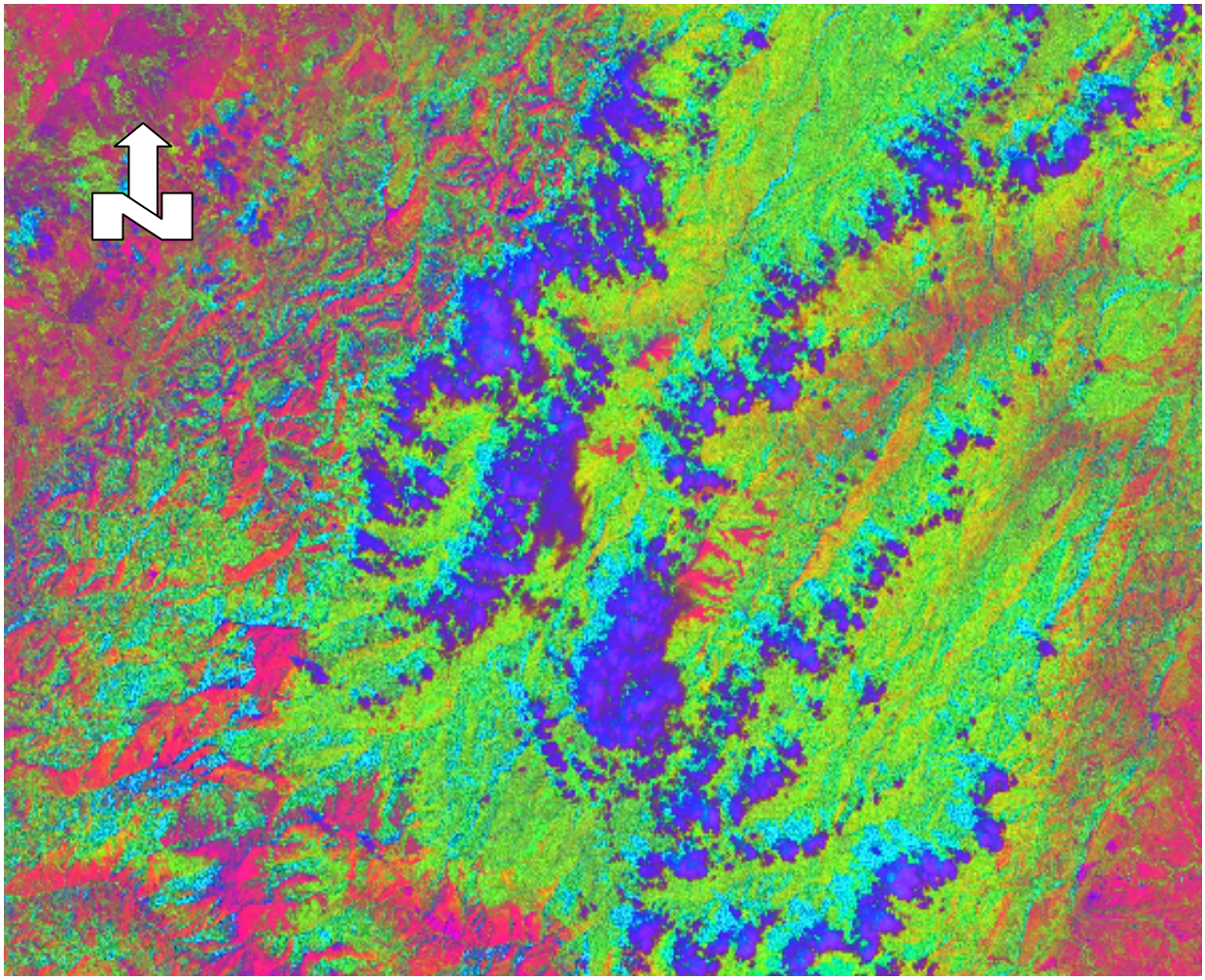


Figura 4.13 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (5/3 4/7 2/4), se observa el contraste de litologías (Ver tabla 4.2)

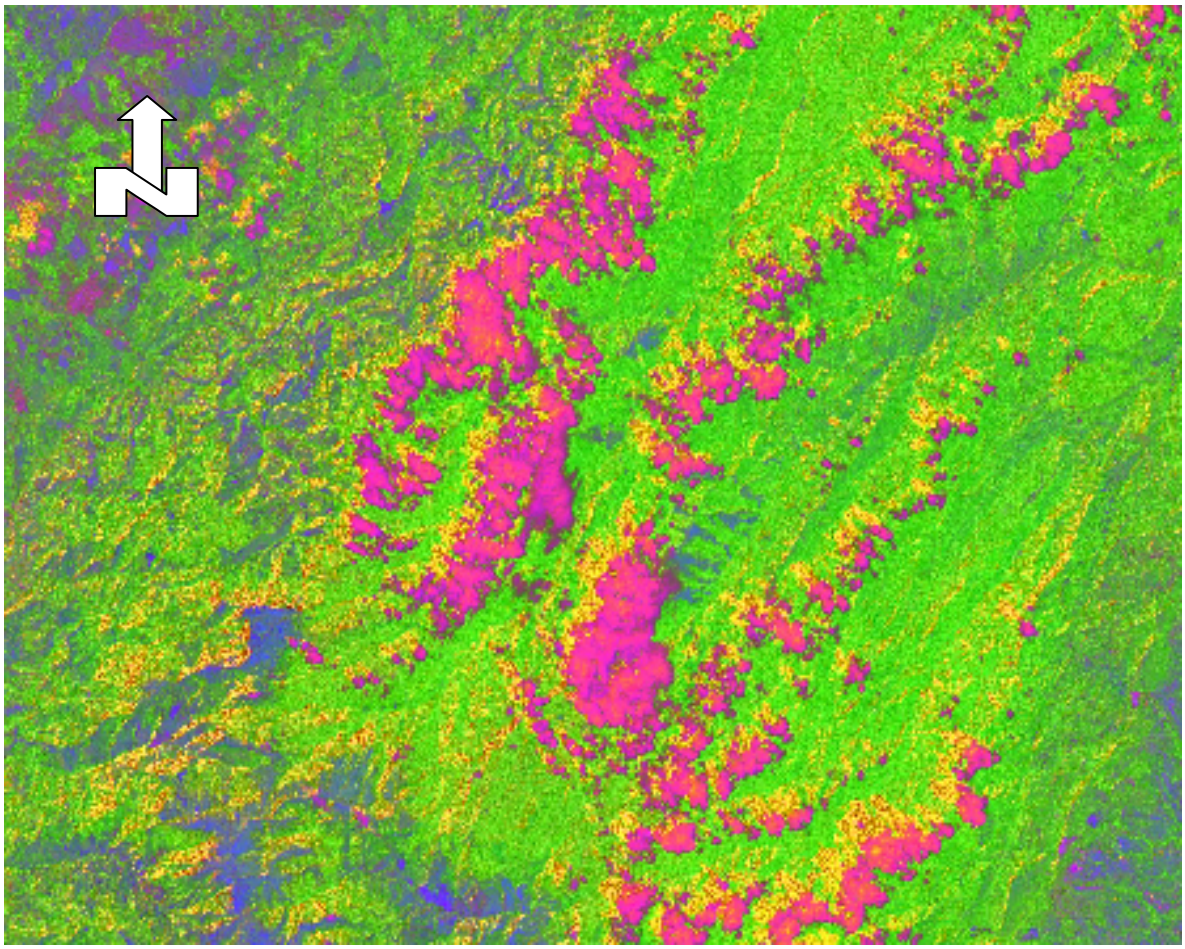


Figura 4.14 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/5 5/7 7/4), se detalla la geología de la región (Ver tabla 4.2).

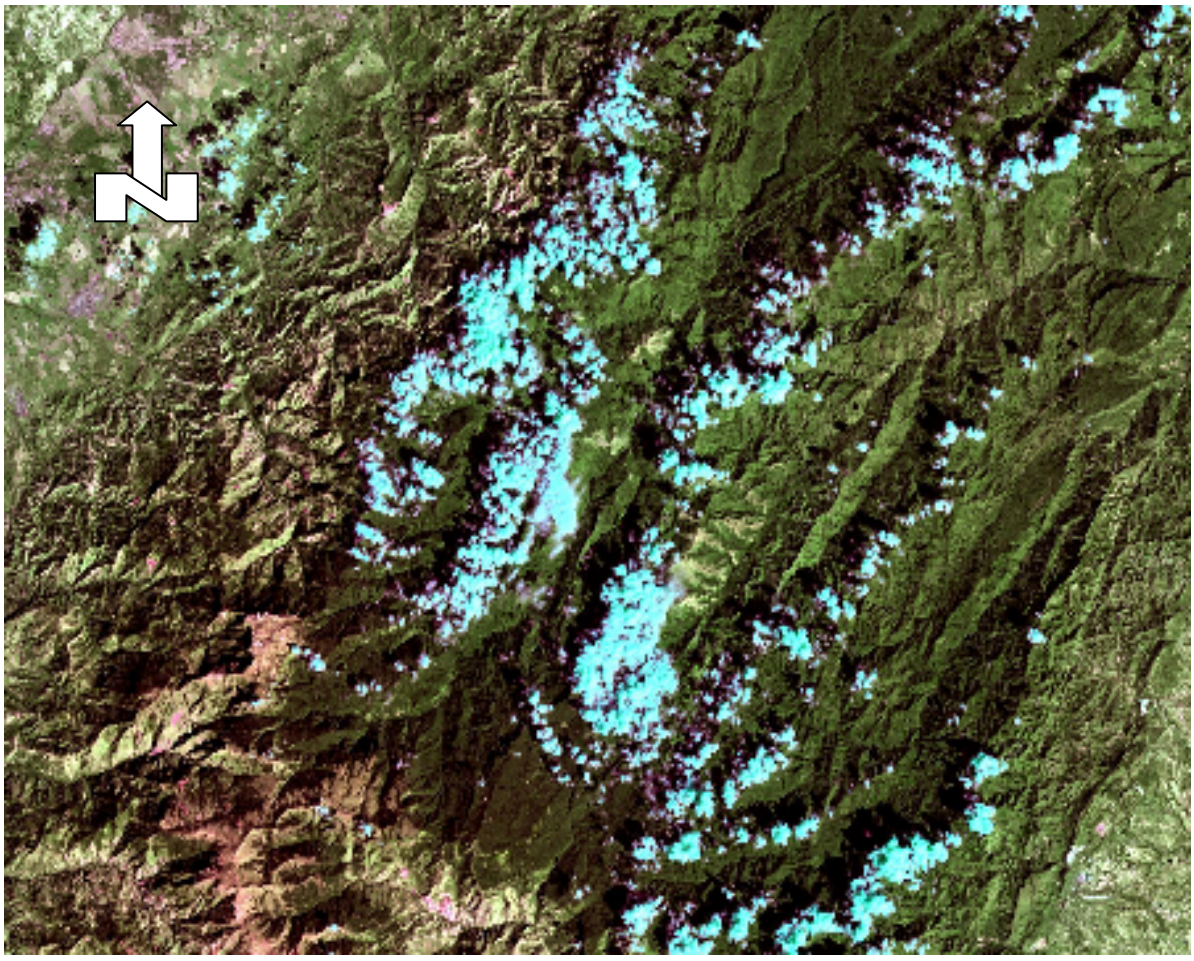


Figura 4.15 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (7/1 5 7) Resalta en variados tonos la litología presente (Ver tabla 4.2)

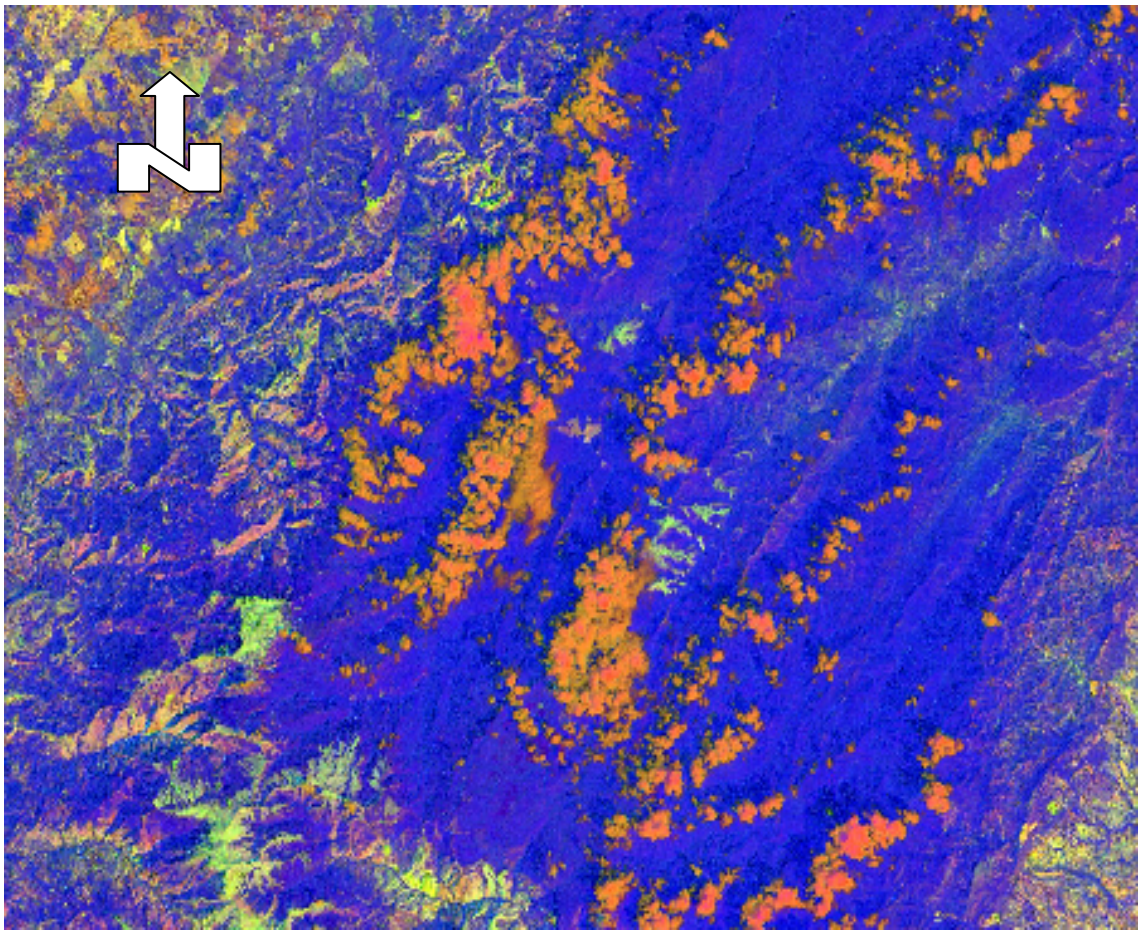


Figura 4.16 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/1 5/4 5/7), destacando variabilidad de litologías (Ver tabla 4.2)

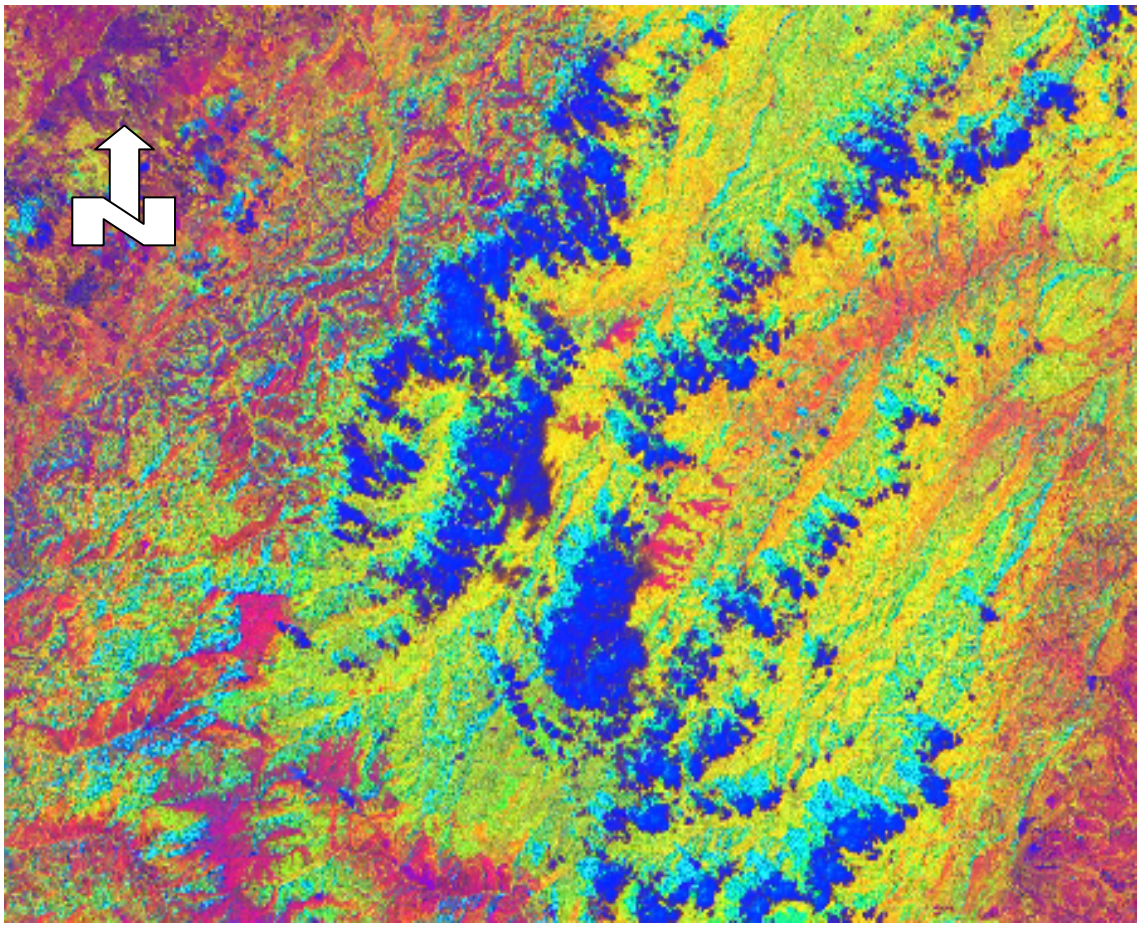


Figura 4.17 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (5/1 4/7 2/4), destacando variabilidad de litologías (Ver tabla 4.2)

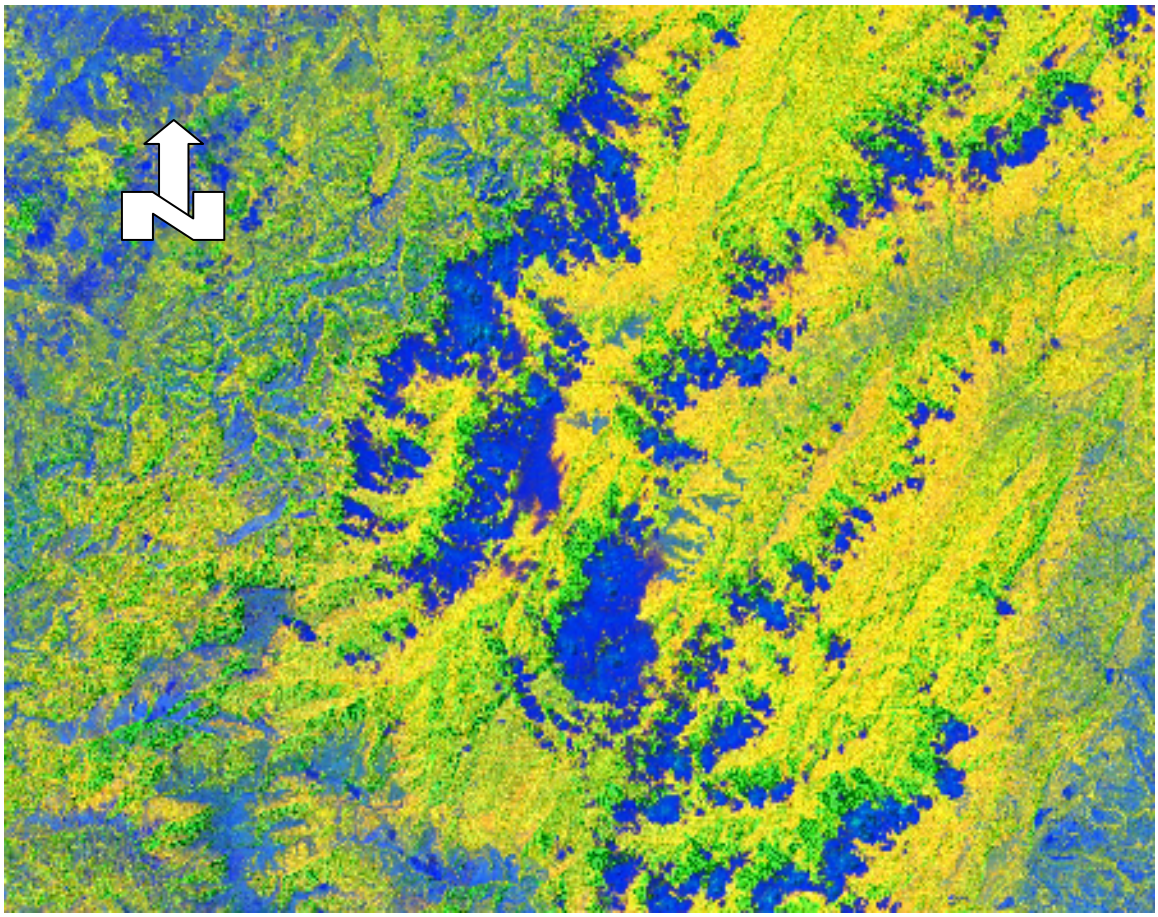


Figura 4.18 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (4/3 5/7 3/2), destacando variabilidad de litologías (Ver tabla 4.2).

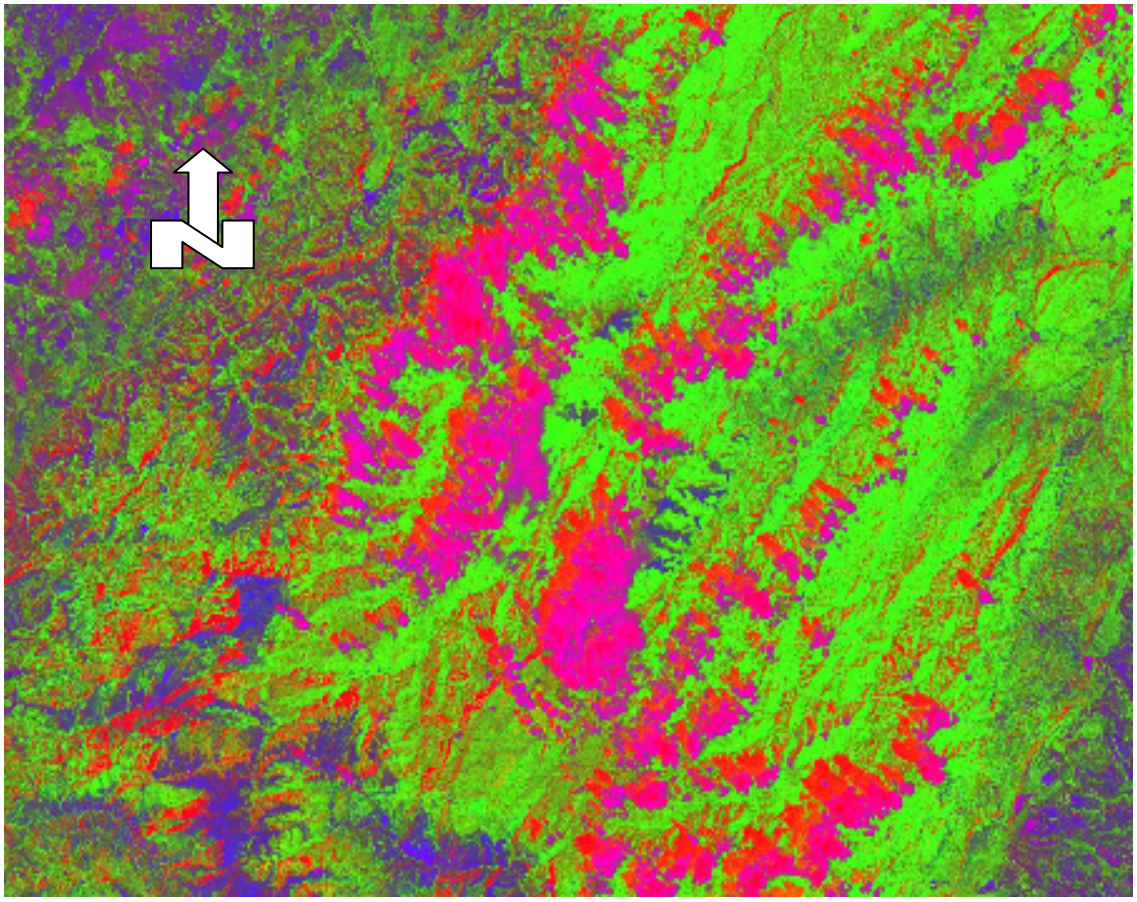


Figura 4.19 Imagen producida por el cociente de bandas RGB (3/5 4/3 7/4), destacando variabilidad de litologías (Ver tabla 4.2)

4.5 Rasgos Topográficos

Al observar la imagen se puede inferir que el área en estudio constituye una unidad topográfica de montaña con valles interdigitados en su totalidad, sus alturas varían desde los 600 m hasta los 3200 m. Las montañas presentes en esta zona poseen una orientación aproximada de N40°E ya que las líneas de crestas de las montañas son subparalelas y alargadas.

Geométricamente se presenta como un bloque con distintos laderas de pendientes medias a abruptas. El límite fronterizo entre Colombia y Venezuela representa la línea de cresta de la Sierra de Perijá, la cual se orienta con un rumbo es N20ºE en promedio, su punto más alto es 3600 m al noroeste, y el mínimo es 2800 m al suroeste.



Figura 4.20 Croquis topográfico de la zona de estudio que muestra la unidad topográfica en el área de Alto Guasare

Las montañas de la zona en su mayoría tienen una asimetría en sus flancos, ya que poseen laderas largas de pendientes suaves y laderas cortas y abruptas en el otro flanco esta asimetría se observa en general en todo el mapa siguiendo un patrón donde las laderas que tienen dirección este son las de pendientes suaves y largas y las laderas que están en dirección oeste son abruptas y cortas. Esto nos podría indicar que esfuerzos de corrimiento a que fueron sometidos los cuerpos rocosos de esta zona dando estas características a las pendientes de los flancos de las montañas observadas.

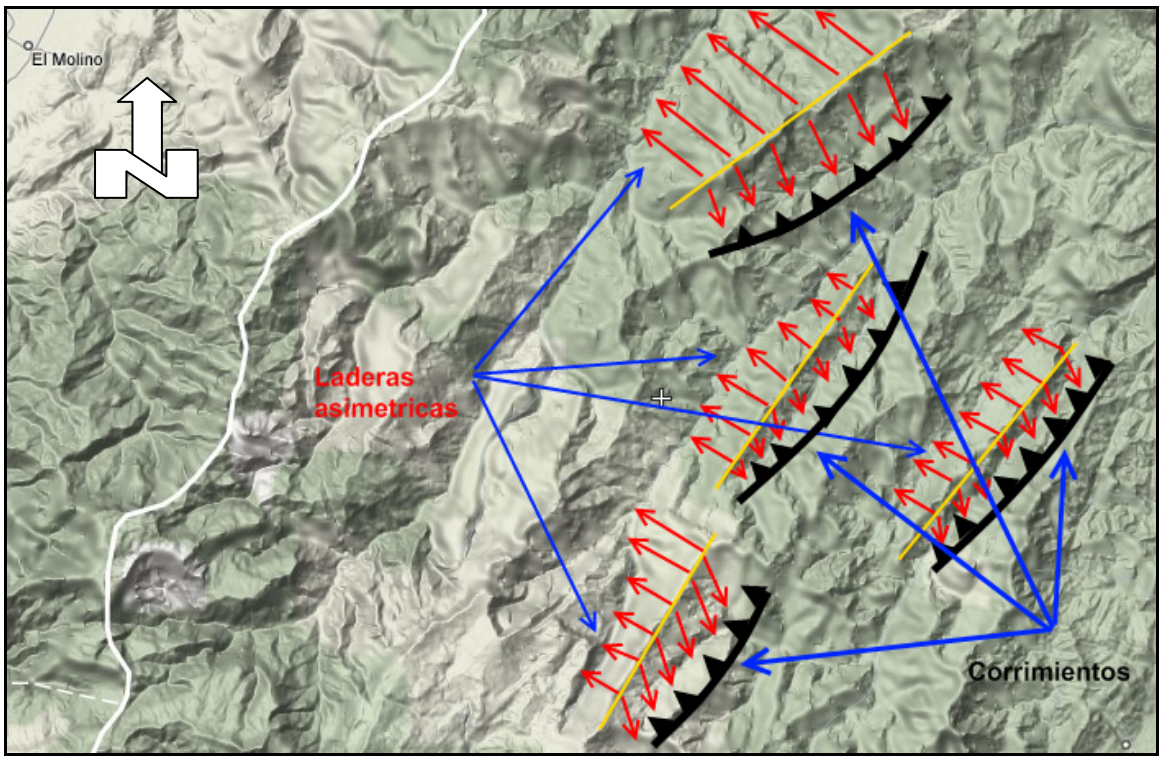


Figura 4.21 Croquis topográfico de la zona de estudio que muestra la evidencia de corrimiento en la zona.

4.6 Hidrografía

El drenaje en esta unidad es de tipo erizado que es típico de topografías abruptas donde ocurre erosión regresiva común en este tipo de relieve. En algunas zonas hay drenajes con patrones dendríticos, la red de tributarios se unen a los drenajes principales en grados casi llegando a los 90ª. Existen cuatro ríos principales, el río Guasare que es el mayor de la zona, el río Escondido que es tributario del río anterior, el río Palmar y el río Lajas, los cuales por lo general presentan una Geometría regular son bastante rectilíneos, lo que indica que están controlados por la presencia de fallas, fracturas, o contactos litológicos. (Ver figuras 4.21 y 4.22).

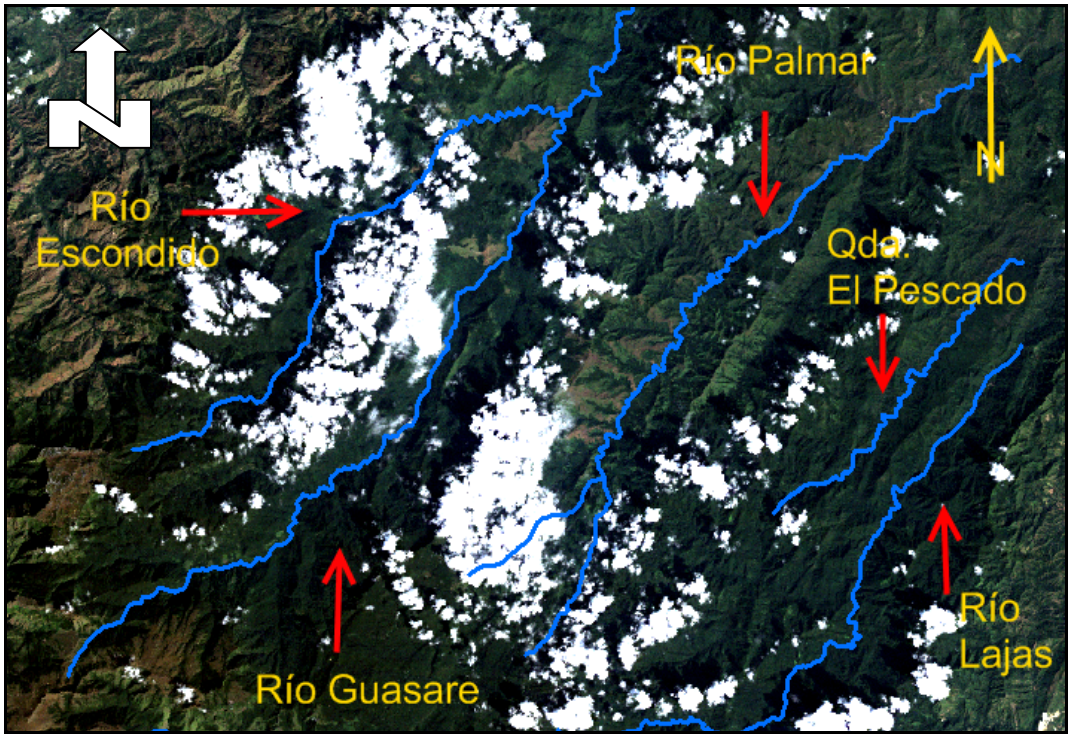


Figura 4.22 Drenaje principal de la zona de Estudio. Escala 1:250.000

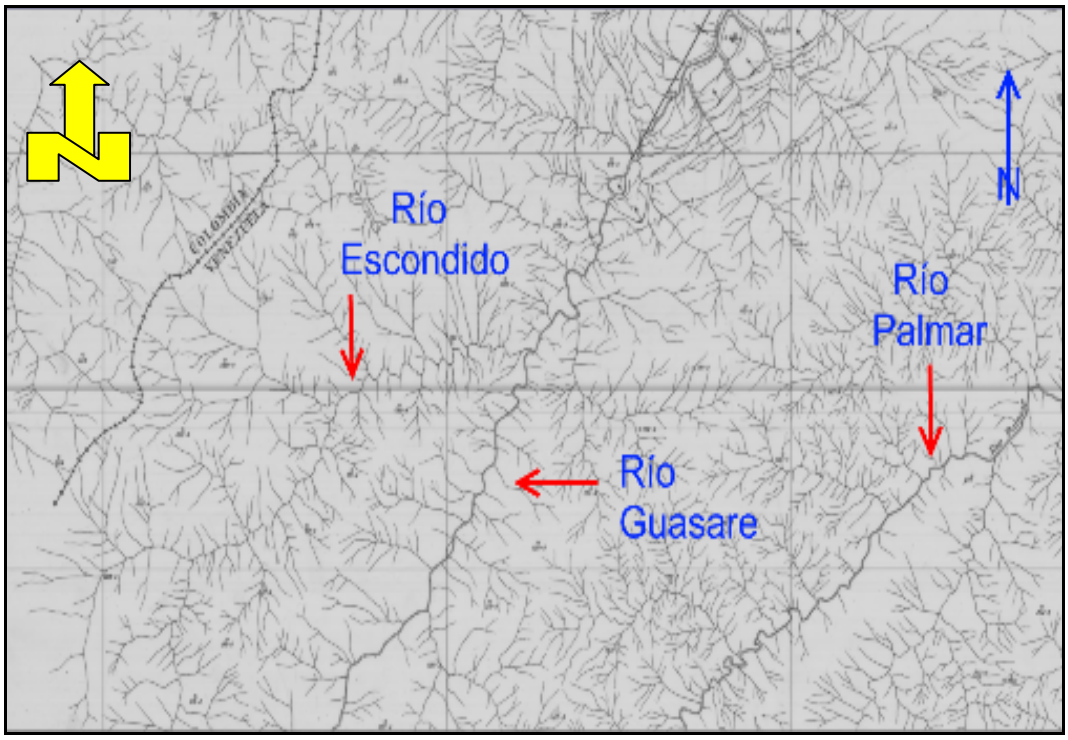


Figura 4.23 Drenaje principal de la zona de Estudio. Tomado DE Creole Petoleum Corporation mapa C-2-C escala 1.50.000

Los drenaje principal consisten en ríos con una geometría regular según las clasificación de Schunm (1963) con una orientación N40°E, presentan tributarios casi perpendiculares a su curso, lo nos indica que estos ríos siguen su cauce por unas fallas, evidenciando un control estructural en la zona, esto se detalla en la imagen donde los ríos son dominados por varias familias de fallas a nivel regional ya que se observó en su cauce como el río cambia de dirección bruscamente sin tener ningún obstáculo aparente.

4.7 Delimitación de contactos y reconocimiento de las secuencias mesozoica y paleozoica presentes en la zona de estudio mediante las firmas espectrales.

El área de estudio tiene una gran variedad de litologías, muchas de las cuales están en contacto con otras solo mediante sistemas de fallas, los contactos observados e inferidos en trabajos previos y mediante el análisis visual de las imágenes satelitales, mostraban ciertas discordancias de criterio, es por ello que mediante el empleo de la herramienta de las firmas espectrales se pudo constatar los límites o contactos entre distintas formaciones. El comando para el tratamiento de las imágenes a través de firmas espectrales fue explicado previamente en el capítulo 3, los polígonos para análisis de las firmas espectrales se baso en la verificación de los límites entre rocas de edad Paleozoico-Mesozoico sin diferenciar y rocas de edad Cretácico Temprano encontradas en la zona de estudio mediante la comparación de las firmas espectrales de estos polígonos, ya que estas arrojan unas graficas características de cada serie de litología, es decir una serie de polígonos pertenecientes a la misma unidad litológica presenta una grafica característica, que se puede comparar con diversas unidades.

1. Contactos entre unidades Pre-cámbricas con unidades Paleozoicas.

La única unidad de edad pre cámbrico presente en la zona de estudio lo constituye la Formación Perijá, que litológicamente son cuarcitas duras cortadas por diques y

vetas de cuarzo blanco, junto con micaesquitos y esquistos gneisoides, esta unidad se encuentra en contacto discordante infrayacente bajo una secuiencia del Paleozoico sin diferenciar. Estas dos formaciones tienen marcadas diferencias espectrales según se pudo corroborrar posteriormente en el análisis espectral.

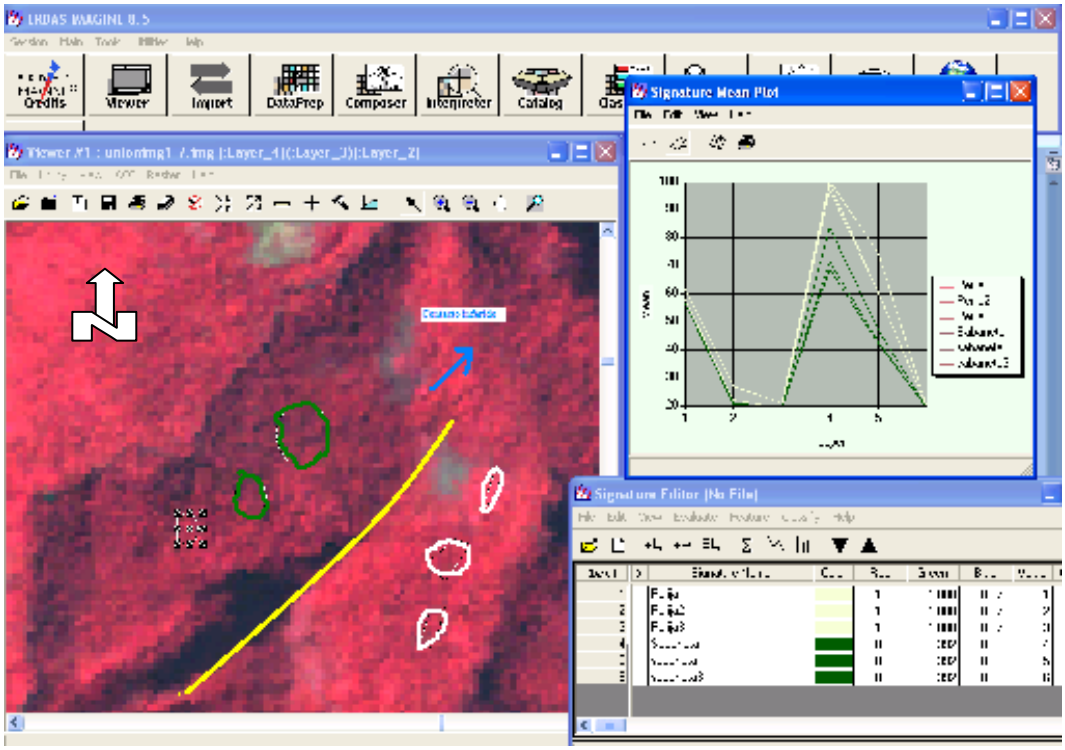


Figura 4.24. Comparación entre la Formación Perijá y paleozoico sin diferenciar.

2. Contactos entre unidades paleozoicas.

Esto ocurre entre las rocas datadas como paleozoicas y la Formación Rió Palmar que se compone predominantemente de calizas, oolíticas cerca de la base y fosiliferas en el resto de la sección y por sus fósiles (fusulínidos y corales) se considera de edad Pensilvaniano temprano, asociadas con cantidades menores de limolitas calcáreas finas, estas dos litologías hacen contacto en la zona. (Ver figura 4.24)

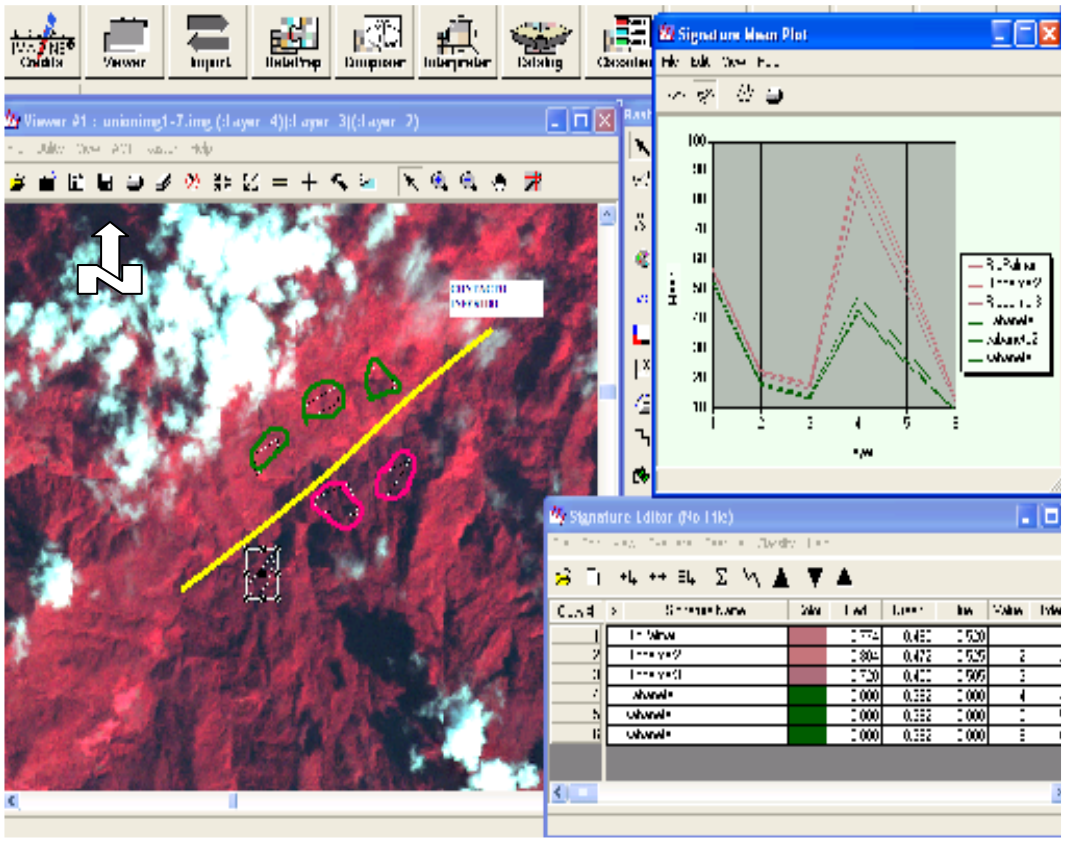


Figura 4.25 Contacto entre el paleozoico sin diferenciar y la Formación Río Palmar, mediante la aplicación de las firmas espectrales, donde se aprecia el contacto.

3. Contactos entre unidades paleozoicas con unidades mesozoicas

Ocurre entre el Grupo Río Cachiri de edad devónico que consiste principalmente de lutitas color negro, gris y rojo, areniscas grises micáceas, areniscas cuarcíticas y calizas de color rojo, gris azulado y negruzco. El grupo suprayace en contacto discordante y posiblemente de falla a las metamórficas de la Serie Perijá, e infrayace discordantemente a formaciones del Paleozoico Superior y Mesozoico del Grupo La Ge, y la formación Río Negro de edad Cretacica la cual se compone de conglomerados oligo y polimixtos, areniscas mal escogidas, capas de carbón, capitas de yeso y lutitas oscuras fosilíferas. Al aplicar el análisis espectral se observa como estas tienen rasgos muy diferentes. (Figura 4.26)

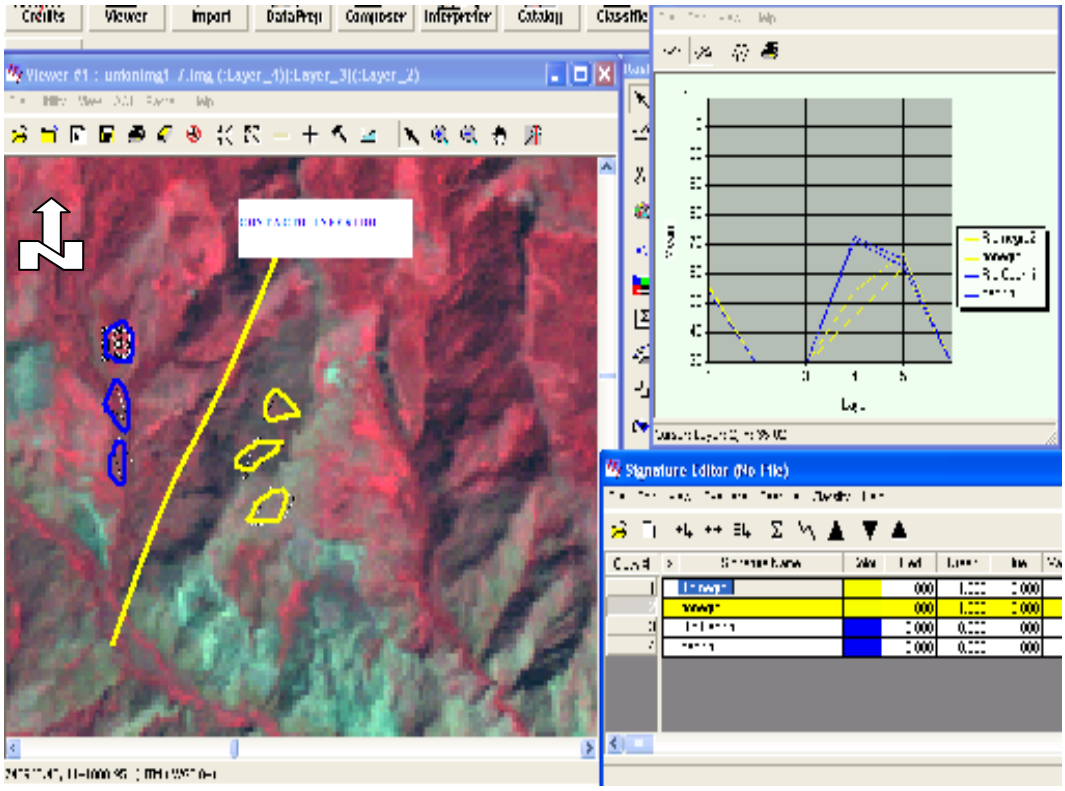


Figura 4.26. Imagen que muestra el Contacto entre el Grupo Río Cachiri y la Formación Río Negro, mediante la aplicación de las firmas espectrales, donde se aprecia el contacto.

Contactos entre unidades mesozoicas

Los contactos correspondientes a unidades mesozoicas se encuentran entre la formación Río Negro y el Grupo Cogollo, y el Grupo Cogollo con la formación La Quinta. La Formación Río Negro aflora claramente en la zona de estudio a través de una serie de bandeamientos, haciendo contacto superior con el Grupo Cogollo, esta Formación Río Negro se compone de areniscas blancas de grano grueso, arcosas y areniscas conglomeráticas y conglomerados con escasas lutitas mientras que el Grupo Cogollo presenta una asociación litogenica que va de base a tope por calizas densas, fosilíferas, con cantidades subordinadas de lutitas oscuras y pocas arenas calcáreas, que específicamente en Perijá presenta un intervalo de calizas negras, bituminosas (Miembro Machiques) y luego por encima, calizas coquinoides, margosas y nodulares, una sección distintiva de areniscas, calizas glauconíticas, intercaladas con

lutitas y un intervalo superior de calizas macizas, de color gris claro, con muchos moluscos, intercaladas con lutitas delgadas. Al realizar el análisis espectral se obtuvo una marcada diferencia en las graficas (Figura 4.26)

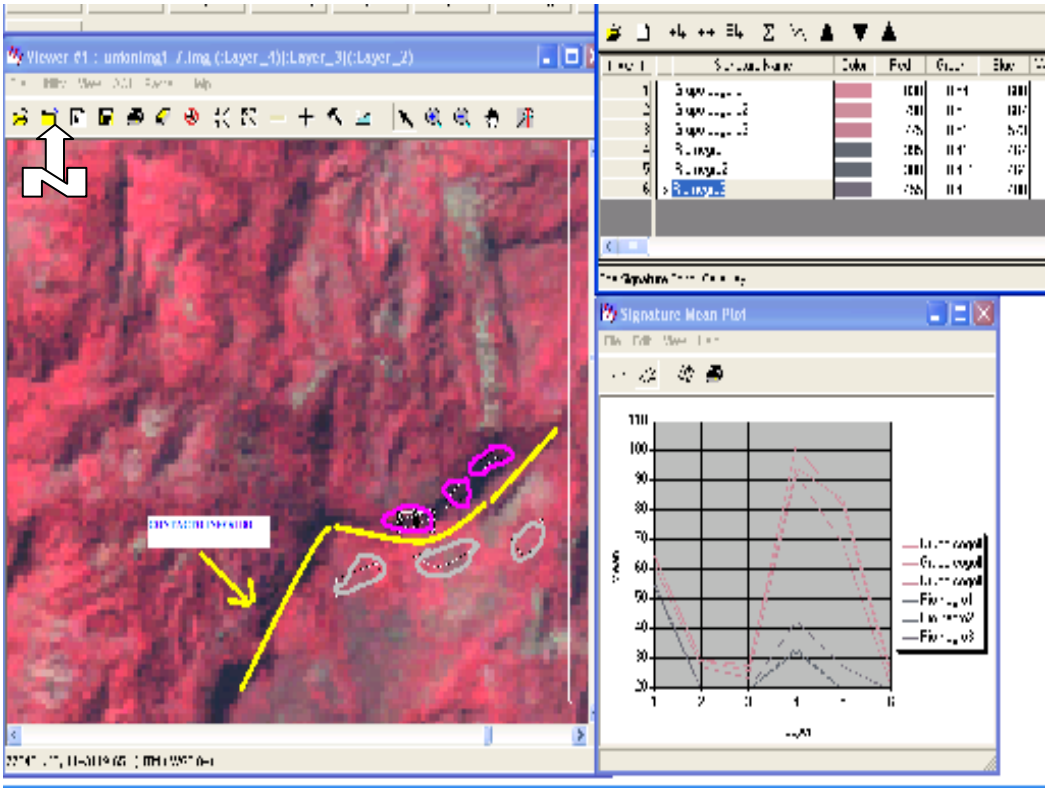


Figura 4.27. Contacto entre la Formación Rio Negro y el Grupo Cogollo, mediante la aplicación de las firmas espectrales donde se aprecia el contacto entre estas unidades.

La Formación La Quinta por su parte, de edad jurasico tardío, litológicamente consiste en areniscas (50%), conglomerados (35%) y lutitas (15%), suprayace discordantemente al Grupo Cogollo de edad cretácico con una característica litológica de areniscas, calizas y lutitas principalmente, la grafica de correlación nos muestra una marcada diferencia entre estas dos unidades (ver figura 4.28)

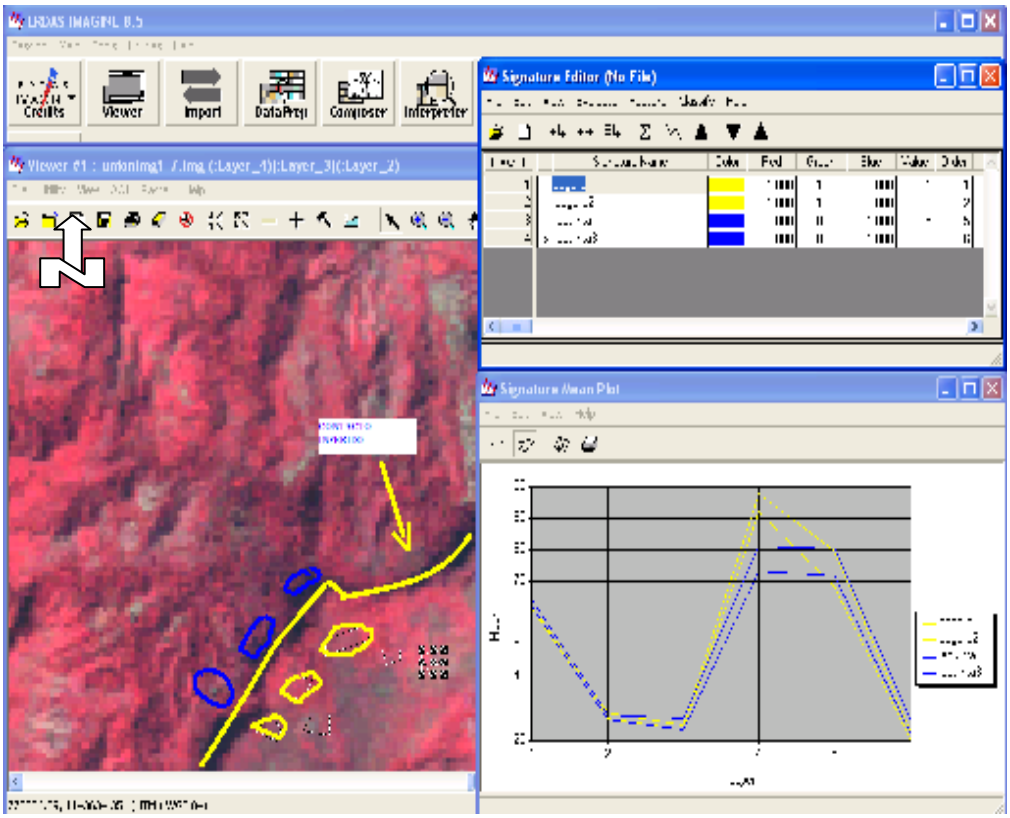


Figura 4.28. Se observa el contacto entre Grupo Cogollo y la Formación La Quinta, mediante la aplicación de las firmas espectrales, donde se aprecia el contacto.

4.8 Análisis Espectral de las unidades sin diferenciar y las unidades granitoides presentes en la zona.

1. En la zona de estudio se logra identificar a través de la recopilación bibliográfica de trabajos previos, cierta unidad sin identificar de edad Devónico, en la hoja de estudio se encuentran aflorantes el Grupo Río Cachiri, y una de sus formaciones como lo es la Formación Los Guineos, Estas unidades no se encuentran en contacto pero se puede realizar el análisis espectral para determinar similitudes o diferencias entre ellas (figura 4.29).

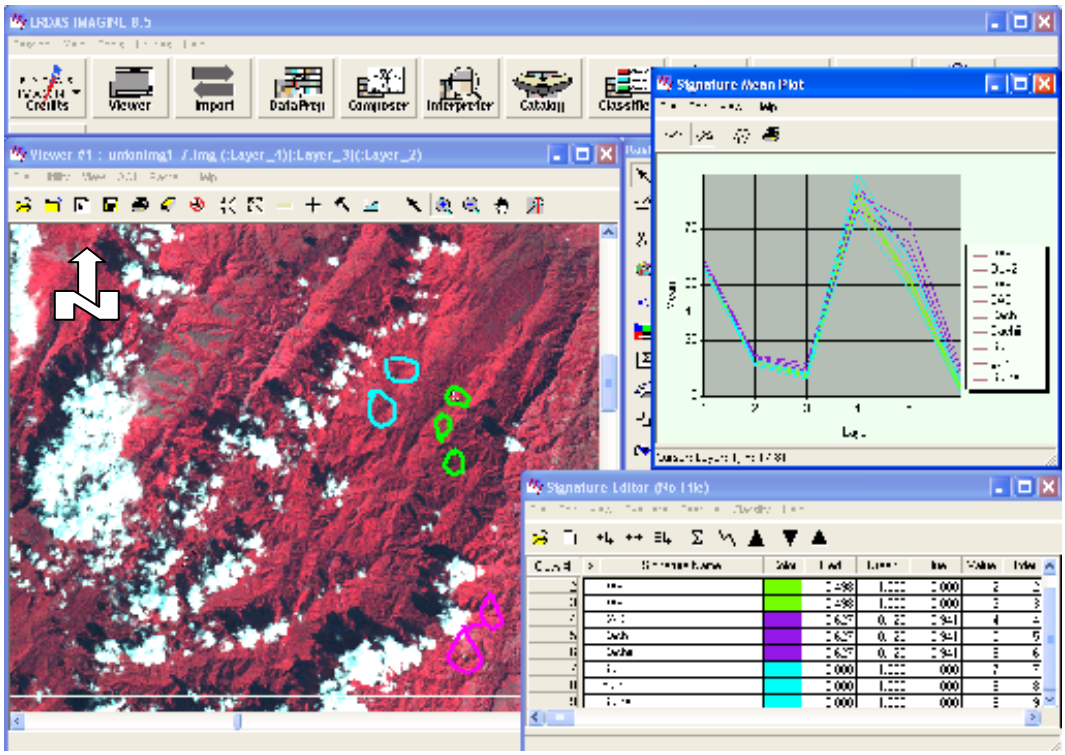


Figura 4.29. Análisis Espectral comparativo entre las unidades devónicas mediante el análisis espectral, donde se aprecia la similitud existente entre la Formación Los Guineos y el devónico sin diferenciar.

Aunque el estudio no es concluyente, se puede observar que la grafica de unidades devónicas sin diferenciar muestra una tendencia más semejante a la Formación Los Guineos, recordemos que el Grupo Río Cachiri consta de cuatro formaciones a saber de base a tope Formación Los Guineos, Formación Caño Grande, Formación Caño del Oeste y Formación Campo Chico, todas con una variedad de litologías, mas sin embargo al detallar bien la grafica obtenida, podemos concluir que la unidad se trate de una unidad devónica sin diferenciar, ya que posee los mismos quiebres, puntos máximos y mínimos que las unidades devónicas conocidas.

2. En la zona de estudio se puede apreciar una serie de intrusiones graníticas, bien estudiadas y tratadas en el capítulo 2, a estos cuerpos se les aplicó la herramienta de las firmas espectrales, para a través de la herramienta comprobar espectralmente sus similitudes o diferencias.

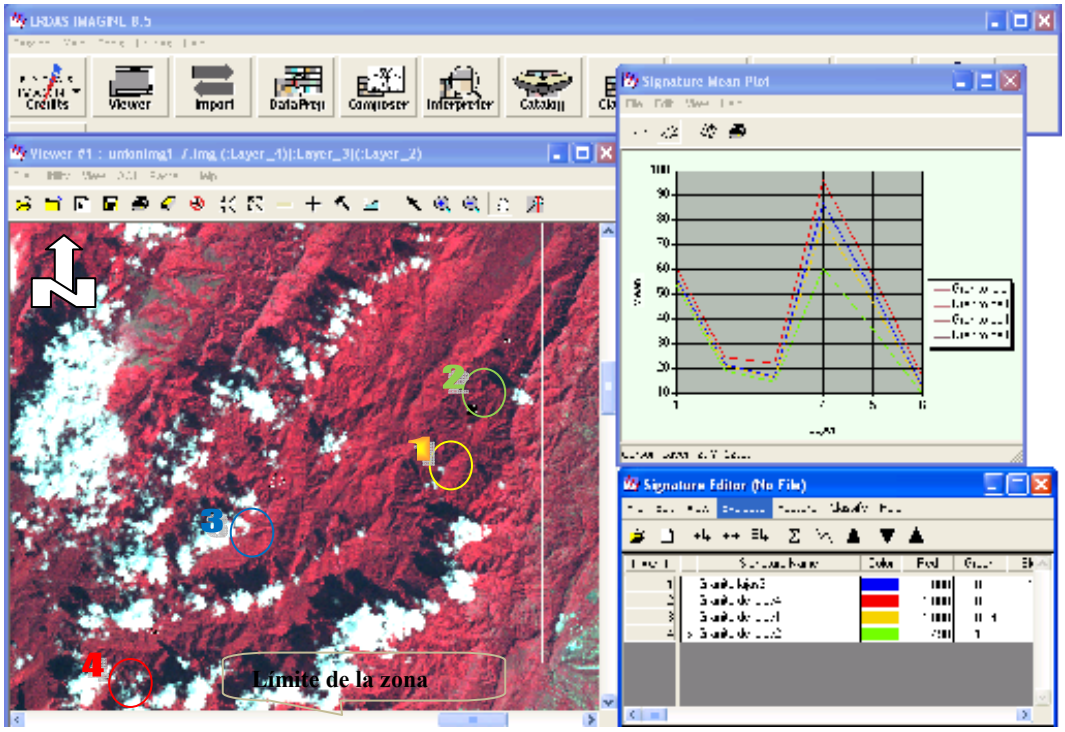


Figura 4.30. Análisis espectral de los cuerpos granitoides denominados Granito de Lajas, se aprecia la misma tendencia de los cuatro cuerpos confrontados.

4.9 Análisis espectral de las unidades paleozoicas de presentes en la zona

A través del análisis de las firmas espectrales en la imagen de estudio y específicamente en la región de interés, donde afloran un conjunto de unidades paleozoicas, se logró confrontar las características espectrales de cada unidad, y se pudo corroborar, ciertas diferencias y similitudes en las curvas graficadas que merecen mención, en primer lugar las curvas mas símiles corresponden a unidades de edades carbonífero-permico, específicamente las curvas obtenidas con la Formación Palmarito y la Formación Rio Palmar, la primera de edad pérmico y la segunda de edad pensilvaniense. El siguiente punto relevante corresponde a la similitud de las curvas obtenidas por unidades del devónico las cuales presentan grandes características iguales, los mismos quiebres y tendencias se pueden observar en las

curvas graficadas por las formaciones Grupo Rio Cachirí, la Formación Los Guineos y el devónico sin diferenciar encontrado en la zona.

Por último se puede observar en la grafica de las curvas de unidades del paleozoico, que existe una curva cuya tendencia no asemeja el comportamiento espectral de las anteriores unidades estudiadas, y por el contrario presenta una marcada discrepancia.

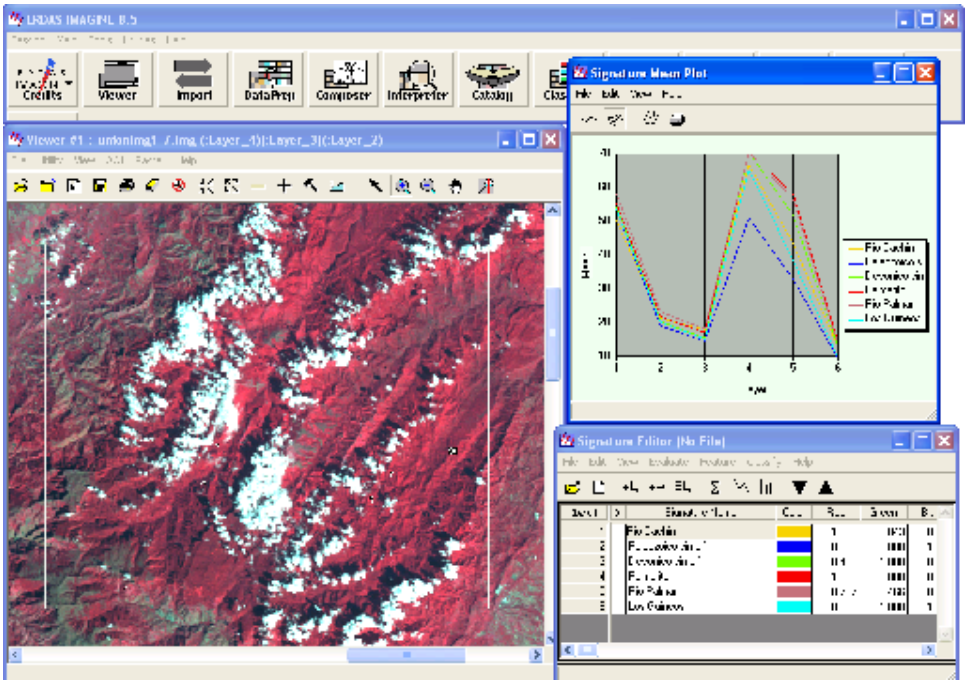


Figura 4.31. Firmas espectrales para unidades del paleozoico. Se resalta en la grafica a la derecha, la marcada diferencia existente entre el grupo de formaciones del paleozoico superior y la unidad determinada como paleozoico sin diferenciar.

4.10 Comparación entre el trabajo propuesto y los mapas geológicos anteriores de la zona

Para la actualización del mapa geológico de Alto Guasare, se comparo con mapas anteriores trabajados en la zona por diferentes autores para llegar a un mayor consenso y así el estudio fuese más detallado.

Los mapas geológicos anteriores disponibles para consultar son:

- Mapa geológico de la sierra de Perijá, escala 1:50.000, autor Creole Petoleum Corporation **C-2-C** (1961).
- Mapa geológico de la sierra de Perijá, escala 1:500.000, autor Ministerio de Energía y Minas (1980).
- Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000, autor Urbani (et al; 2005).

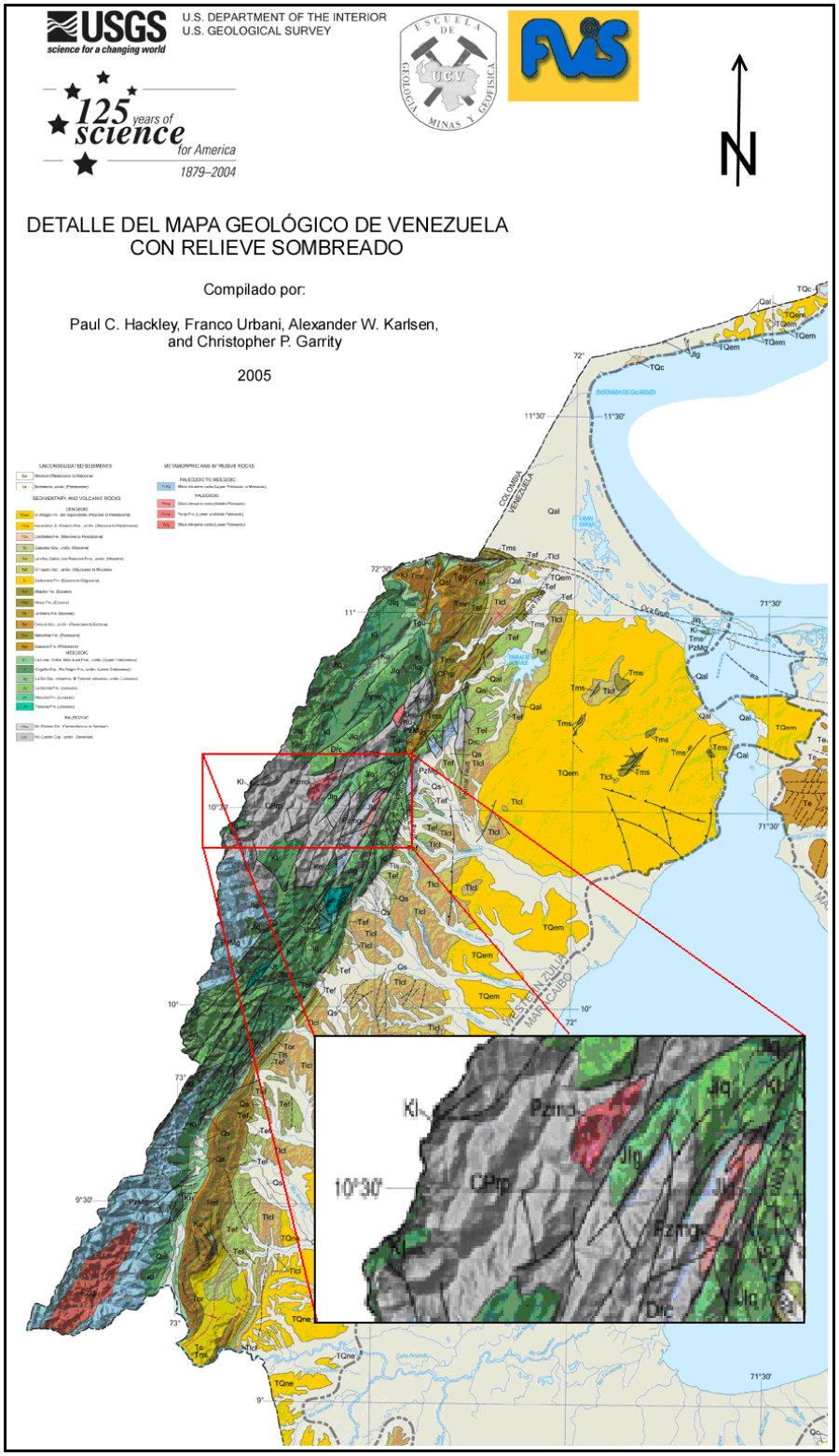


Figura 4.32 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000 Tomado y modificado de Urbani et al (2005).

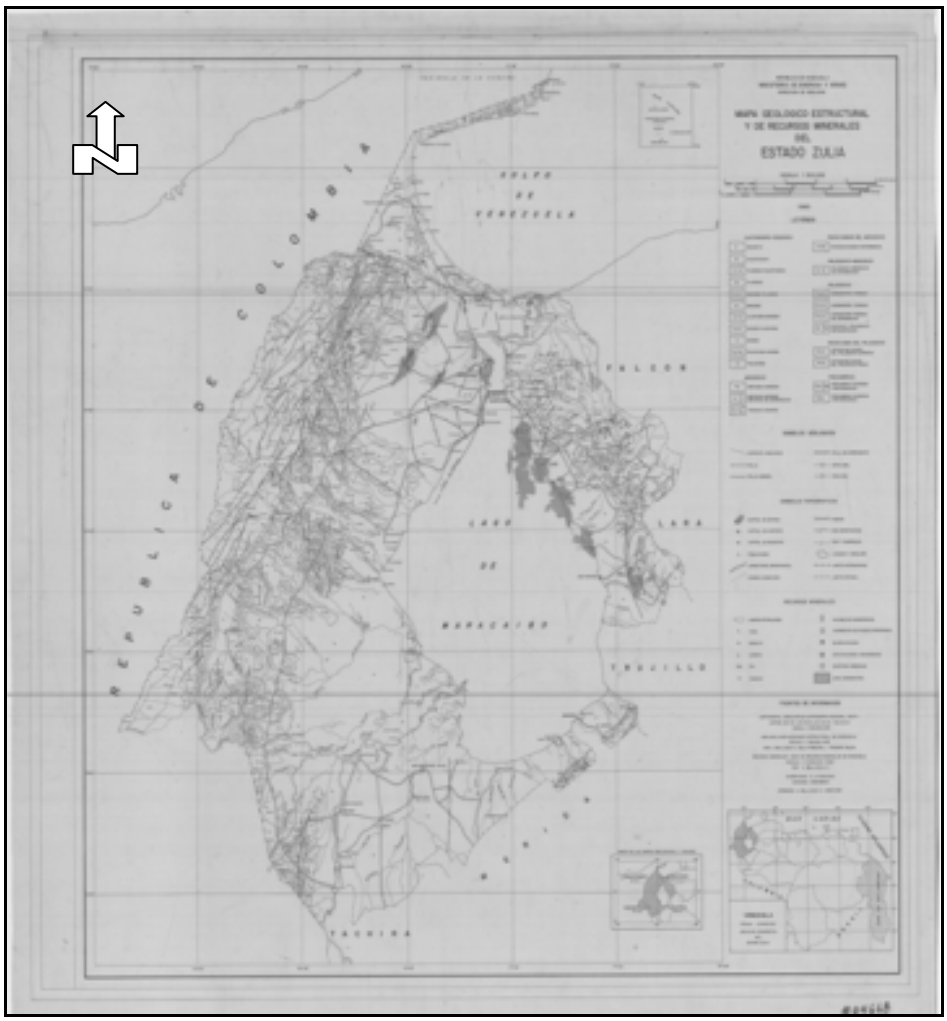


Figura 4.33 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000 Tomado y modificado de Ministerio de Energía y Minas (1980)

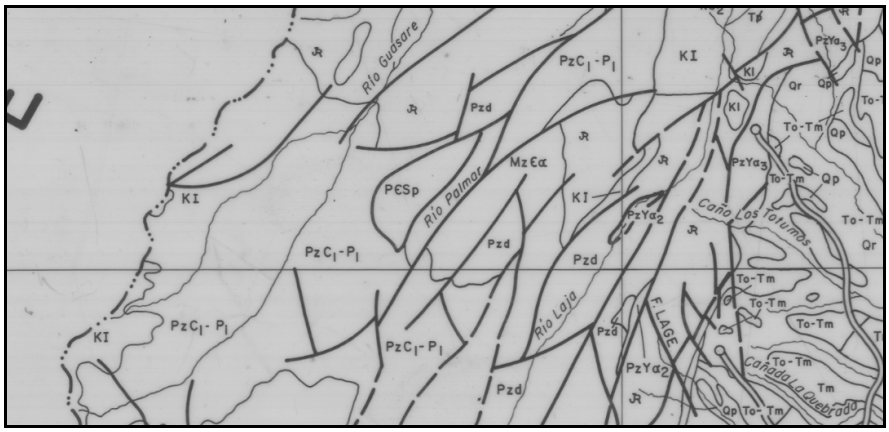


Figura 4.34 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:500.000 Ampliación del mapa anterior zona Alto Guasare Tomado y modificado de Ministerio de Energía y Minas (1980)

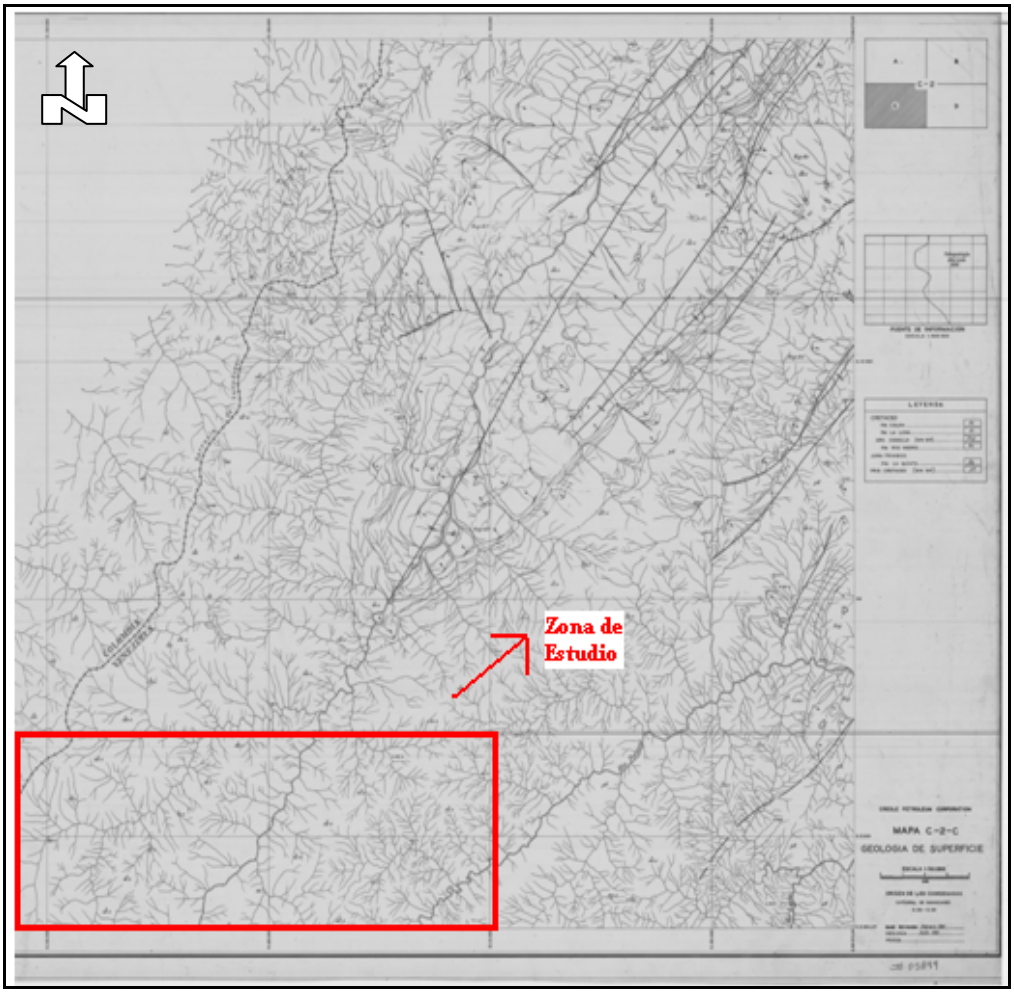


Figura 4.35 Mapa geológico de la sierra de Perijá Escala 1:50.000 Tomado y modificado de Creole Petoleum CorporationC-2-C (1961)

El mapa producto de este trabajo tiene diferencias y similitudes a los mapas antes mencionados más si embargo se definieron nuevos aspectos creando así la actualización de la cartografía geológica de la zona de Alto Guasare, entre las actualizaciones realizadas en este trabajo se encuentran:

- Se redefinió un nuevo trazado para los contactos entre formaciones, a través de empleo de firmas espectrales realizadas en ERDAS IMAGINE 8.5, mediante las cuales se pudo corroborar y actualizar los límites entre unidades estratigráficas.

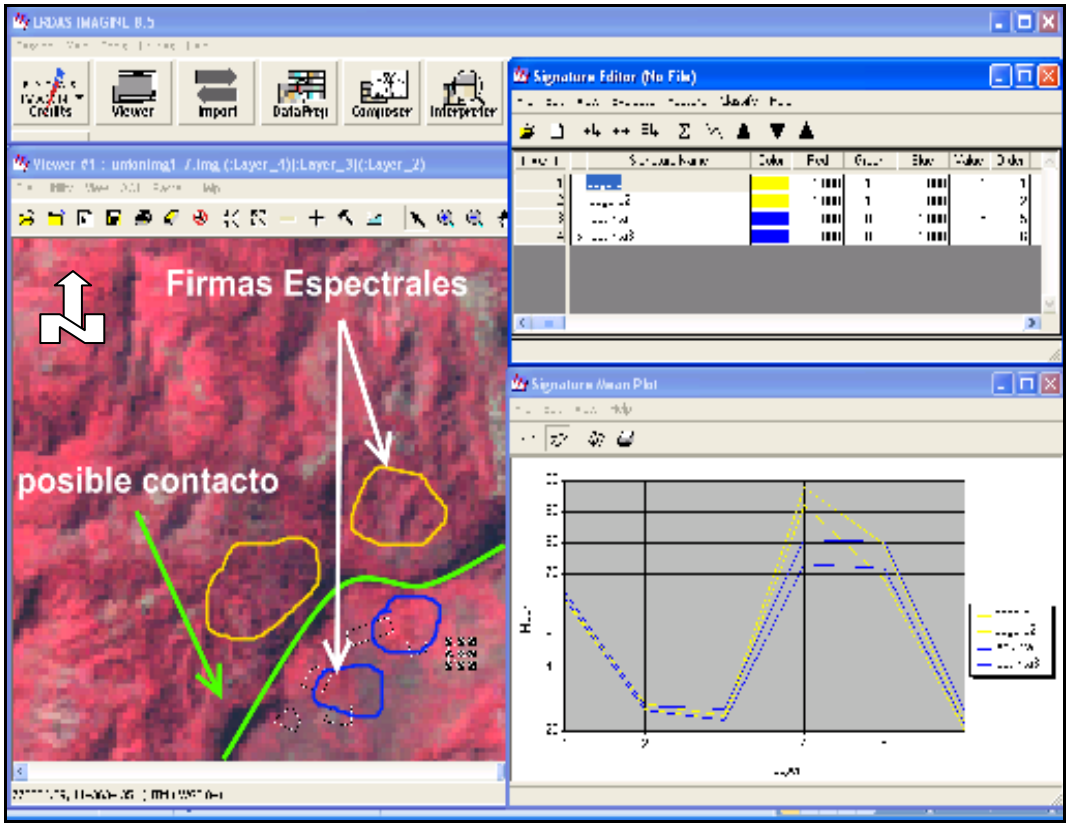


Figura 4.36. Firmas espectrales de la zona de Estudio mostrando definición de contactos Estratigráficos

➢ La red de drenaje cartografiada para la zona de estudio en cuestión databa del año 1969, por lo cual muchos de estos cauces tenían alteraciones en sus cursos que fueron constatadas al analizar las imágenes satelitales Landsat 7 del año 2000 y actualizadas en este trabajo.

➢ Retrazado de las estructuras geológicas, mediante las combinaciones de bandas se pudo constatar los lineamientos característicos que presentaban las fallas en la zona, apoyándose en la red de drenajes existentes.

➢ Se incorporaron curvas de nivel en intervalos de 400m a la cartografía geológica con el objeto de facilitar el análisis topográfico en el mismo mapa geológico.

- Coloración de las unidades estratigráficas basándose en la nomenclatura de la Guía Estratigráfica Internacional.

- Actualización de las unidades estratigráficas en uso de acuerdo léxico estratigráfico venezolano (LEV).

4.11 Geología estructural de la zona

El análisis estructural consta de la identificación y jerarquización de estructuras principales, el respectivo estilo estructural y finalmente el establecer las fases de deformación. La Sierra de Perijá tiene una geología estructural dominada por fallas que dan a su relieve un carácter topográfico abrupto. Los bloques de montañas que se han formado (grabens y horts) y las laderas orientales son extremadamente empinadas.

En general si observan 2 sistemas de fallas, un sistema principal de fallas con una orientación aproximada de N50ºE paralelas entre si que son de una gran extensión y formadas por los esfuerzos principales a la que esta sometida toda la sierra de Perijá, siendo estas evidencias de un corrimiento, estos esfuerzos generadores de estas fallas tienen una dirección suroeste-noreste como lo muestra la (ver figura 4.36.) El otro sistema secundario de falla esta conformado por fallas más pequeñas que son denominadas fallas de reacomodo estructural y tienen direcciones generalmente contrarias al sistema principal de fallas siendo de extensiones mucho más pequeñas.

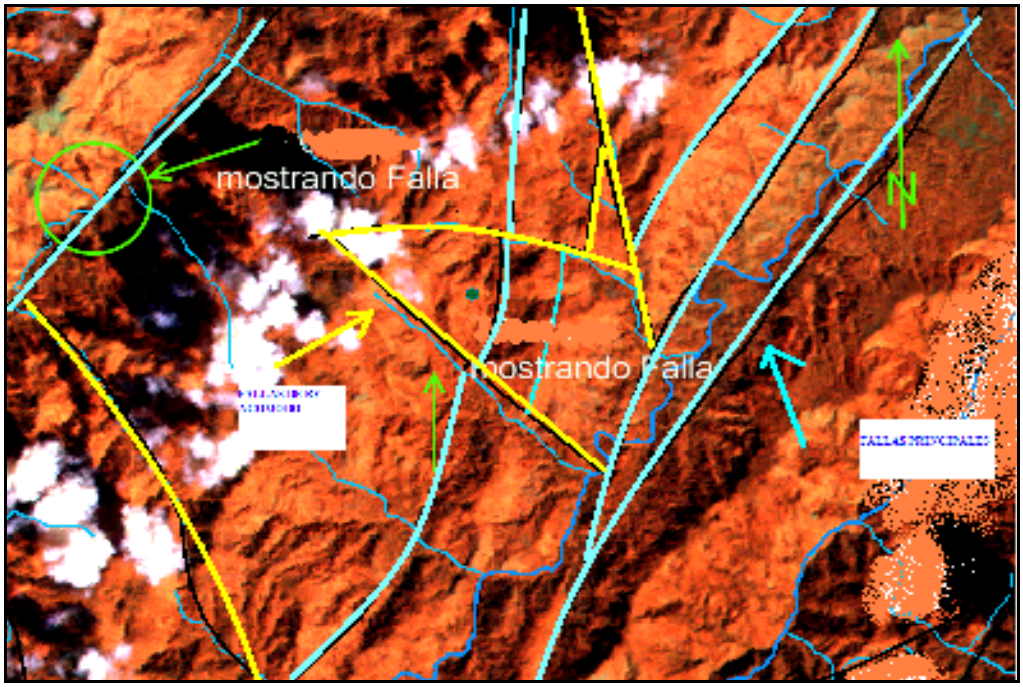


Figura 4.37. Se muestra los dos sistemas de fallas el principal en azul cielo y el secundario en amarillo.

El corrimiento que se encuentra en la zona tiene una vergencia hacia la cuenca del lago de Maracaibo ya que este muestra evidencia de ellos ya que las montañas tienen una laderas asimétricas las laderas oeste son largas y de pendiente suave y las laderas este presenta unas laderas muy cortas y de pendientes muy pronunciada y fue comparado por estudios estructurales previos donde se determinó que existía correspondencia con lo propuesto por E. I. G. LITOS C. A (1997)(ver figura 4.37).A la zona de estudio se le puede atribuir un estilo estructural eyectivo, debido a que la deformación de la zona está representada por sinclinales amplios intercalados con anticlinales más estrechos, en general los pliegue presentes en la zona son asimétricos. El sistema de graben desarrollado a partir de la extensión, cambia a una fase de compresión, presumiblemente durante Jurásico superior a Cretácico Inferior. Posteriormente, los sedimentos fueron plegados y fallados siendo expuestos a la erosión (Stephan, 1980).

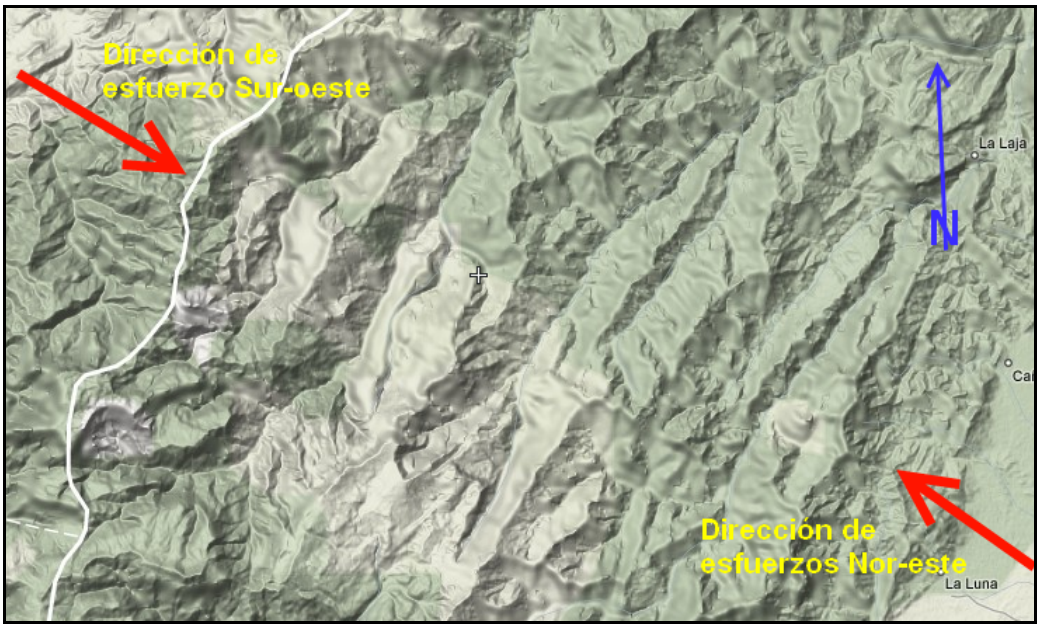


Figura 4.38. Imagen que muestra los esfuerzos principales de una manera muy general. Tomado y modificado de Wikimapia.

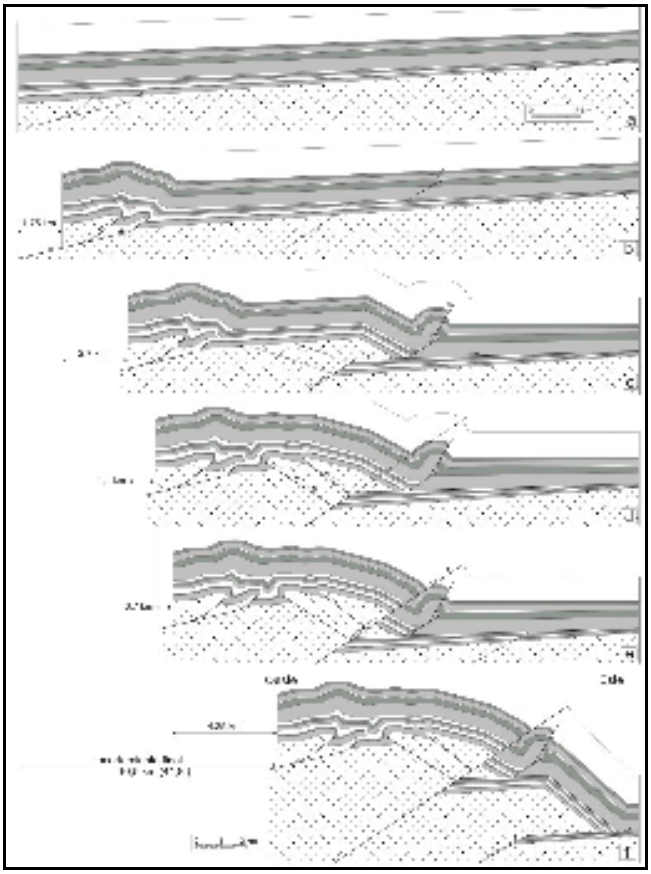


Figura 4.39. Imagen que demuestra las fases de formación de un corrimiento. Tomado de www.scielo.org.ar

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Las clasificaciones (Supervisada y No Supervisada) expresan 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.

- Mediante la utilización del paquete Erdas 8.5 y el modulo de firmas espectrales en la interpretación de las imágenes satelitales se logra verificar y en otros casos corregir los contactos de las unidades presentes en la zona de estudio, dando una idea del gran aporte de herramienta ya que estas se apoyan en el análisis de superficie y el contenido espectral.

- 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.

- El mapa realizado en este trabajo presenta diferencias entre los contactos de formaciones con respecto a los mapas anteriores de la zona de estudio. Estas variaciones entre contactos en el modelo propuesto obedecen a la interpretación y análisis de la imagen multiespectral utilizada.

- Las imágenes satelitales LANDSAT 7 brindan una herramienta eficaz para las actualizaciones de la cartografía geológica de amplias zonas, ya estas imágenes alcanzan un área de 180 km x 180 km., y pueden lograr una resolución espacial de 30 m. lo que permite un buen acercamiento y alto detalle geológico.

- Al aplicarle a las imágenes LANDSAT 7 los procedimientos de combinación de bandas y cociente de bandas, es posible obtener información reciente de la zona de estudio, sin emplear grandes recursos.

- La presencia de nubes y la cobertura vegetal densa en la imagen impone severas limitaciones al análisis de la zona mediante sensores remotos.

- Las imágenes Landsat proporcionan una actualización constante de la zona de estudio ya que el satélite toma fotografías periódicamente dando información nueva y actualizada del área de interés.

- Los sensores remotos permiten determinar y resaltar estructuras presentes en la superficie terrestre e inferir su comportamiento, así como también hacer clasificaciones supervisadas y no supervisadas que facilitan la delimitación de las unidades en base a características espectrales comunes.

- Con el pre-procesamiento ó correcciones de la imagen se obtiene una definición más clara de las estructuras y litologías ya que eliminan las sombras, velos, desplazamiento y ruido atmosférico que se tiene al momento de capturar la imagen.

- El modelado digital de elevación permite tener una visión global de la zona en 3 dimensiones, para así poder visualizar los rasgos distintivos de las unidades topográficas.

5.2 RECOMENDACIONES

- Las imágenes satelitales LANDSAT 7 presentan características óptimas para la realización de estudios regionales mas detallados, mas sin embargó no es de gran utilidad para cuando se quieren hacer estudios locales debido a que la resolución de la imagen es de 30 m por píxel, dando una imagen distorsionada cuando se requiere ver mas detalle.

- Las imágenes multiespectrales muestran litologías y estructuras geológicas como fallas, sinclinales y anticlinales, por lo que se recomiendan para estudios previos al levantamiento geológico para así complementar el trabajo y tener una mayor de la información sobre las estructuras, geomorfología, hidrografía, topografía y zonas de acceso.

- La presencia de nubes en la imagen de la zona en estudio puede ser impedimento para análisis visual de las imágenes, en cuyo caso se propone revisar otras imágenes como, Landsat 5 TM, Aster, Hyperion, Radar, Quizbird, Spot etc. que con una mayor cantidad de bandas y una mejor resolución espacial puede detallar más aspectos tanto litológicos como estructurales.

- El estudio con imágenes satelitales pueden ser de gran utilidad para la actualización y modernización de la cartografía geología nacional, con el objetivo de que esta sea más accesible y tenga mayor detalle que se tiene actualmente.

- Actualizar la cartografía geológica nacional con los programas utilizados en este trabajo para hacer mapas interactivos que tengan la información de todo el contenido geológico de las zonas y sean más didácticos para estudios posteriores.

- Proponer una investigación más exhaustiva de la zona de estudio en cuestión, a través de reconocimiento en salidas de campo y aplicar estudios de geología de superficie que permitan determinar las formaciones aflorantes sin diferenciar.

- Se propone aplicar la herramienta de sensores remotos, en estudios previos de reconocimiento de estructuras, observar posibles contactos y discriminar litologías para el sensor Landsat 7, que dispone de una resolución de 30 m, pero para estudios más precisos, se recomienda aplicar otras herramientas, y apoyarse en investigaciones previas.

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.

Bally A. (1984). Structural styles and the evolution of sedimentary basins. Houston Rice University. Short course AAPG. 238 p.

Audemard, F. (1991), Tectonics of Venezuela: Ph.D Thesis, Rice University, Houston Texas, 245 p.

Benedetto Y Odreman (1977). Nuevas evidencias paleontológicas en la Formación La Quinta, su edad y correlación con las unidades aflorantes en la Sierra de Perijá y Cordillera Oriental de Colombia. V Congreso Geológico. Venezolano. Caracas. Memorias (I) p: 87-106.

Bowen, J.M. (1972). Estratigrafía del Precretácico en la parte norte de La Sierra, IV Congreso Geológico, Tomo I.

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.

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.

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.

Mcclay K.R. (1990). Glossary of tectonics terms. En McClay K.R. (ed) Thrust tectonic.London. Chapman & Hall. p: 419-433.

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 Surenco 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-satelitalestutorial.htm [Consulta: Julio, 2008].

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: Julio, 2008].

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/FTPCONG2004/online/Papers/Sesion7/64808 CastrilloJ.pdf. [Consulta: Julio, 2008].

Comité Interfilial 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: Julio, 2008].

El Satélite Landsat. [Formato de archivo PDF]. Disponible: http:// caece.edu.ar/tea/Apuntes/landsat-analisis-visual.pdf. [Consulta: Agosto, 2008]

Esri, ¿Qué es ArcGIS? (2002). Manual de ArcGIS. Disponible: http://www.geotecnologias.com/Documentos/what-is-arcgis-spanish.pdf. [Consulta Agosto, 2008]

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. [Consulta: Agosto, 2008]

Geoinformación (2007). Software GIS – ArcGIS. Disponible: http://www.softwaregis.cl/arcgis.html. [Consulta: Junio, 2008]

CONSULTAS TEMATICAS:

Fuente cartográfica:

Hoja 5647 (Alto Guasare). Escala 1:100.000. Elaborada por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (1969).

Fuentes geológicas:

Hojas de geología de superficie C-2. Escala 1:100.000 y C-2-2. Escala 1:50.000. Creole Petroleum Corporation (1961).

Mapa Geológico estructural de recursos minerales del Estado Zulia. Escala 1:500.000. Autor: Bellizzia (1980).

Mapa geológico de la Sierra de Perijá a escala 1:500.000, Bellizzia, G. (1976).

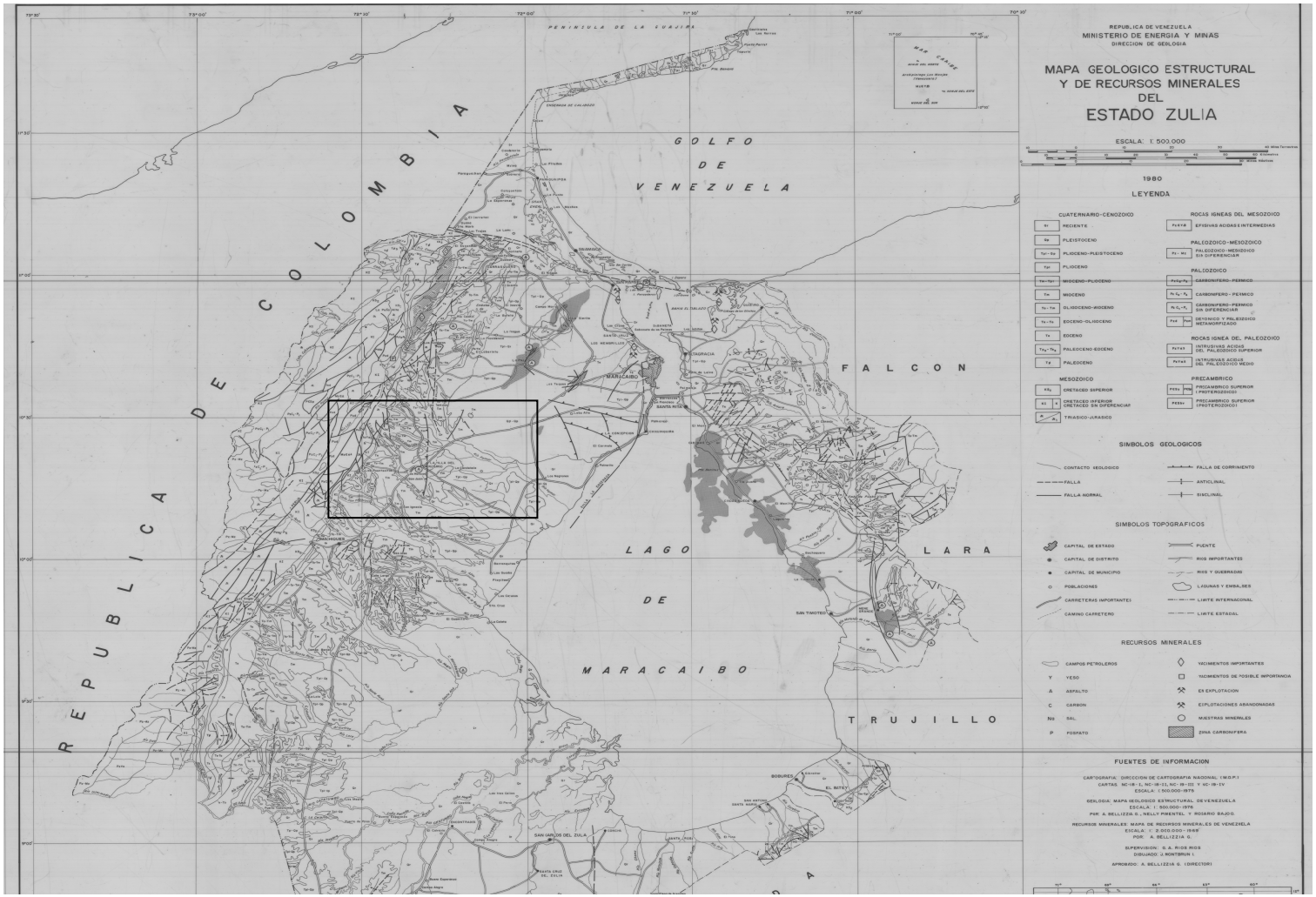
Atlas geológico de Colombia. Plancha 5-04. Escala 1:500.000. Elaborado por Instituto colombiano de geología y minería (2007).

Columna estratigráfica generalizada de la Sierra de Perijá. Autores: Espejo, Etchart (1978).

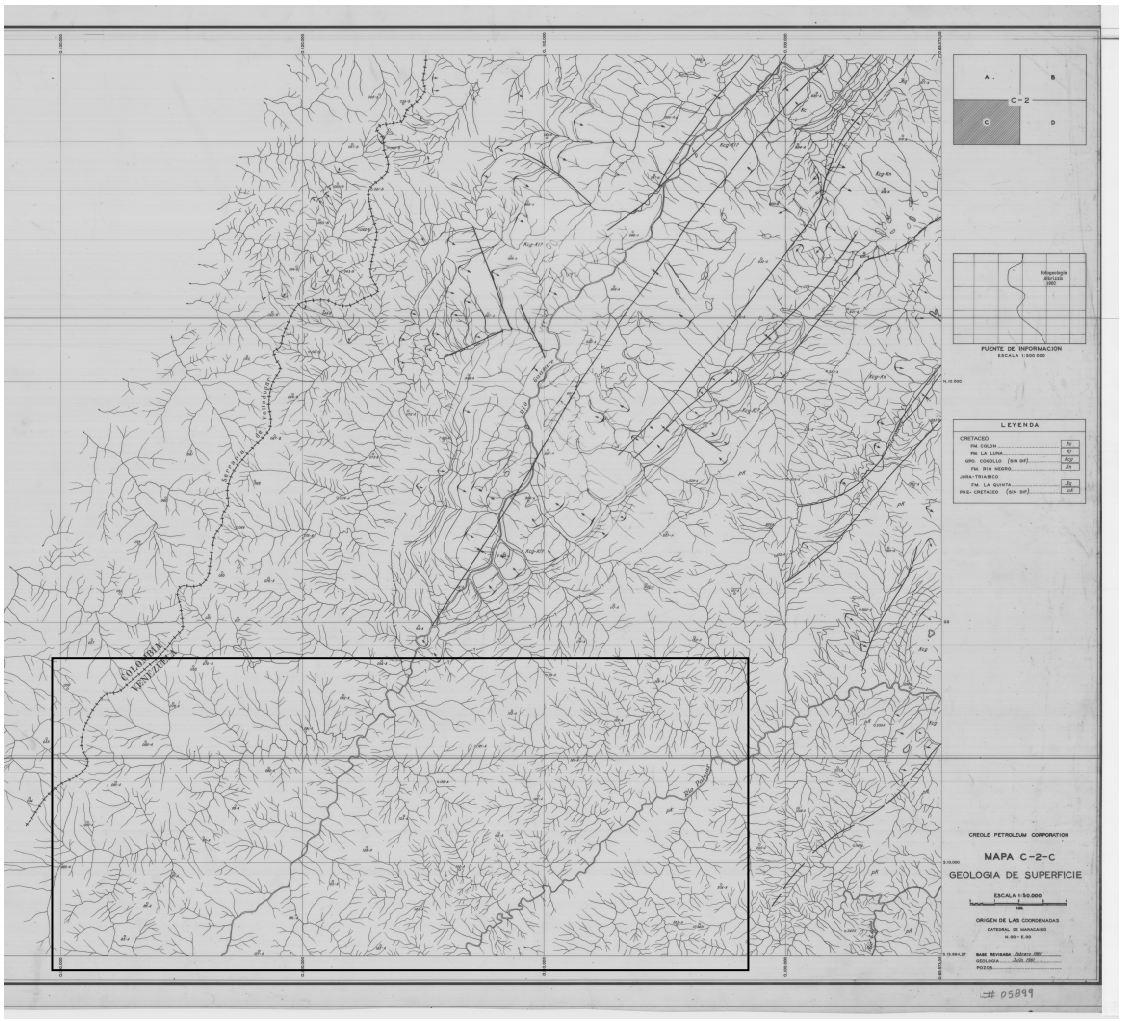
Fuente Satelital:

Sensor Landsat 7 ETM, imagen P008R053, bandas 1-5 y 7, resolución espacial 30 m.

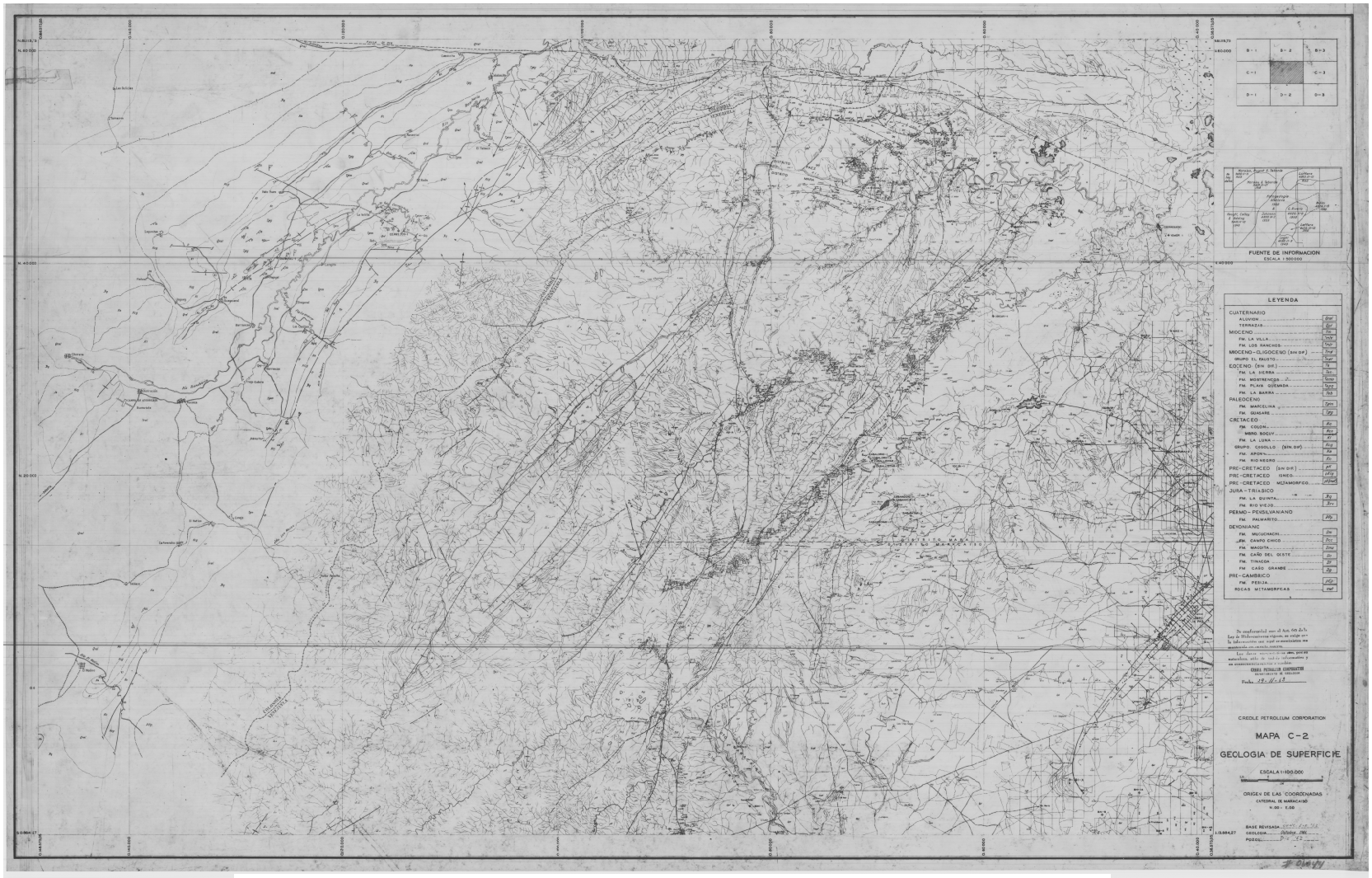
ANEXOS



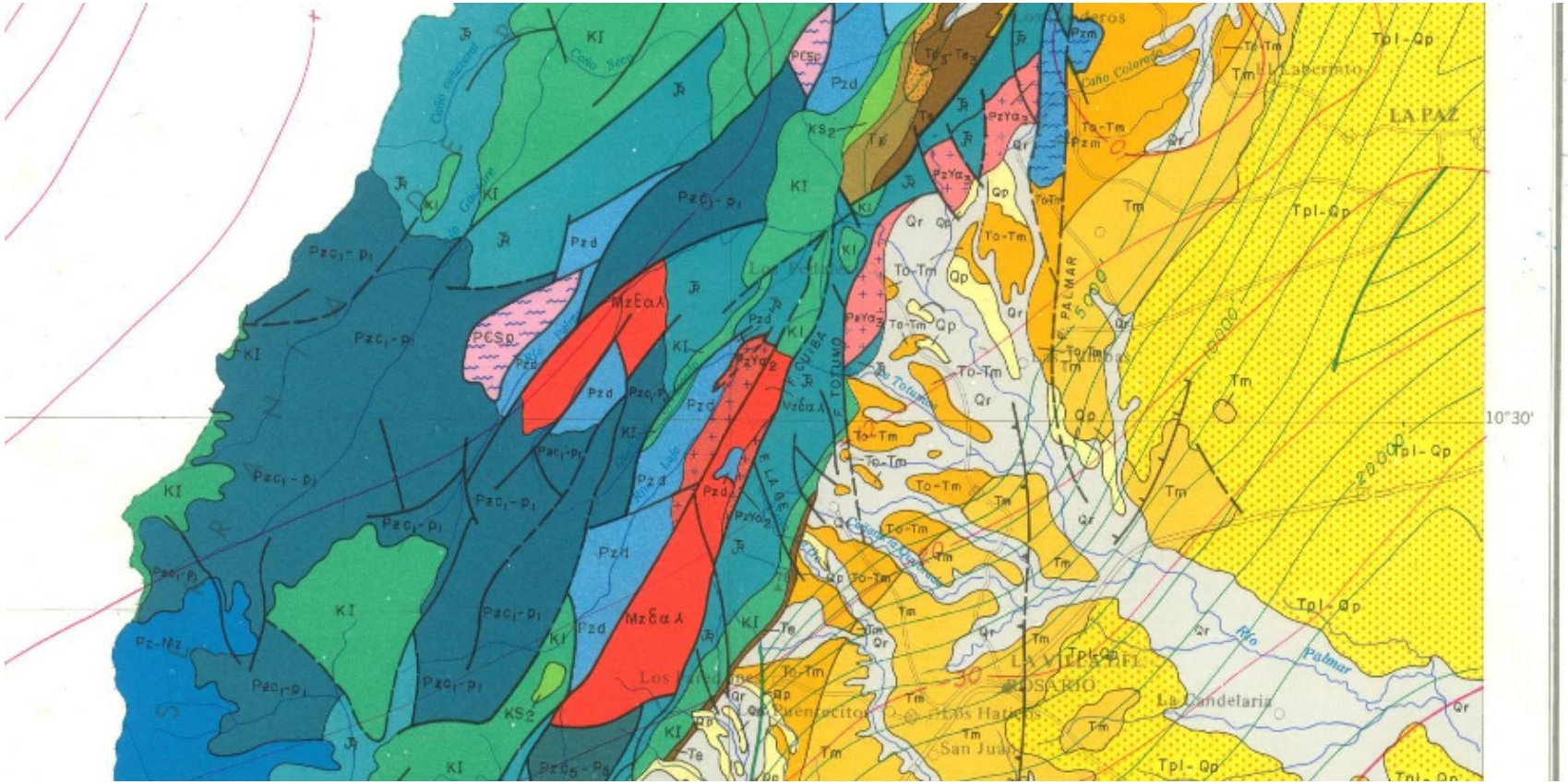
Anexo 1, Mapa Geológico estructural de recursos minerales del Edo. Zulia. Escala 1:500.000. Bellizzia (1980). Se muestra en un recuadro la zona de interés.



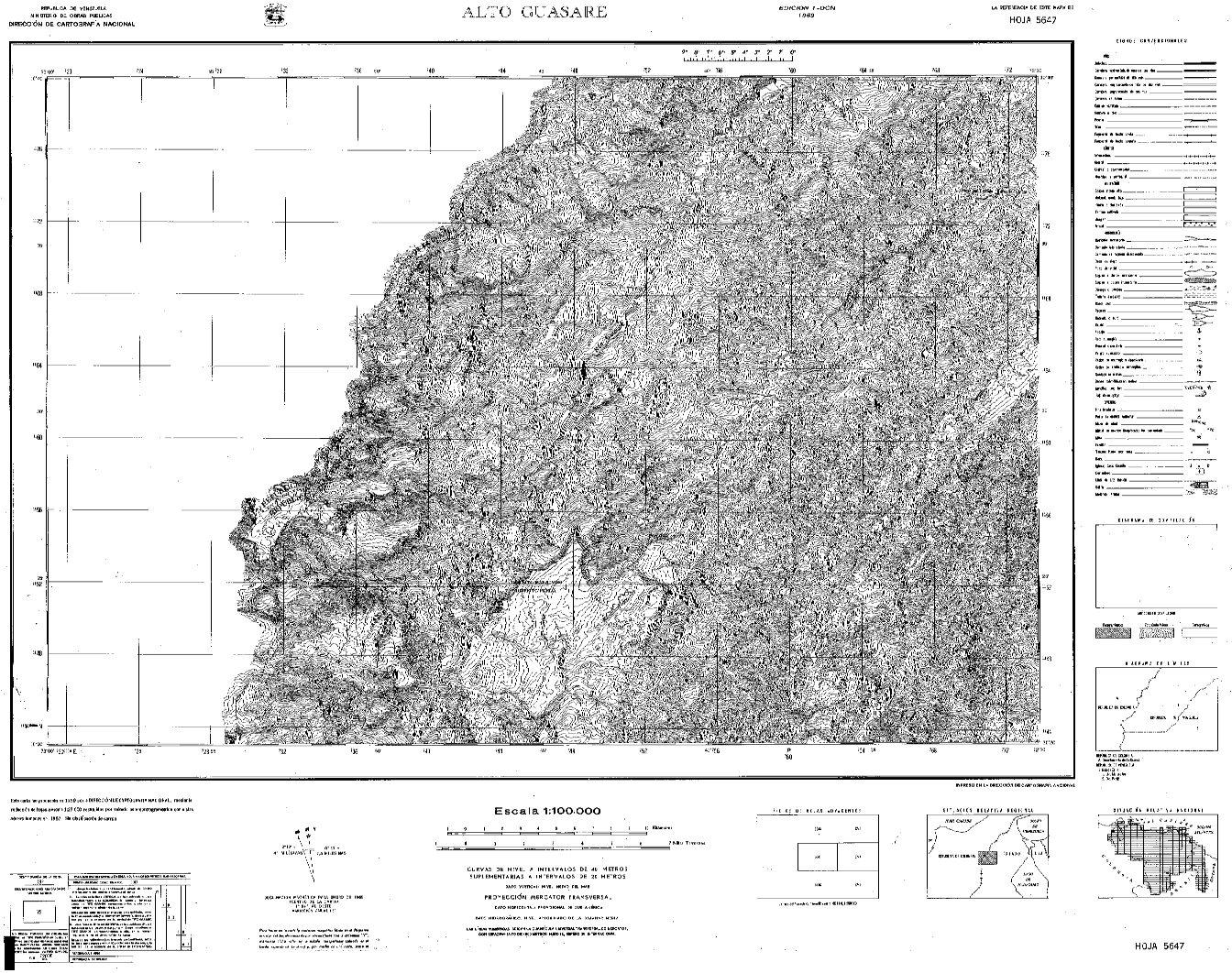
Anexo 2. Parte de la hoja C-2-C, escala 1:50.000 de la Creole Petroleum Corporation, que muestra en recuadro la región de interés.



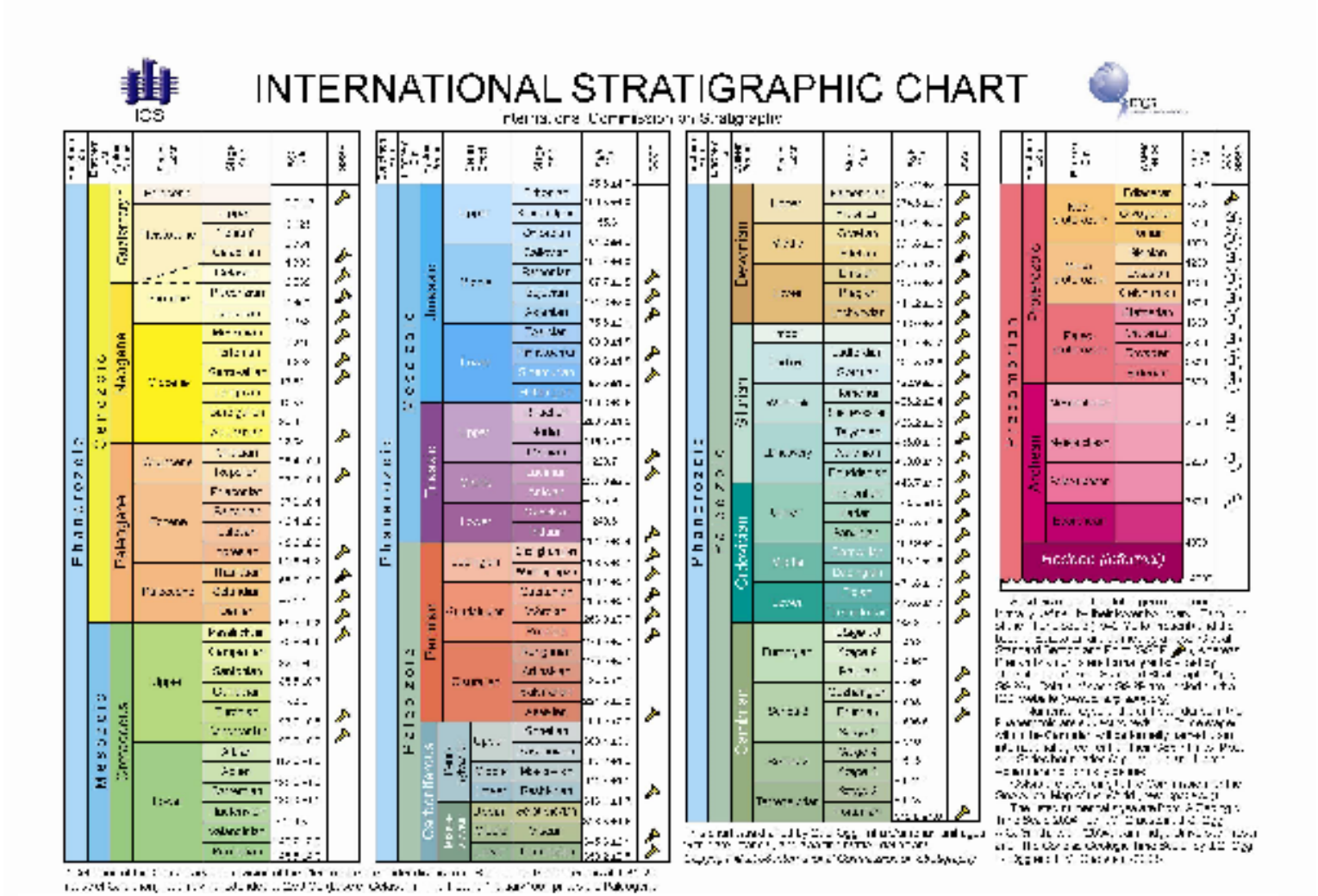
Anexo 3. Hoja de geología de superficie C-2, escala 1:100.000 de la Creole Petroleum



Anexo 4, Mapa geológico de la Sierra de Perijá, a escala 1:500.000, BELLIZZIA, G. (1976).



Anexo 5, Hoja de Cartografía Nacional 5647, Alto Guasare a escala 1:100.000.



Anexo 6, Tabla Estratigráfica Internacional (2008), Muestra las tonalidades empleadas en la presentación de la carta geológica de Guasare

Tablas empleadas:

COMBINACION RGB	TIPO DE ESTUDIO
357	Erosión de los suelos
354	Erosión de los suelos
345	Sectores Ambientales
347	Sectores Ambientales
234	Sectores Ambientales
157	Clasificación de cubiertas
257	Clasificación de cubiertas
145	Clasificación de cubiertas
247	Clasificación de cubiertas
245	Clasificación de cubiertas
752	Geología
754	Geología
753	Geología
135	Geología
354	Clasificación de los suelos

Tabla 3.1. Relación de las combinaciones más empleadas para ENVI

COMBINACION RGB	TIPO DE ESTUDIO
3/1 5/4 5/7	Geología
5/1 4/7 2/4	Geología
5/3 4/7 2/4	Geología
4/3 5/7 3/2	Geología
3/5 4/3 7/4	Geología
3/5 5/7 7/4	Geología
5/7 3/1 7/4	Litología
5/7 3/2 7/4	Litología
1/4 3/2 7/4	Litología
7/1 5 7	Litología
1/4 5/2 4	Litología
4/7 5/1 5/3	Sectores Ambientales
1/4 3/5 7/4	Sectores Ambientales
1/4 1/5 3/5	Sectores Ambientales
5/7 4/7 2/4	Erosión de Suelos
1/4 1/5 3/5	Clasificación de cubiertas

Tabla 3.2. Combinaciones en falso color RGB operando entre bandas