

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA TRAVÉS DE LAS IMÁGENES SATELITALES (LANDSAT 7 ETM) DE LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ENTRE LAS SIGUIENTES COORDENADAS: LONGITUD (72°30’-73°00’) Y LATITUD (10°00’-10°20’)”

Trabajo Especial de Grado

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Para optar al título de Ingeniero Geólogo.

Por los Brs. Ghersi Zerpa Jesús Alejandro.

Guillón Mata Darwin José.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA TRAVÉS DE LAS IMÁGENES SATELITALES (LANDSAT 7 ETM) DE LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ENTRE LAS SIGUIENTES COORDENADAS: LONGITUD (72°30’-73°00’) Y LATITUD (10°00’-10°20’)”

Tutor académico: Ricardo Alezones.

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 Brs. Ghersi Zerpa Jesús Alejandro.

Guillón Mata Darwin José.

Caracas, Junio de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Darwin J. Guillón M. y Jesús A. Ghersi Z. titulado:

“ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES SATELITALES (LANDSAT 7 ETM) DE LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ENTRE LAS SIGUIENTES COORDENADAS: LONGITUD (72°30’-73°00’) Y LATITUD (10°00’-10°20’)”

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

Prof.

Jurado

Prof.

Jurado

Prof. Ricardo Alezones

Tutor académico.

Ing. Mauricio Hernández

Cotutor académico.

A nuestros padres...

Jesús y Darwin.

AGRADECIMIENTOS.

Inicialmente quiero agradecerle a Dios todo poderoso por haberme concedido la dicha de tener salud durante mi carrera y permitir que los obstáculos que existieron durante ésta no se hicieran más fuerte que yo.

Quiero agradecerle profundamente a mi madre Janitza Mata, por ser amiga, madre y consejera desde siempre, y por su apoyo incondicional que me ha brindado en la realización de cada paso que doy en la vida, especialmente en la espera del logro de ésta meta, la cual estuvo en cada momento dándome ánimos para no caer y seguir adelante.

A mi padre Amílcar Rivas que aunque no tenemos sangre en común, el lazo que nos une es aun más fuerte que eso y permitió hacer de mi lo que hoy día soy, con sus consejos, enseñanzas y regaños, por eso mil gracias padre.

A mis hermanitas Marianny, Mariangel y mi hijo Víctor Miguel que se convirtieron en mi motivo principal de lucha e inspiración para la culminación de mi carrera, y de este proyecto de vida que apenas comienza.

A mi abuelito Natividad Mata, que ha sido incondicional su cariño, su entusiasmo en verme culminar esta meta me ha dado aun mas fuerzas para seguir adelante y ser mejor cada día.

A mis tías y tíos, Yudannys, Martha, Alicia, Zaida, Elenne, Ledys, Agustín Vásquez, que estuvieron apoyándome en todo momento y que de una u otra forma colaboraron conmigo para que este sueño se hiciera realidad.

A mi tío José Gregorio Mata (Cheo) que en los últimos años fue más incondicional que nunca, ayudándome a tener fe en mi mismo para alcanzar metas que no creía poder lograr.

A mis amigos y compañeros de carrera, Gerardo, Luis, Orlando, Rafael Ángel, Paul, Romar, Pedro, Rafael José, Leonardo, Kareymir, Ronald, William, Segundo Ramón, que siempre estuvieron cuando más los necesitaba, para darme apoyo y aconsejarme, con los cuales compartí momentos de felicidad y tristeza durante toda mi carrera.

A todas esas personas que creyeron en mi y colaboraron conmigo en determinado momento como la familia Djabur Doumat, Familia Cecin Ron, Ochoa Peña, Martínez Olivares, muchas gracias por todo su apoyo y los momentos inolvidables que me hicieron pasar.

Darwin Guissón

AGRADECIMIENTOS

Gracias a ti Dulce María.

Gracias a ti AgusTIN Miguel.

Gracias a ti Madre Tierra, Madre Luna y Artemisa.

Dedicado a:

Pedro José, Solísbella y Raúl, Ana María y Enrique, Miguel Eduardo y Cecilia. Johanna, Oscar, Fabiola, María Helena, Eugenia, Miguel E, Roxana, Jorge, Gio, Carlos, Andrea. Mamá Luisa, Papá Félix, Amelia, Castorila, Lula, Mon, Luis, Cristina, Antonio, Cruz, Diógenes y Félix, Gladys, Carmita, Dan, Iris, Cristinita, Helenita, Reinaldo, Erick, Enzo, Edson, Alex, Gabriel, Gabriela, Linda, Janeth, Patricia, Félix, Silvia, Mary, Chela, Coromoto, Jesús, Rocío. Sobrinos nietos, primos nietos, Tíos Carlos, Victoria, Josefina, Negra y Catira, Morachas, y Primos Maternos, Jonny Guillen.

Señora Dora, Señor Saturnino, Xiomara, Reinaldo, Nino, Dinora, Carlos E, Jesús A, Juan C. Rafael Bolívar, Rafael C, Jiddu, Duber; Miguel, Carlos N, Pedro, Pelón, Puchi. Andrés M, Tavo, Raúl G, Daniel M, Felipe P, Gregory M, Leopoldo M, Darwin G. Juan E, José M. Orelis, Nistin, Raúl A, Gibran, María Gabriela y Carolina, Javier, Ericka, Arelis, Wendy, Señora Miriam, Señora Nelly, Tío Niño. Señor Jaime, Señora Luisa, Tía Chacha, Señora Rosario, Señor Arturo, Robert, Rosiris, Roselin, Roxana, Cheo, Señora Ladys, Alfredo, Señora Ada, Señor Raúl. Señora Maryc, Señora Giomar Y.

Jonny Guillen, Elen C, Eva N, Lorena M, Mama Beba, Richard López, María R, Fabricio, Melin N, Meury, Wilmer, Mirian D, Oswaldo P, Albin R, Wolfgang R, Andrés E, Antonio E, Eduardo S, Teixeira C, Chuo T, Saúl, Júnior, Pedro S, Gladys M, Aníbal A. Gregorio A, Stalin G, José L, Jesús P, Grace, Adriana T, Ricardo V, Yeymi P, Félix F, B, Juan C. Zeus., Desireé, Señora Dora, Amílcar, José H, Rubén D. Sheuat J, Leonardo M, Víctor F, Johan.

Carla M, Desireé M, Samantha P, Zamanta M, Johanna L, Yocoima, Alejandra R, Jennifer M, Diana, Daniela, Verónica, Isabel, María F, Desireé S, Barbarita. Doctora Carmela, Señora Ligia, Vicky, Heidi S, Caripe, Yulita, Elvis, Toni, Pepe, Jessie M, Leo L, Gustavo R, Silvia C. Ávila, Lezama y Angela, German B, Kamil, Pedro L, Sixto H, Ramón V. F, Rafael C, Ernesto P, David H, Pedro S, Cesar P, Luis, Noel, Luis C, Juan L, Irving V, Robert G, Luis T, Edaly G, Chelín, Fermín B, Olga L, Picky, Ernesto, Andrés B, Coromoto B, Xiomara B.

Yrama C, Luis B, Daniel B, Gregorio Vieira, Ivancito P, Héctor P, Pelón, Manuelito, José Manuel, Amalia A, Fumero, Eddy, Duilio y esposa, Nena, Haysa, compañeros El Valle, María Eugenia y compañeras de San Agustín, Nelly, Yhajaira, Nena, Neyra W, M, Trinidad, Miky y esposa. Rodolfo, Félix, Marbella San Pedro.

Profesores y trabajadores universitarios, Singer A, Mauricio Hernández, Cecilia G, Auristela, Luisa María, Eucaris W, Vargas, Yrama C, Ricardo Alezones, Morela, Berenice, María Teresa Falcón, Paúl, Lenin, Freddy Gil, Ennodio R.

Compañeras y compañeros Rosa M, Juana P, Isabel P, Roigarl, Jesús Salazar, Woodwarde, Grazziana, Johana M, Ángel C, Freddy R, Freddy L, Erick T, Carmen Rodrigo P, Mirka, Y, Yisus C, William M, Carlitos, Antonio, Negra, Cupido, Capino, Enzo, Yuli M, Wilkar, Gregorio y Darwin Guillón.

Cortázar, Bianco, Girondo, Chino Valera Mora, Joan Manuel Serrat, Alí, Dalí, UCV en la Calle, Escuela Nei Ching, Amisucré, Sanadores Quánticos, Chapita. A Dios.

“Un vaso de agua,

Un trozo de pan,

La sombra de un árbol,

La mirada de un gran amor”

El Sol y el Mar.

Jesus Ghersi.

RESUMEN

“ACTUALIZACIÓN GEOLÓGICA TRAVÉS DE LAS IMÁGENES SATELITALES (LANDSAT 7 ETM) DE LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ ENTRE LAS SIGUIENTES COORDENADAS: LONGITUD (72°30’-73°00’) Y LATITUD (10°00’-10°20’)”

Tutor académico, Profesor Ricardo Alezones, Tutor industrial Mauricio Hernández, Tesis, Caracas, UCV, Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

La Sierra de Perijá se localiza hacia el occidente de Venezuela, destacando como un orógeno importante. La zona de estudio se ubica entre las siguientes coordenadas, Longitud (72°30’ - 73°00’) y Latitud (10°00’ - 10°20’) y abarca un área aproximada de 6.765 Km². Su clima es bosque nublado a premontano que se corresponde con alturas de 3600 m a 600 m. lo que recubre sus puntos más altos con una permanente nubosidad.

Debido a la inseguridad que muestra la zona, originada por la acción delictiva de grupos ilegales, así como también, el difícil acceso del relieve abrupto de esta Serranía, el trabajo geológico de campo que se lleve a cabo en ésta, requiere de un método confiable que cumpla con la posibilidad de acceder a información a menor costo, relativa facilidad en su acceso, y con gran seguridad. Estos beneficios lo suministran los Sensores Remotos y el uso de imágenes satelitales *Landsat 7 ETM*, siendo estas las herramientas empleadas en la actualización de la geología de superficie prevista en este estudio.

La tecnología de los sensores remotos se basan en la obtención de información de un objeto, superficie o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos por un satélite de forma inalámbrica, debido a que estos elementos visibles, emiten un espectro electromagnético que los hace prácticamente distintivos unos de los otros, de acuerdo a su propia naturaleza y de las radiaciones solares que reciben estos objetos. Las imágenes *Landsat 7 ETM* están compuestas

por siete bandas las cuales combinadas y analizadas permiten distinguir diversos rasgos tanto litológicos, estructurales como topográficos.

La zona presenta dos dominios litológicos distintivos, una zona de relieve abrupto, donde prevalecen rocas de origen metamórfico, coincidiendo con las de material competente y otra zona llana donde se destacan rocas de rocas de origen sedimentario, de material menos competentes. Desde el punto de vista litológico las unidades sedimentarias que afloran en la zona estudio son las siguientes.

- **Paleozoico:** Metamórficas sin diferenciar.
- **Mesozoico Temprano:** Grupo La Gé que a su vez está representado por las Formaciones: Tinacoa, Macoita y La Quinta,
- **Rocas del Mesozoico Medio:** Formación Río Negro, y el Grupo Cogollo; con las Formaciones Apón, Lisure y Maraca.
- **Rocas del Mesozoico Tardío:** Formaciones Colón y Mito Juan.
- **Rocas del Cenozoico:** Grupo Orocué, las Formaciones Marcelina, La Sierra y Mirador, el Grupo El Fausto, y finalmente la Formación El Milagro.
- **Cuaternario:** Formación los ranchos, La Formación La Villa del Reciente.

Estructuralmente la Sierra de Perijá es muy compleja, en ella se evidencian múltiples eventos de deformación, ocurridas desde el Paleozoico hasta el Presente. En este relieve se identifican quiebres notorios en líneas de cresta y en estribaciones, así como también, se observan alineaciones preferenciales que suministran información sobre posible fracturamiento de las rocas. Con la interpretación de la radargrafía se identificaron las principales estructuras con dirección noreste – sureste preferencialmente, siendo la estructura de mayor expresión la Falla de Perijá (F1) con orientación N25°E. Otras estructuras identificadas como semigrábenes de edad Jurásica, indican procesos distensivos, los cuales han sido reactivados por la tectónica de límite de placa Sur americana y de Pacifico. Audemard (1991).

ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| CAPÍTULO I | |
| 1. INTODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Objetivos y alcance..... | 1 |
| 1.2 Objetivo General..... | 1 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.4 Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.5 Alcances..... | 3 |
| 1.6 Ubicación y extensión de la zona de estudio..... | 3 |
| CAPÍTULO II | |
| 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL..... | 6 |
| 2.1 Generalidades..... | 6 |
| 2.2 Trabajos previos..... | 6 |
| 2.3 Estratigrafía..... | 8 |
| 2.3.1 Rocas del Mesozoico Temprano..... | 9 |
| 2.3.2 Rocas del Mesozoico Medio..... | 12 |
| 2.3.4 Rocas del Mesozoico Tardío... .. | 16 |
| 2.3.4 Rocas del Cenozoico..... | 18 |
| 2.4 Evolución tectónica regional..... | 22 |
| 2.4.1 Paleozoico..... | 22 |
| 2.4.2 Mesozoico..... | 24 |
| 2.4.3 Cenozoico..... | 30 |
| 2.5 Descripción estructural de la Sierra de Perijá..... | 33 |
| CAPÍTULO III | |
| 3. LA TELEDETECCIÓN..... | 37 |
| 3.1 Los elementos de un proceso de teledetección..... | 37 |
| 3.2 Principios físicos y fundamentos en teledetección..... | 39 |
| 3.2.1 Términos y unidades de medida usados en teledetección | 39 |
| 3.3 Principios y leyes de la radiación electro-magnética..... | 41 |
| 3.4 Firma espectral..... | 43 |

| | |
|---|----|
| 3.5 Espectro electromagnético..... | 45 |
| 3.6 Interacciones atmosféricas..... | 49 |
| 3.6.1 Dispersión..... | 49 |
| 3.6.2 Absorción..... | 50 |
| 3.7 El dominio óptico del espectro..... | 51 |
| 3.8 Fundamentos de la observación remota..... | 54 |

CAPÍTULO IV

| | |
|---|----|
| 4. METODOLOGÍA..... | |
| 4.1 Procesamiento de imágenes digitales..... | 57 |
| 4.1.1 Procesamiento..... | 57 |
| 4.1.2 Realce de la información..... | 57 |
| 4.1.3 Extracción de información..... | 58 |
| 4.2 Correcciones radiométricas..... | 58 |
| 4.3 Los efectos de cambio en el tiempo..... | 58 |
| 4.4 Corrección de bandas..... | 59 |
| 4.5 Calibración <i>Layer Stacking</i> | 62 |
| 4.6 Conversión a formato <i>BIL</i> | 64 |
| 4.7 Corrección atmosférica en <i>FLAASH</i> | 67 |
| 4.8 Extracción de píxeles de las nubes..... | 69 |
| 4.8.1 Transformación de dato <i>EVF</i> a <i>ROI</i> | 72 |
| 4.9 Construcción de máscara de nubes..... | 73 |
| 4.10 Transformación de la fracción mínima de ruido (<i>MNF</i>)... .. | 75 |
| 4.11 Corrección del índice de impureza del píxel (<i>PPI</i>)..... | 76 |
| 4.12 <i>Spectral Angle Mapper (SAM)</i> | 81 |
| 4.13 Clasificación no supervisada en <i>ENVI</i> | 82 |
| 4.14 Clasificación no supervisada en <i>ERDAS</i> | 84 |
| 4.15 Clasificación supervisada en <i>ERDAS</i> | 85 |
| 4.16 Índice de vegetación..... | 88 |
| 4.17 Cociente de bandas..... | 90 |
| 4.18 Modelo de elevación digital..... | 94 |

CAPÍTULO V

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 98 |
| 5.1.1 Relieve..... | 98 |
| 5.1.1.1 Zona A (Relieve Llano)..... | 99 |
| 5.1.1.2 Zona B (Relieve Abrupto)..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.1.3 Zona B-1(Colinas Arqueadas)..... | 101 |
| 5.1.1.4 Zona B-2 (Valles Interdigitados)..... | 102 |
| 5.1.1.5 Zona B-3 (Unidad de Montañas)..... | 103 |
| 5.1.2 Red Hidrográfica..... | 105 |
| 5.1.3 Análisis Estructural..... | 108 |
| 5.1.4 Análisis litológico..... | 112 |
| 5.1.5 Contactos litológicos..... | 114 |
| | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 121 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 124 |
| | |
| ANEXOS..... | 129 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Descripción | Página |
|-------|---|--------|
| 2-1 | Formación Tinacoa. | 10 |
| 2-2 | Formación Macoita (Jr). | 10 |
| 2-3 | Formación La Quinta. | 11 |
| 2-4 | Formación Río Negro (Krn). | 12 |
| 2-5 | Formación Apón (Ka). | 13 |
| 2-6 | Formación Lisure. | 14 |
| 2-7 | Formación Maraca. | 15 |
| 2-8 | Formación La Luna. | 15 |
| 2-9 | Formación Colón (Ksmj). | 16 |
| 2-10 | Formación Mito Juan (Ksmj). | 17 |
| 2-11 | Grupo Orocue (<i>Formación Barco.</i>) | 18 |
| 2-12 | Formación Marcelina. | 19 |
| 2-13 | Formación La Sierra. | 20 |
| 2-14 | Grupo el Fausto. | 21 |
| 2-15 | Formaciones, Los Ranchos y La Villa. | 22 |
| 4-1 | Lista de unidades más usadas en la teledetección. | 39 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4-2 | Lista de Algoritmos empleados para el cálculo de operaciones de teledetección. | 41 |
| 4-3 | Tipos de Espectro Electromagnético y sus longitudes de onda, frecuencia y energía. | 46 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Descripción | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1-1 | Zona de estudio delimitada en una imagen LandSat 7 ETM | 4 |
| 1-2 | Zona de estudio mostrada en imagen satelital tomada de (Google Earth 2008), vista a 198.93Km | 4 |
| 1-3 | Área de estudio, modificado a partir de la hoja cartográfica 5646 Cartografía Nacional Esc. Original 1:100.000 | 5 |
| 2-1 | Orden Cronológico de las Unidades Litoestratigráficas en la Sierra de Perijá. Bellizia <i>et al</i> , (1976) | 9 |
| 2-2 | Modelo estructural Proto-Atlántico neoproterozoico, Dalziel (1997) | 23 |
| 2-3 | Depósitos Jurásicos del Noroeste del Sur América, y la zona rayada el Arco de Mérida | 25 |
| 2-4 | Fallas geológicas asociadas al Arco de Mérida | 26 |
| 2-5 | Marco tectónico de Venezuela para el período del Cretácico Temprano | 27 |
| 2-6 | Marco tectónico de Venezuela para el período del Cretácico Tardío-Paleoceno | 29 |
| 2-7 | Marco tectónico de Venezuela para el período del Paleoceno Tardío- Eoceno Medio | 30 |
| 2-8 | Marco tectónico de Venezuela para el período del Eoceno Tardío-Mioceno Medio | 31 |
| 2-9 | Marco tectónico de Venezuela para el período del Mioceno Medio – Pleistoceno | 32 |
| 2-10 | Marco tectónico actual del Caribe y Venezuela | 33 |
| 2-11 | Mapa estructural del noroeste de Sur América | 34 |

| | | |
|------|--|----|
| 2-12 | Estructuras presentes en la zona de estudio | 35 |
| 2-13 | Estilo estructural del sector central de la Sierra de Perijá | 36 |
| 3-1 | Elementos necesarios para la teledetección | 38 |
| 3-2 | Diagrama del ángulo sólido | 40 |
| 3-3 | Curva de emitancia radiactiva | 43 |
| 3-4 | Firma espectral para distintos tipos de cubierta | 44 |
| 3-5 | Factores en la reflectividad de las hojas verdes | 45 |
| 3-6 | Rango de espectros electromagnético | 48 |
| 3-7 | Bandas del visible espectral, observadas en las distintas bandas del RGB | 51 |
| 3-8 | Curva de emitancia radiactiva del Sol | 52 |
| 3-9 | Relación entre el flujo incidente y reflejado | 53 |
| 3-10 | Representación de las tres formas de teledetección: (i) Por reflexión, (ii) por emisión, (iii) por emisión y reflexión | 56 |
| 4-1 | Inicio de la calibración de la imagen Landsat, con la herramienta <i>Landsat TM</i> | 59 |
| 4-2 | Selección individual de cada una de las 6 bandas para su posterior calibración | 60 |
| 4-3 | Datos obtenidos previamente en la metadata para la corrección de cada banda | 60 |
| 4-4 | Bandas cargadas en el programa para ser procesadas por medio de las combinaciones RGB | 60 |
| 4-5 | Imagen generada con la combinación 1R, 4G y 2B | 61 |
| 4-6 | Imagen inicial en el programa ENVI 4.2 para la corrección <i>Layer</i> | |

| | | |
|------|--|----|
| | <i>Stacking</i> | 63 |
| 4-7 | Uso de la unidad UTM como siguiente paso para la corrección <i>Layer Stacking</i> | 63 |
| 4-8 | Unión de bandas de la calibración <i>Layer Stacking</i> generadas por el software | 64 |
| 4-9 | Paso inicial para la transformación de formato BSQ a BIL | 65 |
| 4-10 | Selección de la unión de bandas <i>Layer Stacking</i> para su posterior procesamiento | 65 |
| 4-11 | Ventada de parámetro de conversión de formato de BSQ a BIL el cual es el utilizado por el programa ENVI para procesar las imágenes | 66 |
| 4-12 | Lista de banda donde se muestran cargadas las transformaciones a formato BIL | 66 |
| 4-13 | Herramienta que se debe utilizar para la corrección atmosférica en <i>FLAASH</i> en el programa ENVI | 68 |
| 4-14 | Datos y valores que se aplicaron obtenidos previamente en la metadata que fueron descargadas junto a las imágenes | 68 |
| 4-15 | Imagen generada por la combinación de los cañones 6R 2G y 1B de la imagen con la corrección atmosférica previamente realizada | 69 |
| 4-16 | Ventana de inicio del software (ArcGis) donde se genera el <i>Shapefile</i> que permite la extracción de los píxeles de las nubes | 70 |
| 4-17 | La imagen muestra la herramienta que se debe utilizar (<i>ArcCatalog</i>) para generar el Shapefile y de esta manera aplicar la máscara de las nubes | 71 |
| 4-18 | Poligonos realizados para encerrar tanto las nubes como las sombras que estas generan | 71 |
| 4-19 | Ventana que permite importar el archivo del shapefile georeferenciado para procesar la imagen bajo ese parámetro de transformación (ROI) | 72 |

| | | |
|------|---|----|
| 4-20 | Máscara de nubes construida, mostrada en el cuadro derecho en color blanco | 73 |
| 4-21 | Pasos para la construcción de máscara de nubes a la zona de estudio delimitando | 73 |
| 4-22 | 1er paso para la corrección de la Fracción Mínima de Ruido a la zona de estudio | 75 |
| 4-23 | 2do paso para la corrección de la Fracción Mínima de Ruido a la zona de estudio | 76 |
| 4-24 | Esquema para construcción del índice de impureza de los Píxeles de la imagen | 77 |
| 4-25 | Ventana de listas de bandas, donde se muestra la corrección <i>PPI</i> | 77 |
| 4-26 | Transformación del PPI del área de interés a ROI | 78 |
| 4-26 | Ventana de selección de los valores mínimos y máximos de los píxeles de la imagen | 78 |
| 4-27 | Selección de las 3 bandas para su posterior búsqueda de puntos extremos. | 79 |
| 4-28 | Pasos para la ubicación de valores o píxeles extremos de la imagen | 80 |
| 4-29 | Valores extremos representados en la figura F 11-29 | 80 |
| 4-30 | Selección de las 6 bandas por separado para la corrección del <i>Spectral Angle Mapper</i> | 82 |
| 4-31 | Corrección de SAM finalizada y agregada en la lista de bandas | 82 |
| 4-32 | Pasos para la generación de una imagen general según las clases seleccionadas anteriormente en el cuadro de la figura 4-31 (F.13.3) | 83 |
| 4-33 | Imagen final generada por las clases dictadas al programa en la figura 13-3 | 83 |

| | | |
|------|--|----|
| 4-34 | Imagen final en escala de grises para su posterior interpretación en La clasificación no supervisada | 84 |
| 4-35 | Selección de la unión de bandas 1-6 realizada en el paso anterior | 85 |
| 4-36 | Selección de la herramienta Tool la cual permite seleccionar las clases | 86 |
| 4-37 | Selección del <i>Signatur Editor</i> para importar las clases generadas por el usuario | 86 |
| 4-38 | Comando para Copiar en las carpetas correspondientes con el nombre de salida de la imagen a generar | 87 |
| 4-39 | Pasos para generar las clases y exportarlas al <i>Signatur Editor</i> | 87 |
| 4-40 | Imagen generada a partir de las clases asignadas apoyado en mapas preexistentes | 88 |
| 4-41 | Elementos de salida para la generación del índice de vegetación | 89 |
| 4-42 | Imagen generada con la concentración de vegetación propuesta por los colores más claros | 89 |
| 4-43 | Ventana de inicio para la realización del cociente de bandas de la imagen <i>Landsat</i> | 90 |
| 4-44 | Imagen de la corrección en Flaash en combinación 7 RED, 4 GREEN, 2 BLUE | 90 |
| 4-45 | Selección de la herramienta <i>Band Math</i> para realizar el cociente de bandas | 91 |
| 4-46 | Valores generados por el cociente de bandas agregados al menú de uso del ENVI | 91 |
| 4-47 | Imagen generada por la combinación de cañones y la sumatoria de bandas agregado en el paso anterior | 92 |
| 4-48 | Pasos para la generación del cociente de bandas | 93 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4-49 | Imagen generada por la combinación de bandas 7Red, 4Green, 1 Blue | 93 |
| 4-50 | Selección de banda 1 de la imagen Flaash para la generación del modelo 3D | |
| 4-51 | Elementos para la reducción de la zona a la cual se le aplicara el modelo 3D | 94 |
| 4-52 | Modelo digital 3D de la zona de estudio con líneas en forma de mallas | 96 |
| 4-53 | Modelo digital 3D de la zona de estudio con la imagen Landsat 7 de la corrección atmosférica en <i>FLAASH</i> | 97 |
| 5-1 | Límites entre las unidades más importantes presentes del área estudio, identificados por los contactos de líneas roja y azul | 98 |
| 5-2 | Terrazas aluviales observadas en la imagen <i>Landsat 7</i> , ubicada dentro del polígono amarillo | 99 |
| 5-3 | Lomas asimétricas observadas por la diferencias de los pixeles de la imagen <i>Landsat 7</i> . La figura 5-4 representa la imagen de radar que muestra las mismas lomas asimétricas, ubicadas dentro del polígono amarillo | 100 |
| 5-4 | Lomas Alargadas pertenecientes a la Zona A vista en la imagen de radar ubicadas en el polígono amarillo | 101 |
| 5-5 | Unidad de Colinas Arqueadas, y sus quiebres notorios vista en la imagen de radar | 102 |
| 5-6 | Unidad de valles Interdigitados vistos en el mapa topográfico a escala 1:100.000, hoja 5646 Machiques | 103 |
| 5-7 | Relieve de la Sierra de Perijá donde se muestran líneas de cresta y estribaciones con arreglo ortogonal de la imagen de radar | 104 |
| 5-8 | Relieve de la Sierra de Perijá donde se muestran líneas de cresta y estribaciones con arreglo rectangular en la imagen satelital <i>Landsat 7 ETM</i> | 105 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5-9 | Hidrografía de la zona montañosa inferida a través de la imagen de radar | 106 |
| 5-10 | Drenajes observados por el realce de los píxeles en la imagen de la corrección MNF | 107 |
| 5-11 | Drenaje propuesto por la Creole (1954) en el Mapa Mosaico Guaraní a escala 1:50.000 | 107 |
| 5-12 | Solape de drenajes interpretados con la Imagen Landsat 7 ETM y Mapa de Mosaico guaraní a escala 1:50.000, Creole (1954) | 108 |
| 5-13 | Imagen de radar con Fallas hacia el sur F1, F2, F3 interpretadas, y hacia el norte fallas menores inferidas por estudios previos | 109 |
| 5-14 | Grabenes propuestos por la Creole Petroleum Corporation, en el mapa Mosaico Guaraní (1954) | 110 |
| 5-15 | Imagen de radar donde se muestra en la línea roja la interpretación de corrimiento con dirección N20°E aproximadamente | 111 |
| 5-16 | Mapa geológico a escala 1:100.000, E. I. G. Litos C. A. (1997). <i>Integración de la geología de campo. Soporte adicional para el Guaraní-AX y Río Negro-AX, PDVSA-Maraven</i> | 112 |
| 5-17 | Imagen de modelo de elevación 3D donde se muestra el contraste litológico de la zona de estudio | 113 |
| 5-18 | Imagen de clasificación no supervisada, donde se muestran las distintas litologías en colores propuestas por el <i>software</i> , las nubes en color negro, zonas de rocas poco competentes en verde, color violeta, rocas competentes generalmente metamórficas | 114 |
| 5-19 | Imagen Landsat, muestra la ubicación de distintas clases seleccionadas en píxeles de igual tonalidad (en color negro) para comprobar similitud de la litología. En la parte inferior derecha se muestra un cuadro con las firmas espectrales con el mismo comportamiento | 115 |
| 5-20 | Corrección SAM para realce de contactos entre Cenozoico y Cuaternario | 116 |
| 5-21 | Tomado y modificado del mapa geológico de Chaplet (1999), | |

| | | |
|------|---|-----|
| | muestra la terrazas cuaternarias Qt (1), La Villa Tmlv (2), Los Ranchos Tmlr (3), y 4 Cuaternario reciente. Muestra correspondencia con lo observado en la imagen Landsat | 116 |
| 5-22 | Imágenes Landsat con distintas combinaciones de bandas para definir el contacto entre Paleozoico y Mesozoico al noroeste de la zona de estudio. (Imagen 1: <i>2Red, 4Green, 5Black</i> ; imagen 2: <i>6Red, 4Green, 1Black</i> ; imagen 3: <i>4Red, 5Green, 2Black</i> ; imagen 4: <i>2 Red, 5Green, 3Black</i>) | 117 |
| 5-23 | Imagen Landsat en ERDAS 8.6, se muestran 3 clases de pixeles que definen tres formaciones distintas | 118 |
| 5-24 | Clases definidas para ubicar los límites entre el Grupo el Fausto y Formación Los Ranchos | 118 |
| 5-25 | Firmas espectrales para ubicar los límites de la formación Los Ranchos | 119 |
| 5-26 | Firmas espectrales aplicadas para definir el Cuaternario Reciente | 119 |
| 5-27 | Actualización del Mapa geológico Machiques a escala 1:100.000 Guillón D. & Ghersi J. (2008) | 120 |

CAPÍTULO I

1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

En los últimos años la tecnología usada por los sensores remotos, ha tenido un gran impacto y se ha convertido en una herramienta muy útil, para la obtención de información de la superficie terrestre, ofreciendo desde un punto de vista geológico una importante representación del relieve, de la geomorfología, las estructuras, y de las diferencias litológicas existentes en la zona donde se realiza estudio de esta naturaleza.

Todas estas interpretaciones son efectuadas en un tiempo relativamente corto, en comparación con la forma tradicional de hacer geología de superficie y además con un costo menor, resultando beneficioso en lugares con acceso restringido por problemas de seguridad, o casos donde se disponga de recursos económicos limitados.

La Sierra de Perijá específicamente la zona de estudio, presenta las limitaciones antes señaladas, razón por la cual, el método para la actualización de la información geológica, se basó en la interpretación de imágenes satelitales Landsat 7 ETM +, cuyo análisis se obtuvo de los atributos resaltados con el uso de los programas ENVI 4.2, ERDAS IMAGINE 8.6 y ARCGIS. Este análisis se comparó con mapas preexistentes, con radargrafía y trabajos previos.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Se tiene como objetivo general la creación de un mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 de la Sierra de Perijá, a través de la integración geológica entre los datos obtenidos de las imágenes satelitales (Landsat 7 ETM), y los datos recopilados en las bibliografías y trabajos previos consultados, donde quede evidenciado la

correspondencia de estas imágenes multispectrales con la geología superficial de la zona de estudio descrita por otros autores previamente.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para la elaboración del mapa geológico actualizado de la Sierra de Perijá, se plantearon los siguientes objetivos específicos.

- Determinar unidades espectrales a través de las diferentes combinaciones y cocientes de bandas de las imágenes Landsat 7.
- Determinar alineaciones y estructuras a través de la interpretación de las imágenes satelitales.
- Realizar la clasificación supervisada y no supervisada de las características geológicas y topológicas de las imágenes.
- Corrección atmosférica en Flaash.
- Caracterizar las imágenes a través de firmas espectrales.
- Realizar un Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio así como el índice de vegetación.
- Generar un mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 de la zona de estudio en ArcGis.
- Presentar un informe con su respectivo análisis, interpretación, conclusiones, y recomendaciones que se obtendrán a través de las imágenes satelitales así como las ventajas de uso.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo responde a la necesidad de actualizar los mapas geológicos de la Sierra de Perijá, cuya situación geográfica presenta limitantes para el acceso, y a su vez serios problemas de seguridad personal, debido a las innumerables actividades

ilícitas que realizan en la zona algunos grupos ilegales, haciendo del trabajo de campo un ejercicio de alto riesgo en materia de exploración geológica y áreas afines.

Situación que requiere de la utilización de un método preciso y confiable de teledetección. Condiciones que cumple el sistema satelital (LandSat 7 ETM +) ya que este método tiene tiempo en funcionamiento y se ha considerado en los últimos años como el programa de información satelital con mayor cobertura periódica, resolución espacial y multiespectral el cual ha dado resultados muy favorables, en los estudios de la dinámica de los recursos naturales, programa de seguimiento global, seguimientos de bosques, planeación de desarrollo a nivel regional.

1.5 ALCANCES

El presente estudio se limita al uso de imágenes de sensores remotos, para actualizar la información de la geología superficial en la Sierra de Perijá, a partir de la descripción e interpretación de las imágenes Landsat 7 ETM+. Las nociones inherentes al funcionamiento interno de los programas (*software*), escapan del alcance del presente trabajo.

1.6 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza hacia el occidente de la Sierra de Perijá entre las siguientes coordenadas, Longitud ($72^{\circ}30'$ - $73^{\circ}00'$) y Latitud ($10^{\circ}00'$ - $10^{\circ}20'$) y abarca un área aproximada de 6.765 Km² coincidiendo con el Parque Nacional Sierra de Perijá de difícil acceso en la actualidad. (Ver figura 1-1)

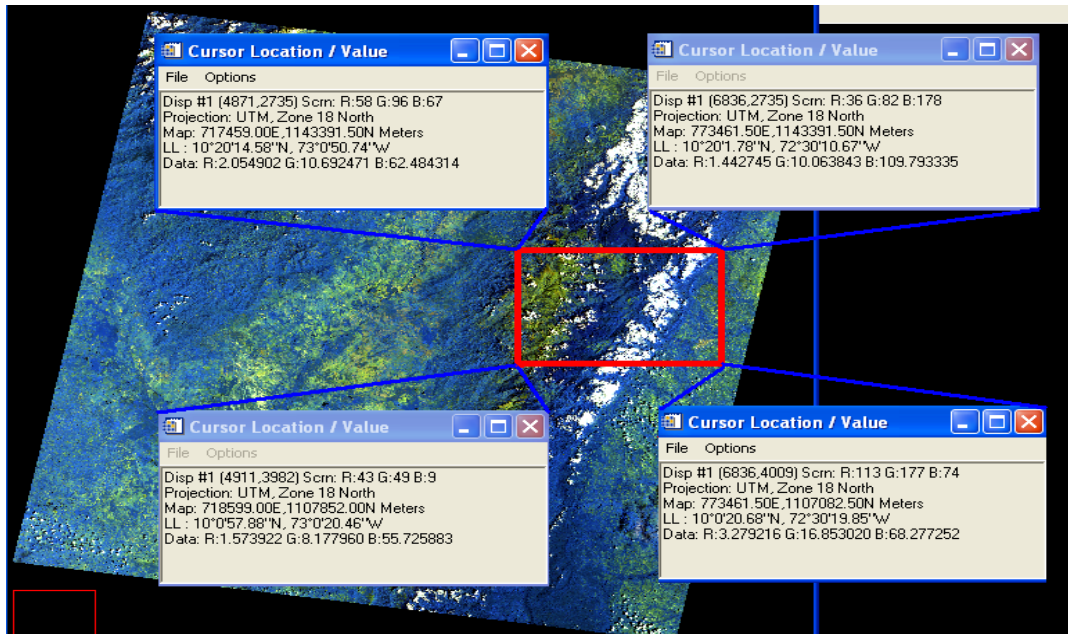


Figura 1-1- Zona de Estudio, delimitada en color rojo en la imagen (LandSat 7 ETM +)

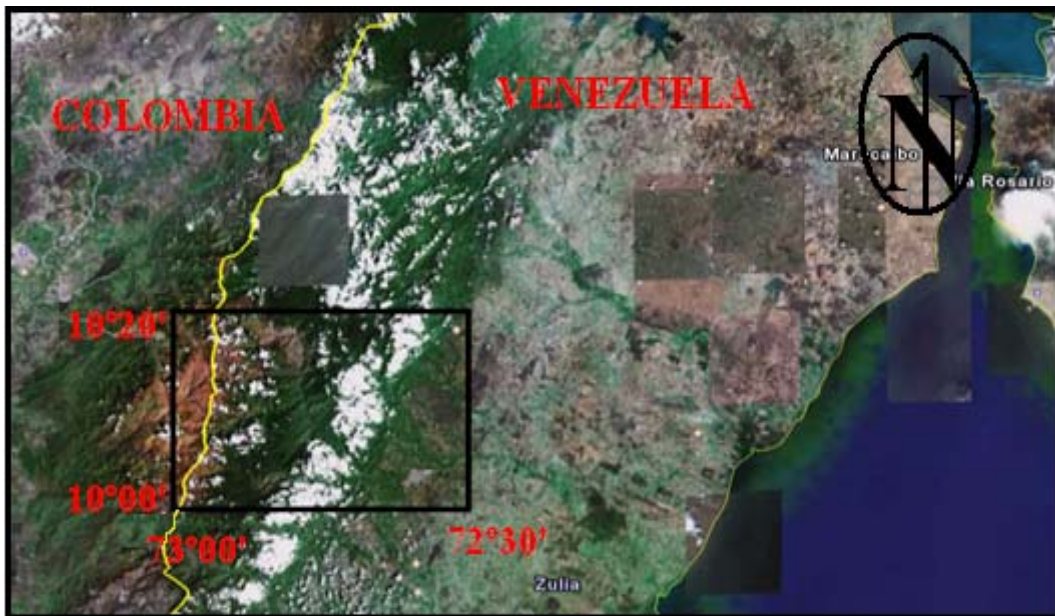


Figura 1-2 Zona de estudio, imagen satelital vista a 198.93 km, adaptado de (Google Earth 2008)

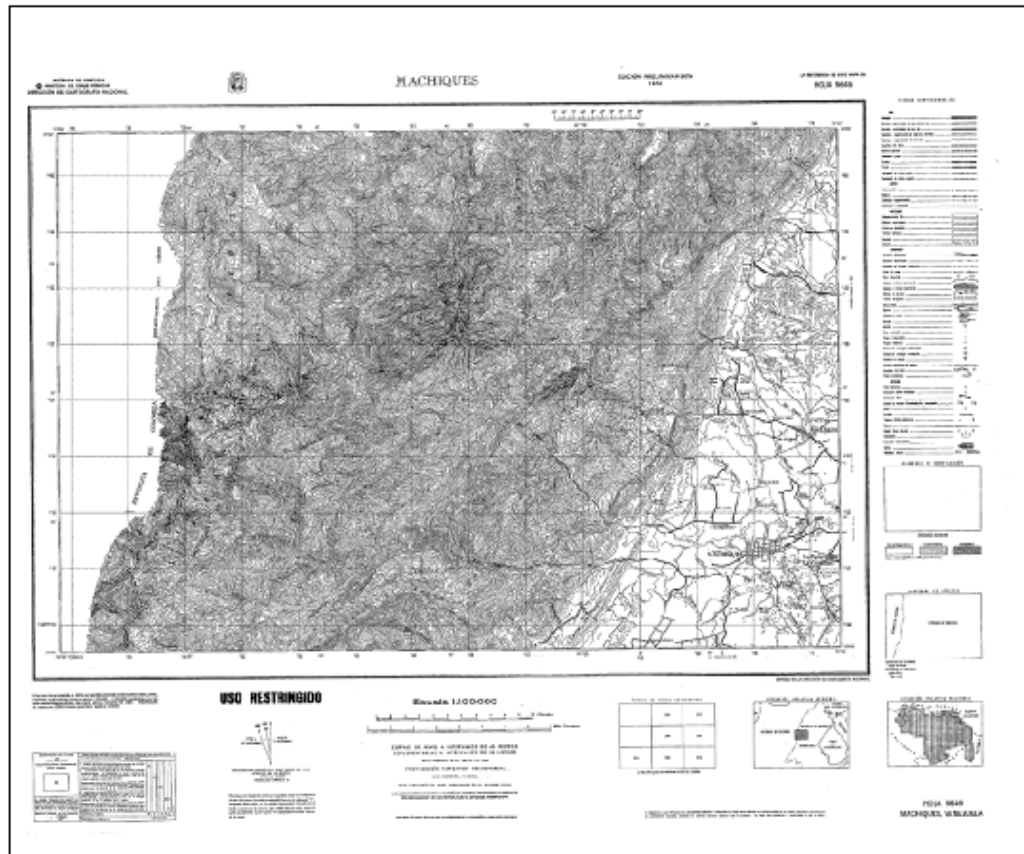


Figura 1-3 Área de estudio, observada en la hoja cartográfica 5646. Cartografía Nacional Esc. Original 1:100.000 entre las coordenadas, longitud ($72^{\circ}30'$ - $73^{\circ}00'$) y latitud ($10^{\circ}00'$ - $10^{\circ}20'$).

CAPÍTULO II

2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

2.1 GENERALIDADES

La Sierra de Perijá es un orógeno ubicado al noroeste de Venezuela, relieve que se inicia en el Macizo de Santander al sur en la Cordillera Oriental de Colombia, con un rumbo general N 25° E, y finaliza en las planicies de la Guajira al noroeste de Venezuela. Su extensión es aproximadamente de 250 km de largo por 75 km de ancho. La altura promedio en la fila maestra varía entre los 2.200 m y los 3.750 m, siendo esta la cota el Pico Tetaría. Presenta además una depresión llamada la desgarradura de Perijá producto de la falla de Perijá. El clima está subordinado a las diferencias en la altitud, con lo que se facilita el establecimiento de varios pisos climáticos y de vegetación, desde bosques muy húmedos, hasta premontanos.

2.2 TRABAJOS PREVIOS

HEDBERG & SAAS (1937). Estos autores definen por primera vez las unidades formales de la Sierra de Perijá. De igual forma tratan de unificar criterios para su definición. Su estudio propuso una revisión desde las rocas Pre-Cretácicas hasta las de edad Pliocena en la Sierra de Perijá.

SUTTON (1946). En sus estudios destaca la geología de la Cuenca de Maracaibo y su estratigrafía, siendo este último aspecto donde realiza mayores aportes. Este autor propone una nomenclatura formal a las formaciones Cretácicas y Terciarias, que presentaban algunas dificultades en cuando a nomenclatura.

MILLER (1960). Propone un modelo de evolución tectono-sedimentaria a partir de la correlación de la estratigrafía presente en el área. De dicho estudio determinó que las estructuras dominantes en la Sierra de Perijá, se orientan en dirección N25°E preferencialmente, y a su vez estableció, que estas estructuras están controladas por las alineaciones que forman las fallas de Perijá y el Tigre. Señaló que

la falla de Perijá, debido a que con la falla de Perijá, se forma una desgarradura de la Sierra, dividiendo a esta en dos sectores.

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 de la zona, 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, 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 7° a 20° aproximadamente.

AUDEMARD (1991). A partir de la descripción de líneas sísmicas, divide a la Sierra de Perijá sectores, el sector central donde se ubica la zona de estudio 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. Las estructuras 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 generó estructuras de retrocorrimiento, situación que generó zonas triangulares a lo largo de los erógenos de Perijá y los Andes Venezolanos, indica también que un retrocorrimiento se desarrolló dentro de la 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 se resume la estratigráfica del Oeste de Venezuela, incluyendo a la Sierra de Perijá. Describiendo seis súper secuencias, las cuales están delimitadas por discordancias reconocibles en sísmica.

ARAUJO (1997). A partir de los procesos exploratorios petroleros del frente de montaña de la Sierra de Perijá, Araujo determinó un nivel de complejidad mayor en las interpretaciones estructurales de la zona, debido a que en las observaciones realizadas se obtuvieron 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.

2.3 ESTRATIGRAFÍA

A continuación se presenta un resumen con la caracterización de las unidades litoestratigráficas existentes en área de estudio, trabajo realizado por diversos autores y compilado en el Léxico Estratigráfico de Venezuela, Tomo II (1974). En la zona afloran dos tipos de rocas, las rocas metasedimentarias edad más antigua (*Paleozoico sin diferenciar*), y las rocas sedimentarias depositadas durante el *Jurásico Inferior* hasta el *Reciente*. Seguidamente se presenta el orden cronológico de estas unidades. (Ver Figura 2-1)

Tabla 2-1. Formación Tinacoa

| Autores | Descripción | |
|---|----------------|--|
| | Localidad Tipo | Río Tinacoa, Flanco Sur Oriental de la Sierra de Perijá. |
| González de Juana et al., (1980) | Litología | Estable que esta Formación está constituida fundamentalmente de grano fino, con dos miembros; uno inferior calcáreo y otro superior más arenoso con piroclastos. |
| | Ambiente | Aguas poco profundas. |
| | Espesor | 1600 m. |
| Bowen (1972) | Edad | Jurásico Inferior. |
| | Espesor | 685 m. |
| Hea y Whitman (1960) | Espesor | 1680 m. |
| González Padilla (1975) | Contacto | Discordante angular con Fm. Macoita en el Río Macoita. |
| Xavier y Espejo, (1977) | Contacto | Discordante. |
| Bowen, (1972) | Fósiles | Restos de Peces del género <i>Lepidotus</i> , esporomorfos. |
| Odreman y Benedetto, (1977) | Paleoflora | <i>Ptilophyllum sp</i> , <i>Otazamitez sp</i> , <i>Cyzicus sp</i> . |

La Formación Macoita muestra dos características que marcan diferencia con la Formación Tinacoa, la primera es la presencia de material terrígeno, y la segunda es la ausencia de calizas (Bowen, 1972). Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tablas: 2-2)

Tabla: 2-2 Formación Macoita

| Autores | Descripción | |
|--------------------------|-------------|---|
| González de Juana | Litología | Señaló que está compuesta por lutitas y limolitas calcáreas gris aceituna a veces pseudoolíticas, interestratificadas con |

| | | |
|-----------------------------------|----------------|---|
| et al., 1980 | | Grauvacas, areniscas tobáceas, tobas líticas, frecuentemente con estratificación cruzada. |
| Hea y Whitman, (1960) | Litología | Destacan la presencia de Calizas. |
| Bowen, (1972) | Fósiles | Nombró la presencia de escamas de peces no identificados, y de restos de vegetales y palinomorfos |
| | Espesor | 2350 m. |
| | Edad | Jurásico Temprano a Medio. |
| Odreman y Benedetto,(1977) | Paleoflora | <i>Ptilophyllum sp, Phleboteriys sp.</i> |
| L.E.V. II (1970) | Contacto | Transicional con la formaciones Tinacoa, Volcánicas de la Gé, Y La Quinta. |
| | Localidad tipo | Río Macoita con Formación La Quinta |
| | Observaciones | Marcada presencia terrígena. |

La **Formación La Quinta** es el producto de una sedimentación continental, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tablas: 2-3)

Tabla 2-3 Formación La Quinta

| Autores | Descripción | |
|---|--------------------|---|
| González de Juana et al., (1980) | Litología | Constituye una potente secuencia de limolitas, areniscas y conglomerados de color rojo. |
| Maze, (1984^a) | Litología | Definió tres miembros; El basal compuesto por arcosa marrón a roja oscura, de grano fino a medio, intercalaciones de piroclastos, con carbonatos de agua dulce. En el medio se presentan conglomerados tobáceas y arcosas verdes, intercalaciones de arcosas marrón a rojo oscuro y lutitas rojas a negras fosilíferas. Y en la parte superior rocas de grano grueso localmente conglomeraticos de arcosa roja oscura, cenizas roja félsicas finas. |

| | | |
|--|----------------|--|
| | | |
| Maze, (1984^a) | Edad | Jurásico Tardío-Medio. |
| | Espesor | 1700 m en la quebrada La Gé. |
| L.E.V. II (1970) | Espesor | Más de 1000 m |
| Hedberg y Saas, (1937) | Contacto | Transicional con grupo cogollo. |
| Bowen, (1972) | Contacto | Discordante con las Formaciones Tinacoa y Las Volcánicas de La Gé. |
| | Fósiles | <i>Estheria.</i> |
| L.E.V. I (1956) | Fósiles | <i>Posidonomya.</i> |
| L.E.V. II (1970) | Paleoflora | Resto de madera petrificada. |
| Moctiscka, (1975), Schubert et al., (1979), Lugo y Mann, (1997) | Ambiente | Planicie aluvial con depósitos Lacustrino y de agua salobre. |
| Hea y Whitman, (1960) | Localidad tipo | Estado Táchira. |

2.3.2 Rocas del Mesozoico Medio

El Cretácico Tardío está representado por las Formaciones Río Negro, y el Grupo Cogollo compuesto por las Formaciones Apón, Lisure, Maraca y La Luna, las cuales constituyen una secuencia de rocas de origen carbonático.

La **Formación Río Negro**, son rocas predominantemente de origen continental, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-4)

Tabla: 2-4 Formación Río Negro

| Autores | Descripción |
|----------------|--------------------|
|----------------|--------------------|

| | | |
|---|----------------|---|
| González Padilla y Ortiz, (1976) | Litología | Caracteriza con “areniscas líticas” y conglomerados y escasas ortocuarcitas, lutitas y tobas. |
| Van Andel, (1958) | Litología | Señala que las areniscas son Feldespáticas, del tipo arcosa residuales, producto de la denudación de material terrígeno y metamórfico poco meteorizado. |
| Maync, (1959) | Edad | Neocomiense-Barremiense |
| Hea y Whitman, (1960) | Espesor | 1600 m |
| Sutton, (1946) | Espesor | 3000 m |
| L.E.V. II (1970) | Contacto | Discordante con formaciones pre-cretácicas y transicional con la Formación Apón. |
| | Fósiles | Retos de plantas. |
| Renz, (1956) | Ambiente | Ambientes fluvial y con abanicos aluviales. |
| L.E.V. II(1970) | Localidad tipo | Gargantas de Río Negro, Suroeste de Machiques. |

El **Grupo Cogollo**, nombre acuñado por Sutton (1946), para definir una secuencia de rocas predominantemente carbonáticas. Rod y Maync (1954) reconocen tres formaciones en este Grupo, las que denominó Apón, Lisure y Maraca, nombradas en el orden cronoestratigráfico correspondiente, de mayor edad a menor. Ver tablas 2.5, 2.6 y 2.7.

La Formación Apón secuencia de rocas carbonáticas, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-5)

Tabla 2-5 Formación Apón

| Autores | Descripción | |
|-------------------------|--------------------|---|
| L.E.V. II (1970) | Litología | Presenta un contenido de calizas gris azulosa, duras, densas en capas gruesas, generalmente fosilífera, con intervalos menores de lutitas que |

| | | |
|------------------------------|----------------|---|
| | | varían de calcárea a arenosas. |
| Rod y Maync, (1954) | Litología | Estudian un segmento de lutitas negras y calcáreas, y calizas calcáreas. |
| Renz, (1959) | Litología | Propone tres Miembros: Tibú, Machiques y Piché. Que constan de calizas bioclásticas de aguas oxigenadas bioclásticas. |
| L.E.V. II (1970) | Espesor | 650 m. |
| | Fósiles | Moluscos, amonites, foraminíferos. |
| | Edad | Aptiense - Albiense |
| Pernaud et al, (1954) | Contacto | Concordante con la Formación m. Lisure. |
| | Ambiente | Plataforma somera a externa. |
| Sutton, (1946) | Localidad tipo | Río Apón, al Oeste de Machiques. |

La Formación Lisure, en este conjunto de rocas las facies son arenosas con incremento de contenido carbonatico, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tablas: 2-6)

Tabla 2-6 Formación Lisure

| Autores | Descripción | |
|----------------------------|--------------------|--|
| L.E.V. II (1970) | Litología | Areniscas calcáreas cuarzosas, glauconíticas, grises o verdosas, de grano medio a fino, areniscas micáceas, laminares, calizas arenosas glauconíticas, calizas grises y calizas coquinoides y algunas lutitas. |
| Rod y Maync, (1945) | Edad | Albiense Medio. |
| L.E.V. II (1970) | Espesor | 100 a 130 m |
| León, 1975 | Contacto | Concordante con Fm. Maraca. |
| | Ambiente | Plataforma marina somera a intermareal. |
| Rod y Maync, 1954 | Localidad tipo | Río Lisure, tributario del caño Maraca. |

La **Formación Maraca**. Su contenido es predominantemente bioclástico, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela 1970; (Ver Tabla: 2-7)

Tabla 2-7 Formación Maraca

| Autores | Descripción | |
|-----------------------------|-------------|---|
| L.E.V. II 1970 | Litología | Su contenido predominantemente bioclástico, conformando calizas coquinoideas y nodulares con poca matriz, también se precisan calizas arenosas. |
| | Espesor | Varía de 150 m en Cabeceras de Río Negro a 50 m en Caño Maraca |
| Renz, 1968 | Fósiles | <i>Ostrea scypha</i> COCUAND, <i>Exogyra</i> sp, <i>Oxitropidoceras</i> |
| | Edad | Albiense Superior. |
| Canache <i>et al</i> , 1994 | Contacto | Hiatus. |
| | Ambiente | Lagunales a intermareales. |

La **Formación La Luna** es importante en el estudio de los hidrocarburos, debido a que representa la roca generadora de éste recurso en el occidente del país. En esta formación se hacen patentes las calizas bituminosas. Según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-8)

Tabla 2-8 Formación La Luna

| Autores | Descripción | |
|------------------|-------------|---|
| L.E.V. II (1970) | Litología | Bancos de caliza micritica laminada, gris a negra, dura, carbonácea y bituminosa, intercalada con lutitas laminadas calcáreas, negras y afatnitas negras. |
| | Edad | Cenomaniense – Campaniense |
| | Espesor | 300 m |
| | Fósiles | <i>Globigerina</i> , <i>Guemberina</i> , <i>Globorotalia</i> , |

| | | |
|-------------------------------|----------------|---|
| | | <i>Globotruncana</i> . Lamelibranquios, amonites. |
| Hedberg y Saas, (1937) | Litología | Proponen una composición en los siguientes términos: 60 % carbonatos, 25% de arcillas y material terrígeno, y 10% de materia orgánica. |
| González, (1999) | Litología | Miembros Tres esquinas en el tope compuesto por un intervalo de arenas glauconíticas. |
| | Contacto | Concordante. |
| | Ambiente | Marino euxínico. |
| Garner, (1926) | Localidad tipo | Quebrada La Luna, a 16 Km. al oeste-noroeste de la Villa del Rosario. Distrito Perijá, |
| | Observaciones | Destaca la presencia de lutitas con contenido radioactivo de bajo a moderado, en la base de ésta formación. Ausencia de foraminíferos bentónicos. |

2.3.3 Rocas del Mesozoico Tardío

La Formación Colon está caracterizada por lutitas de color gris oscuro a negras, incrementando su contenido de arena tanto en la base como en el tope, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-9)

Tabla 2-9-Formación Colón

| Autores | Descripción | |
|-------------------------|--------------------|---|
| L.E.V. II (1970) | Litología | Está caracterizada por lutitas de color gris oscuro a negras, macizas, ocasionalmente micáceas a glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas incrementan su contenido de arena tanto en la base como en el tope. |

| | | |
|----------------------------------|----------------|---|
| Chusman y Hedberg, (1941) | Edad | Campaniense – Maestrichiense Temprano |
| Ford y Houbolt, (1963) | Litología | Las lutitas son mas arenosas hacia la base y el tope. |
| Sutton, (1946) | Espesor | 900 m |
| | Fósiles | Foraminiferos bentónicos, moluscos. |
| L.E.V. II (1970) | Contacto | Transicional con la Fm. Mito Juan. |
| | Ambiente | Aguas profundas. |
| Hedberg y Saas, (1937) | Localidad tipo | Distrito Colón Edo. Zulia, y Ciudad Colón Edo. Táchira. |

Formación Mito Juan. En ésta formación sé identifican lutitas de colores verdoso, y su contenido sedimentario experimenta un aumento en sus facies limosas y arenosas hacia el tope, según el Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970 (Ver Tabla: 2-10)

Tabla 2-10-Formación Mito Juan

| Autores | Descripción | |
|------------------------------------|--------------------|--|
| Ford y Houboldt, 1963 | Litología | Está constituye por lutitas grises, gris verdosas y negras, en éste caso, el contenido sedimentario que experimenta un aumento, es el del limo y de arena en la parte superior, lo que sucede hasta coincidir con capas delgadas de calizas y areniscas. |
| Van Andel, 1958 | Litología | Clasifica a las arenas en el grupo de las grauvacas. |
| Cushman y Hedberg, 1941 | Edad | Maastrichtiense Tardío. |
| Sutton, 1946 | Edad | Maastrichtiense Tardío |
| | Espesor | De 215 m a 755m |
| Spaht, Hedberg y Saas, 1937 | Contacto | Moluscos mal preservados, amonites |

| | | |
|-----------------------|----------------------|---|
| | | sphenodiscus, Coahullites |
| Key, 1960 | Ambiente | Aguas salobres. |
| L.E.V. II 1970 | Ambiente | Aguas marinas poco profundas con intervalos salobres. |
| | Localidad tipo | Quebrada Mito Juan, Colombia. |
| | Observaciones | Inicio de las condiciones regresivas en Venezuela. |

2.34 Rocas del Cenozoico

Las formaciones que se han identificado en la Sierra de Perijá relacionadas con el Terciario, específicamente las relativas a la sedimentación del Paleoceno, han sido marcadas por el proceso de regresión marina experimentada desde finales del Cretácico. En luego de este proceso se depositaron en la zona de estudio el Grupo Orocué, las Formaciones Marcelina, La Sierra y Mirador, el Grupo El Fausto, y finalmente las Formaciones Los Ranchos y La Villa.

Grupo Orocué se destaca por la variabilidad de las rocas de grano fino que la constituyen, como lo son; las lutitas, y arcillitas carbonosas. Según el Léxico estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-11).

Tabla 2-11 Grupo Orocué (*Formación Barco*)

| Autores | Descripción | |
|-----------------------|--------------------|---|
| L.E.V. II 1970 | Litología | Areniscas lutitas y arcillitas intercaladas. De color gris, de grano fino a medio. Abundantes en intercalaciones micáceos-carbonosas. |
| | Edad | Paleocena. |
| | Espesor | 158 m a 278 m |
| | Contacto | Concordante y transicional Con los Cuervos. |

| | | |
|--|--------------------|---|
| | Ambiente | Deltaica. |
| | Localidad tipo | Fila Barco del Este, Colombia. |
| Grupo Orocué (<i>Formación Los Cuervos</i>) | | |
| Autores | Descripción | |
| L.E.V. II 1970 | Litología | Arcillitas, lutitas con capas de carbón en su parte inferior. Las capas de carbón varían entre lignítica y bituminosas. |
| Brondijk, 1967b | Litología | Capas de areniscas a través de toda la sección. |
| L.E.V. II 1970 | Edad | Paleocena |
| | Espesor | 245m a 490 m |
| | Contacto | Concordante en base y tope. |
| | Ambiente | Deltaico parálico. |
| | Localidad tipo | Quebrada Los Cuervos, Colombia. |

Formación Marcelina es una secuencia de rocas de origen paludal con capas de carbón, denominadas por Sutton, 1946 y descritas posteriormente por Miller y San Juan según el Léxico estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-12)

Tabla 2-12 Formación Marcelina

| Autores | Descripción | |
|----------------------------------|--------------------|---|
| Miller y San Juan, (1963) | Litología | Areniscas, limolitas y lignitos, así mismo, estos autores indican que en la parte basal se encuentran unas calizas y areniscas calcáreas con moluscos, ocasionalmente se pueden presentar limolitas en la sección de las calizas. La parte superior de la formación está dominada por areniscas de color marrón con estratificación cruzada, y concreciones calcáreas ovaladas, las cuales destacan y se hacen características de esta formación. |

| | | |
|--|----------------------|--|
| Sutton, (1946) | Litología | Secuencia interestratificadas de lutitas oscuras y carbonáceas, que localmente presenta porcelanita, areniscas de grano fino a medio, y abundantes lechos de carbón. |
| L.E.V. II, 1956 L.E.V. II, 1956 | Edad | Paleoceno Tardío. |
| | Espesor | 540 m |
| | Fósiles | Moluscos. |
| | Contacto | Discordante con la Formación La Sierra. |
| | Ambiente | Paludal. |
| Sutton, 1946 | Localidad tipo | Río Guasare, Sierra de Perijá, Edo Zulia. |
| Motisccka, 1977 | Observaciones | Puede ocurrir combustión espontánea del carbón sobre las arcillas. |

La Formación Mirador recibe su nombre del Cerro Mirador en Distrito Colón del estado Zulia. Desde el punto de vista litológico en estas rocas se identifican areniscas blancas de grano fino. Según el Léxico estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-13).

Tabla 2-13 Formación La Sierra.

| Autores | Descripción | |
|----------------------------------|--------------------|--|
| L.E.V.II (1970) | Litología | La Formación La Sierra está constituida por areniscas, limolitas y algunas lutitas, incluyendo esporádicamente conglomerados, laminas de lignitos, y capas de carbón. |
| Miller y San Juan, (1963) | Litología | Dividen a esta Formación en Miembro Los Tanques, Caña Brava y Rincón. El Miembro Los Tanques contentivo de areniscas macizas, estas son grauwacas y Subgrauwacas, las areniscas se tornan conglomeráticas en la base. El Miembro Caña Brava es el segmento central de la |

| | | |
|--|----------------|---|
| | | formación La Sierra, en cual se identifican lutitas grises, areniscas de grano fino a medio dispuestas en capas delgadas, y limolitas. Son comunes las rizaduras. El tercer miembro El Rincón litológicamente compuesto por areniscas,. |
| González de Juana et al, (1980) | Edad | Oligoceno. |
| Pernaud et al, (1995) | Edad | Eoceno Tardío a Oligoceno Temprano. |
| L.E.V.II (1970) | Espesor | 140 m |
| | Contacto | Discordante. |
| | Ambiente | Deltaico. |
| Hedberg y Saas, (1937) | Localidad tipo | Riberas del Río negro, Oeste de Machiques, Edo. Zulia. |

El Grupo El Fausto, tiene una sedimentación correspondiente con arcillas endurecidas, y con algunos intervalos de arcillas laminar, según el Léxico estratigráfico de Venezuela 1970; (Ver Tabla: 2-14)

Tabla 2-14 Grupo el Fausto

| Autores | Descripción | |
|----------------------------|--------------------|---|
| Hedberg y Saas 1937 | Litología | Rocas consistentes en arcillas endurecidas, con algunos intervalos de arcillas laminar, y areniscas verdosas de grano fino. |
| L.E.V.II (1970) | Edad | Oligoceno - Mioceno Tardío. |
| | Contacto | Transicional con la Formación Los Ranchos. |
| | Ambiente | Aguas salobres. |

Formación los Ranchos y La Villa: Esta unidades se distinguen por un contenido de arena aproximadamente de un 60% , lo demás lo constituyen arcillitas, según el Léxico estratigráfico de Venezuela, 1970; (Ver Tabla: 2-15)

Tabla 2-15 Formaciones Los Ranchos y La Villa.

| Autores | Descripción | |
|--|----------------|---|
| González de Juana et al, (1980) | Litología | Indica que está compuesta por arena en un 50% a 60%, lo demás lo constituyen arcillitas. En menor cantidad se encuentra limolita, conglomerado de guijarro o arenisca conglomeráticas. El terreno está teñido de un marrón profundo, y de colores ferruginosos. También se precisan minerales de ilmenita, circón, rutilo, leucoxeno y turmalina. |
| Young, (1958) | Litología | Propone que la Formación Los Ranchos se distingue por el aumento de areniscas, y cambios de coloración de las arcillitas a rojo a gris oscuro. |
| | Edad | Mioceno Medio-Superior |
| Miller, (1956) | Espesor | 1500 m en la localidad tipo. |
| | Contacto | Concordante y transicional con Formación La Villa suprayacente. |
| L.E.V.II, (1970) | Ambiente | Laguna salobre. |
| | Fósiles | Restos de vegetales carbonizados. |
| Miller, (1965) | Localidad tipo | Carretera de Perijá, Edo. Zulia. |

2.3 EVOLUCIÓN TECTÓNICA REGIONAL

2.3.1 Paleozoico

La evolución tectónica correspondiente con la Sierra de Perijá, comienza sobre un Cratón Precámbrico, que estuvo dividido en tres provincias; una metasedimentaria, otra metaígneas y la de composición metamórficas, sus rocas han sido datadas cerca de 3000 a 1400 millones de años

En el Cámbrico se registra una ruptura del Cratón, iniciándose un proceso de *rifting* en consecuencia se conformó un proto-océano denominado Iapetus o proto-atlántico. González, (1999). (Ver figura 2-2)

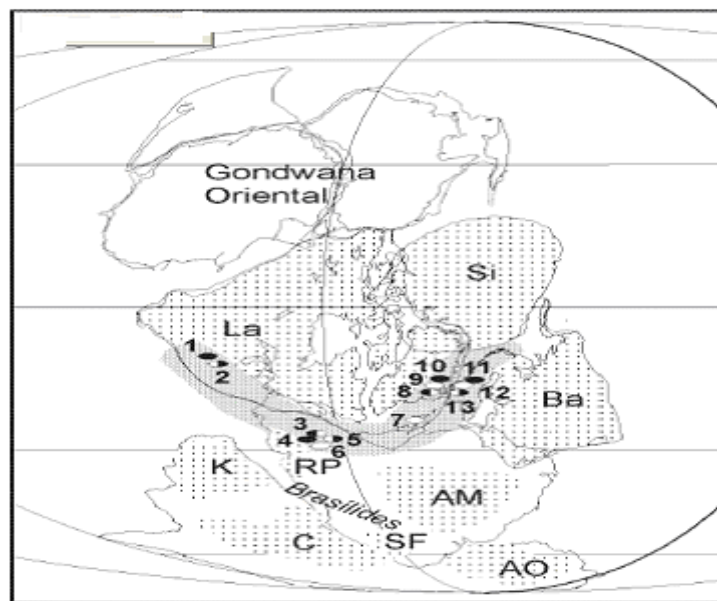


Figura 2-2 Modelo estructural Proto-Atlántico neoproterozoico, Dalziel (1997) (Tomado y modificado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S000448222005000100011&script=sci_arttext&tlng=es).

La apertura y cierre del mar Iapetus, produjo un registro metamórfico que ha sido identificado en las rocas de la cadena montañosa de los Apalaches en Norte América, rocas que han sido correlacionadas en algunos casos, con las de la orogenia de edad Paleozoica del norte de Sur América, especialmente al oeste de ésta. Pindell (1985), Bartok (1993), Lugo y Mann, (1995). El evento metamórfico que deformó a las rocas de Norte América señalado anteriormente, es considerado contemporáneo y

quizás el responsable del plegamiento y transformación de las rocas de noroeste de Suramérica en el Paleozoico.

Sin embargo, estas rocas metamórficas del noroeste de Suramérica, dividen la opinión en cuanto a su real datación, entre quienes proponen que ciertamente son producto del tectonismo antes señalado, y quienes expresan que las mismas (las rocas), presentan varias fases metamórficas que impiden determinar su verdadera edad, en consecuencia se dificulta establecer su origen, tal es el caso de Audemard (1991).

En la bibliografía que trata el tema del tectonismo en el Paleozoico Tardío, se presenta una faja de rocas metamórficas de edad Carbonífero, semejantes a otra faja existente al Oeste de África y en Norte América, e incluso se ha especulado sobre la existencia de rocas más jóvenes de edad Pensilvaniense, gracias a la relación de angularidad que guardan las rocas metamórficas carboníferas de la Sierra de Perijá, y la secuencia sedimentaria bien preservada del Grupo Cachiri en ésta serranía. (González, 1999)

2.3.2 Mesozoico

Durante el Pérmico-Triásico continúa la deformación de las masas rocosas, dando lugar a una tectónica compresiva, con actividad extrusiva e intrusiva de material ígneo y calco-alcalino, con centros volcánicos en Perijá y en el sector llamado el Baúl. Mendoza, (2005)

En el Triásico Temprano comienza un proceso de tectónica extensional tipo *rift*, se trata de la ruptura del supercontinente Pangea, dividiéndose en varias bloques. Esto trajo consigo levantamientos de bloques, algunos autores atribuyen a estas elevaciones posibles inversiones de los aulacógenos preexistentes de origen precámbrico o Paleozoico.

Las zonas positivas sufrieron un prolongado proceso de erosión, ocasionando peniplanación hasta finales del Triásico Tardío. Mientras tanto en las zonas

deprimidas (*semi-grabens* o *grabens*) se daba una depositación continental. (Ver Figura 2-3)

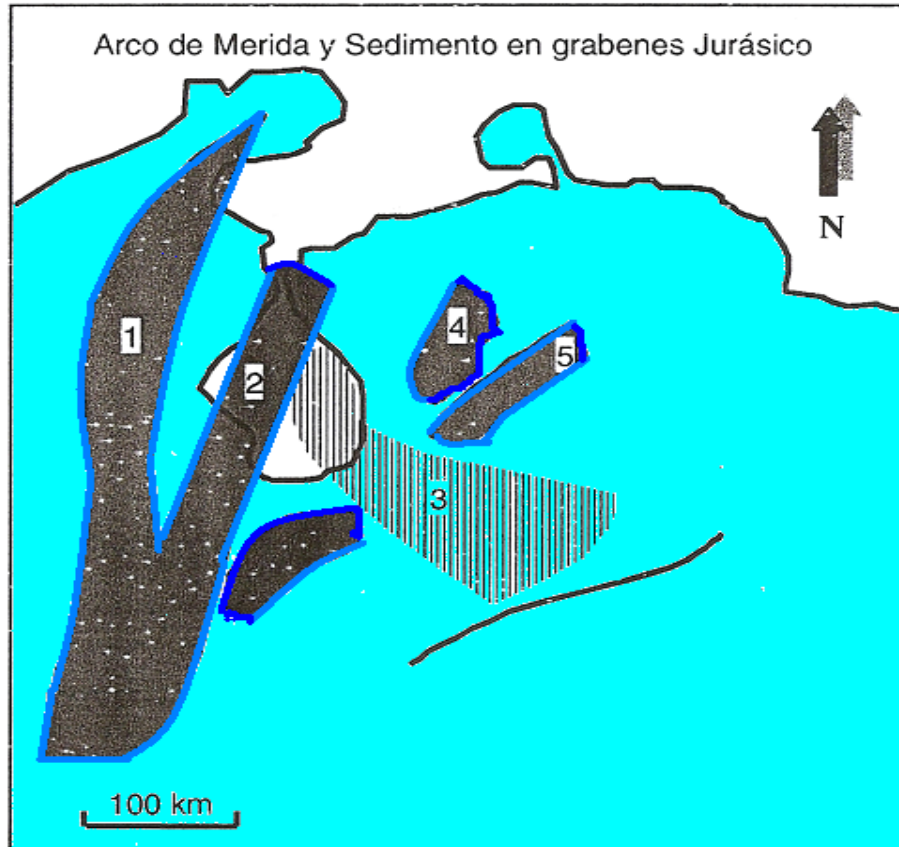


Figura: 2-3- 1, 2, 3 y 4 Representan depósitos Jurásicos del Noroeste del Sur América, y la zona rayada el Arco de Mérida. (Tomado y Modificado de Lugo & Mann 1995)

En el Jurásico Temprano, estos grandes hundimientos o estructuras de *semi-graben*, o *grabens* alineados en dirección N-S que (González de Juana y otros, 1980), definieron como las fosas de Machiques, Barquisimeto y Uribante, se sobreimpusieron a otras estructuras y a la llanura de edad Paleozoico y Precámbrico.

Seguidamente se llevó a cabo un proceso de depositación de grandes cantidades de sedimentos de origen fluvio-deltaicos a marinos someros, (Formación La Quinta). El transcurso de la sedimentación fue acompañada de vulcanismo, con el

cual se intercaló entre los sedimentos ceniza del tipo Volcánicas de la Gé. (González, 1999). (Ver Figura 2-4)

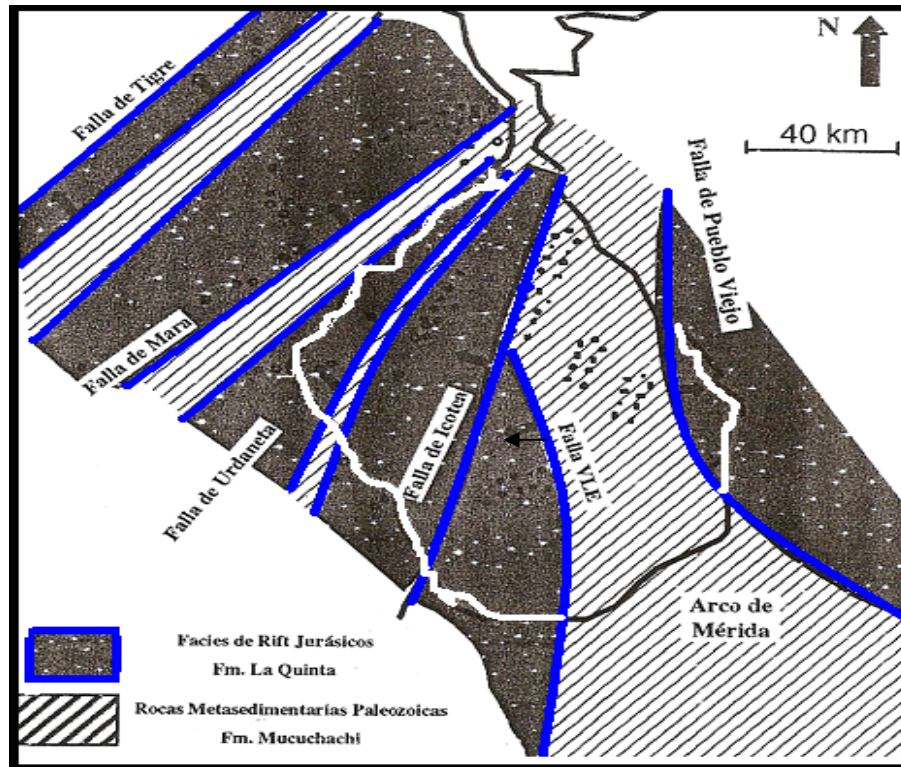


Figura: 2-4 Fallas geológicas asociadas al Arco de Mérida (Lugo y Mann 1995).

La separación de Pangea continuó durante el todo Jurásico, originando dos grandes masas continentales Gondwana y Laurasia, del primero se desprendieron dos bloques importantes, el continental de Sur América y el de África.

Debido a la deriva oeste-este de Sur América y África luego de la fragmentación de Pangea, se produjo el ensanchamiento del mar, configurando un margen pasivo al noroeste de Sur América a finales del Jurásico. (Ver Figura 2-5)

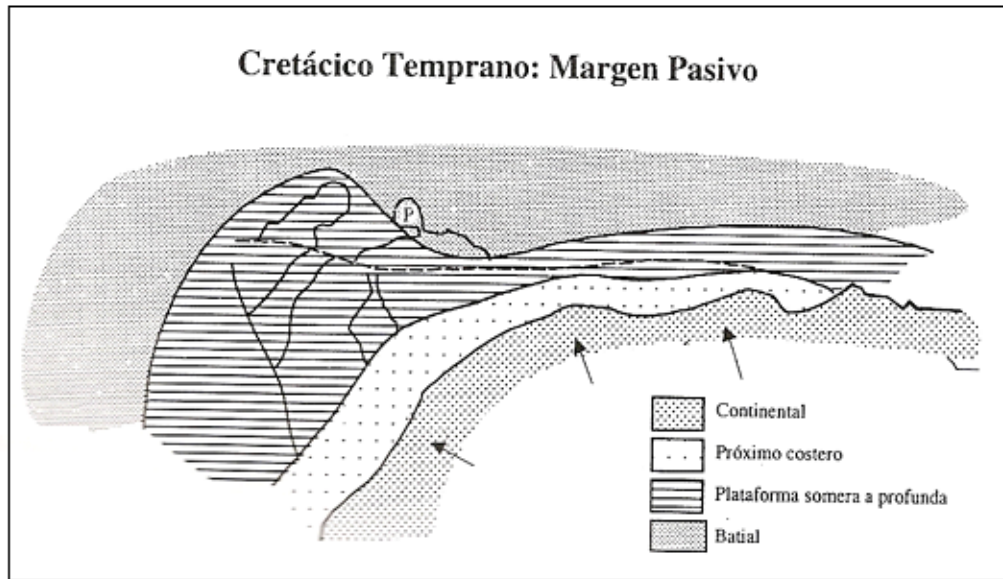


Figura: 2-5 Marco tectónico de Venezuela para el período del Cretácico Temprano (Tomado y modificado de Parnaud *et al.*, 1995)

El desarrollo de este tipo de margen fue acompañado de una subsidencia termal, que permitió el depósito de un volumen grande de sedimentos cretácicos, los cuales se han dispuestos en un secuencia transgresiva, y en condiciones de ambientes marinos costeros a costeros litoral (rocas del Grupo Cogollo).

Esta secuencia estratigráfica, coincide con la trasgresión Cretácica controlada por cambios eustáticos a nivel global. González de Juana (1980) explica, que éste entorno se produjo por la disrupción de Pangea, y el desarrollo progresivo de un océano el mar atlántico.

La presencia de unas evaporitas de principio del Jurásico en el golfo de México, así como también, en el alóctono del Sistema Montañoso del Caribe (Miembro Patao, Formación Cariaquito), sugiere la existencia de un mar entre Norte y Sur América para tal fecha, precursor posiblemente del mar Caribe. Es importante señalar que las evaporitas de norte de Venezuela son de edad Neocomiense - Barremiense, tiempo en el que quizás el *rift* proto-atlántico, recibió la entrada de aguas marinas, hecho que hace pensar que el ingreso del mar en Venezuela o la

llamada transgresión Cretácica, sucedió a mediados del Barremiense- Aptiense desde el mar Caribe, previamente formado al Norte del país. De igual forma ocurrió una incursión marina por el oeste desde el mar epicontinental cercano a la Cordillera Oriental de Colombia.

Un elemento topográfico que destaca en el Cretácico Temprano, es el Arco de Mérida única estructura positiva emergida para el momento. La máxima transgresión marina en Venezuela, se ubicada entre el Santoniense – Conianiense, alcanzando por el Sur al río Arauca y al Meta, por el occidente al Río Apure, y por el oriente hasta donde se ubica actualmente Ciudad Bolívar.

La profundización del espacio y el tiempo transcurrido, permitió la generación de condiciones euxínicas, pasando de ambientes marinos abiertos a captación de materia orgánica con escasa contribución de sedimentos clásticos, en ese lugar se depositó la Formación La Luna, siendo éstas rocas las generadoras de hidrocarburos en el Occidente de Venezuela. (Mendoza, 1995).

Al final del Cretácico se experimenta un cambio en el marco tectónico, el paso de un margen pasivo a uno activo, debido a la modificación del terreno causado por la elevación del margen oeste, generada por la colisión de un arco volcánico con la placa Suramericana, lo cual se ha deducido por la evidencia de materia volcánica en la Formación La Luna. Bajo estas nuevas condiciones el mar recibió un gran aporte de sedimentos pelíticos (Formación Colón), ello debido a la apertura a aguas en circulación. (Ver Figura 2-6).

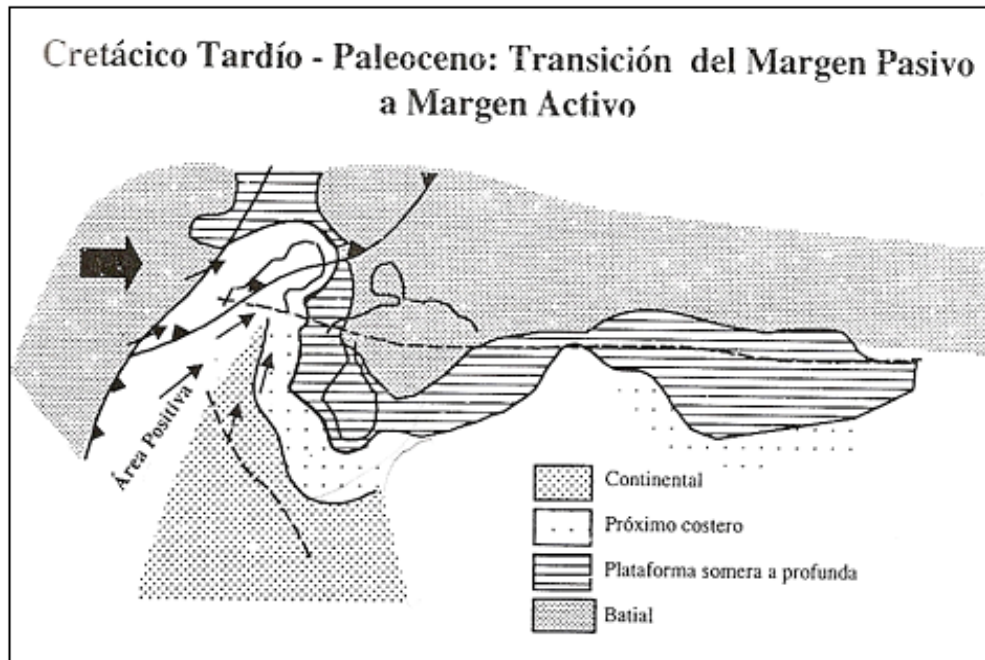


Figura: 2-6 Marco tectónico de Venezuela para el período del Cretácico Tardío-Paleoceno (Tomado y modificado de Pernaud *et al.*, 1995)

El producto del choque de la placa oceánica Pacífica y la margen occidental de la placa continental Suramericana, dio lugar al levantamiento de la Cordillera Central de Colombia (subducción tipo “B” Benioff). Al este de la cordillera colombiana se originó una faja plegada y fallada, al tiempo que se formó una cuenca de antepaís, ello sucedió en un marco tectónico de transurrencia oblicua conocido como subducción del tipo Ampfere “A” (Audemar, 1991).

Con la conformación de la cuenca de antepaís en el Cretácico Medio, y su respectivo *forebulge* en la zona del actual Lago de Maracaibo, posiblemente se expusieron elementos estructurales a la erosión en el Albiense, situación que quedó registrada como un hiatus en la secuencia estratigráfica. (Canache *et al.* 1994)

2.3.3 Cenozoico

La progresiva elevación del terreno al noroeste de Venezuela de finales del Cretácico hasta el Mioceno Tardío, generó un control sedimentario importante con un proceso de regresión marina, que ocasionó una migración de los mares en dirección noreste, pasando de ambiente de plataforma, a deltaicos parálidos y posteriormente a marinos muy someros.

En el Eoceno Medio el desplazamiento de las Napas de Lara, generó una subsidencia flexural en las cuencas Barinas y Apure, conjuntamente con una transgresión. Seguidamente el peso de las Napas mencionadas, creó un área de bisagra al noreste de la plataforma de la cuenca de Maracaibo. (Ver Figura 2-7)

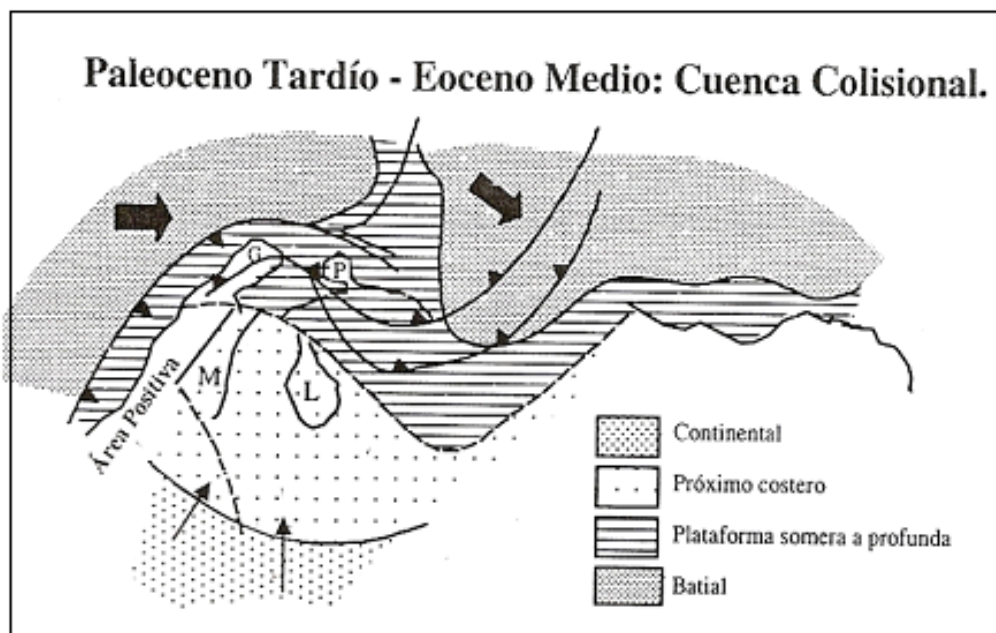


Figura: 2-7 Marco tectónico de Venezuela para el período del Paleoceno Tardío- Eoceno Medio (Tomado y modificado de Pernaut et al., 1995).

El aumento en la compresión oblicua y el avance del movimiento dextral entre las placas Caribe y suramericana al norte de Sur América, se efectuó desde el Eoceno Tardío hasta el Oligoceno Temprano, así lo señala Audemard 1991, permitiendo la creación de estructuras positivas al norte y noreste de Venezuela, siendo una de ellas la que separa a la cuenca de Maracaibo con la de Falcón. (Ver Figura 2-8)

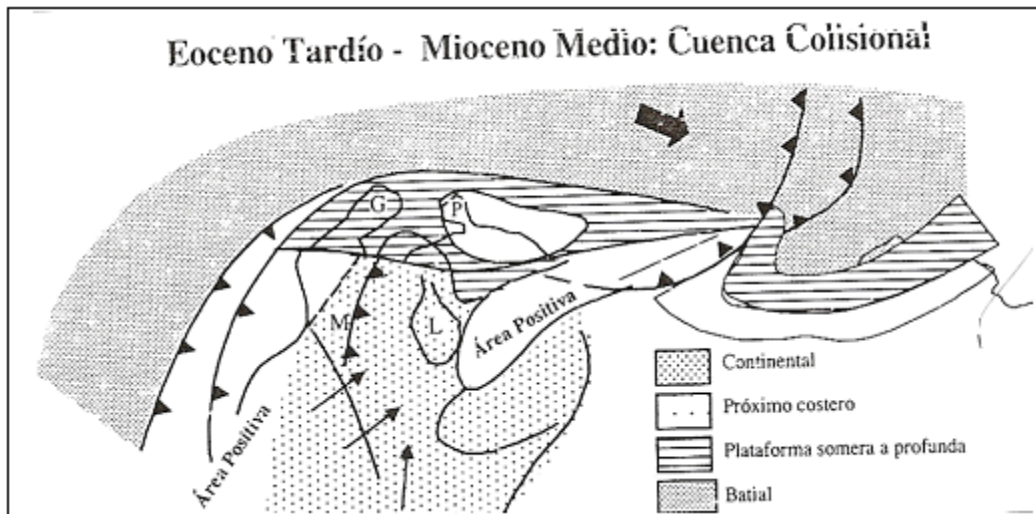


Figura: 2-8 Marco tectónico de Venezuela para el período del Eoceno Tardío-Mioceno Medio (Tomado y modificado de Parnaud et al., 1995)

Mientras que en el Oligoceno se desarrollan estructuras extensivas, relacionadas a la transcurrancia de los límites de las placas, en el Mioceno Medio se reactivan. (Audemar, 1991), lo que significa que para la fecha mencionada se origina un tectonismo compresivo. (Ver figura 2-9).

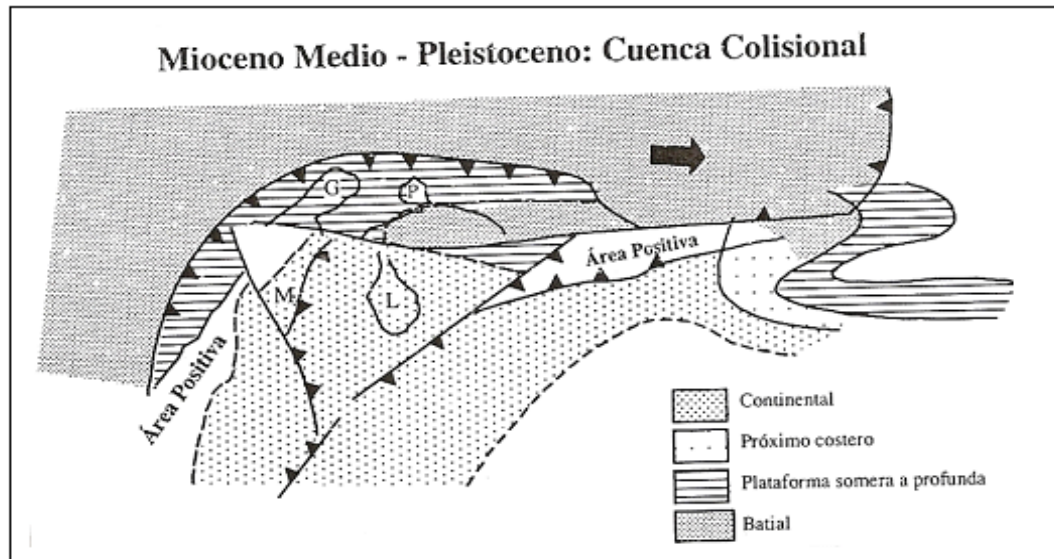


Figura: 2-9 Marco tectónico de Venezuela para el período del Mioceno Medio – Pleistoceno (Tomado y modificado de Parnaud *et al.*, 1995).

Según Audemard (1991) esa compresión es activa hoy en día, siendo la componente dextral de estos esfuerzos la responsable de la deformación este – oeste de las estructuras plegadas observadas en la actualidad (Audemard, (1999) en Parnaud *et al.*, 1995).

La convergencia compresiva de la Placa del Caribe y la placa de Sur América, con una componente dextral de dirección Noroeste - Sureste hoy en día definen el marco tectónico. (Ver Figura 2-10)

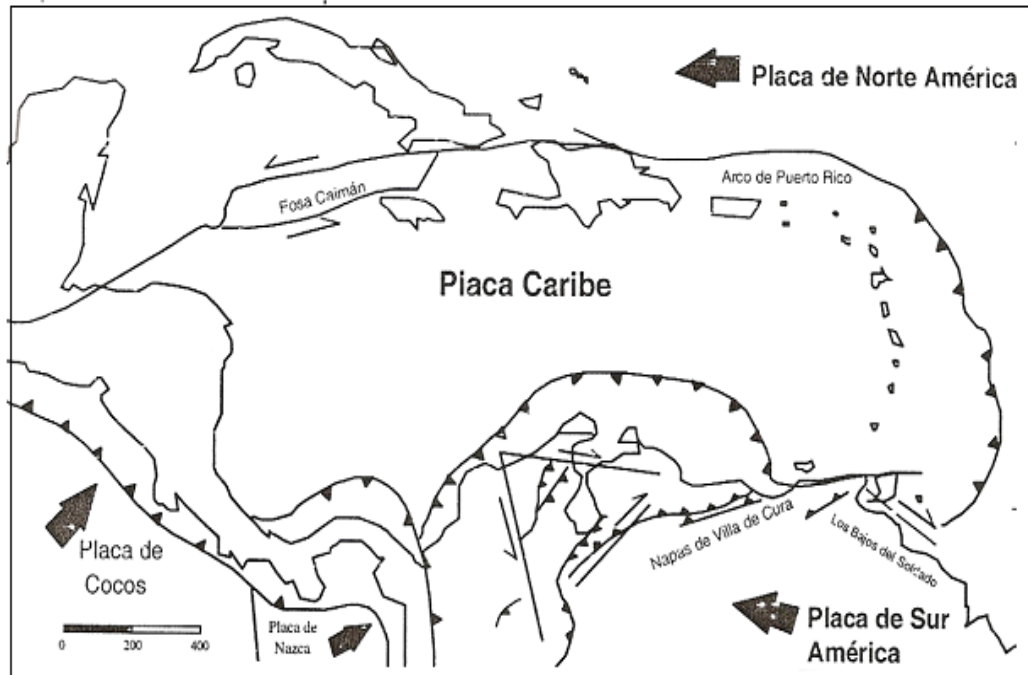


Figura 2-10 Marco tectónico actual del Caribe y Venezuela (Tomado y modificado de Kellogg y Bonini, 1982).

2.4 DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ

El sector en estudio se ubica fundamentalmente en el flanco este de la Sierra de Perijá. Este ha sido un espacio de gran importancia desde el punto de vista de la producción de hidrocarburos, ya que en él se encuentran potenciales reservas de petróleo, situación que ha motivado un sinnúmero de estudios, destacando los trabajos de Miller 1960, Kellogg 1984, Audemard 1991, Roure *et al.* (1994); De Toni *et al.* (1997- 1998)

Las explicaciones sobre la expresión estructural del flanco este perijanero, ha sido interpretada por varios autores, como el caso de Audemard (1991), quien señala que la deformación de la zona central y meridional de la Sierra de Perijá, es producto de la dinámica tectónica asociada a una zona triangular regional articulada por fallas de bajo ángulo. Mientras que De Toni *et al* (1997-1998), manifiestan en sus estudios que tal deformación es significativamente más compleja, y se adecua a los modelos

de deformación asociadas a inversiones estructural propuestos por Cooper y Williams (1989), Mac Clay, (1990) y Coward (1996^a). (Ver Figura 2-11)

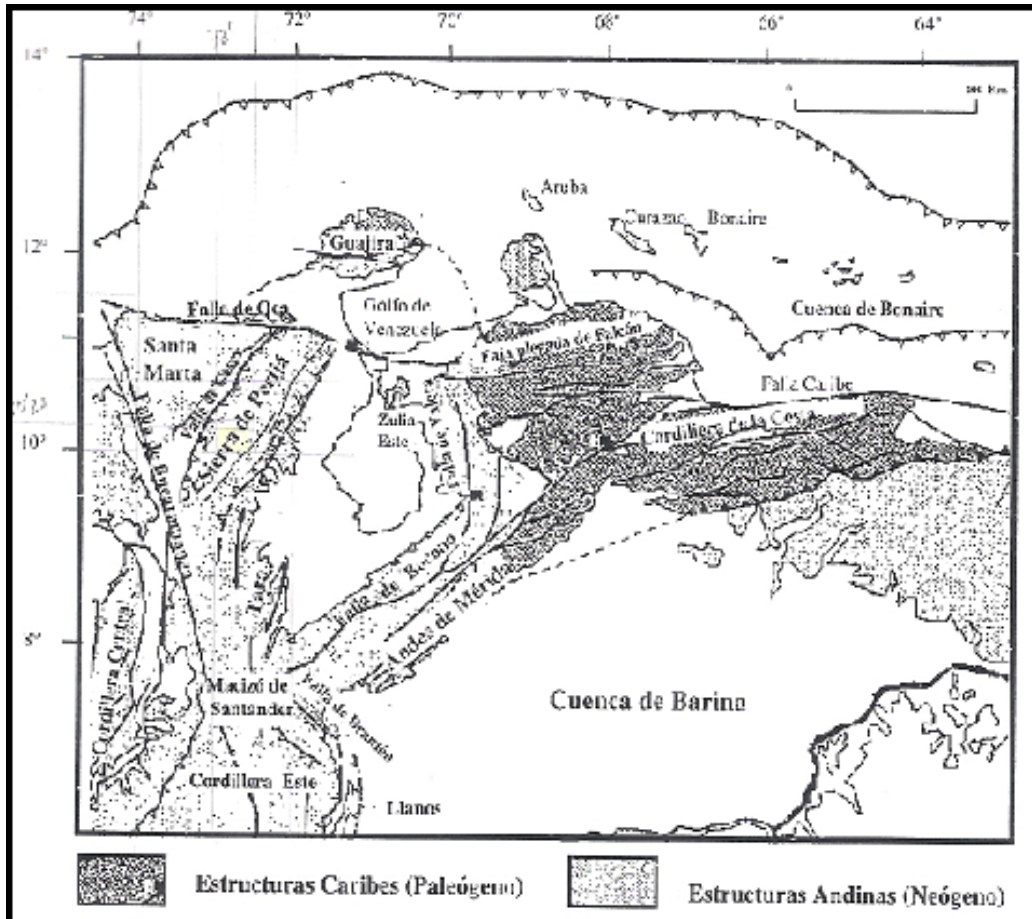


Figura 2-11 Mapa estructural del noroeste de Sur América. (Tomado y Modificado de Colleta *et al.*, en González, 1999)

La expresión geomorfológica está subordinada a la sumatoria de las estructuras que se encuentran en el subsuelo. Según Miller (1960), estas estructuras mantienen una posición preferencial suroeste – noreste, y las principales son la falla de Perijá, y una falla que pone en contacto rocas del Cretácico Temprano con rocas del Eoceno Medio.

Al oeste de la falla de Perijá se observa un monoclinal como expresión superficial en el flanco este de la sierra, la deformación mantiene un buzamiento sureste. Al este de la referida falla el monoclinal cambia y derivando en un sinclinal y posteriormente a un anticlinal. (González, 1999). (Ver Figura 2.12)

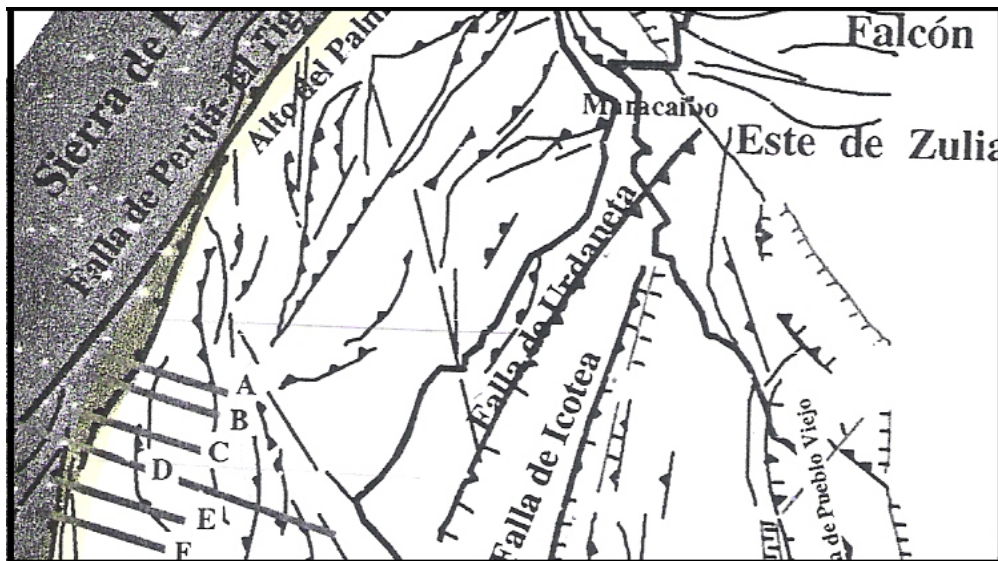


Figura 2-12 Estructuras presentes en la zona de estudio. (Tomado y modificado de Roure *et al.*, 1997)

En el subsuelo se identificaron tres fallas a través de estudios sísmicos, las cuales son de bajo ángulo, y estas se relacionan con una zona triangular, y estas con un retrocabalgamiento, y de acuerdo a Mc Clay (1990b) un fallamiento del *graben* invertido.

La estructura más importante de la región es la falla de Perijá, cuyo comportamiento es de tipo normal, con un significativo efecto de inversión, hecho que se evidencia con el afloramiento de las formaciones La Quinta y Río Negro. El plano de falla de la Falla de Perijá, está promediado en 15 km de profundidad, con buzamiento de alto ángulo. Al oeste de la falla de Perijá, se presenta otra falla de manera superficial, en este caso entran en contacto el basamento, con las formaciones La Quinta y Río Negro, estructura que es interpretada como un corrimiento fuera de secuencia de ángulo (González, 1999). (Ver Figura 2-13)

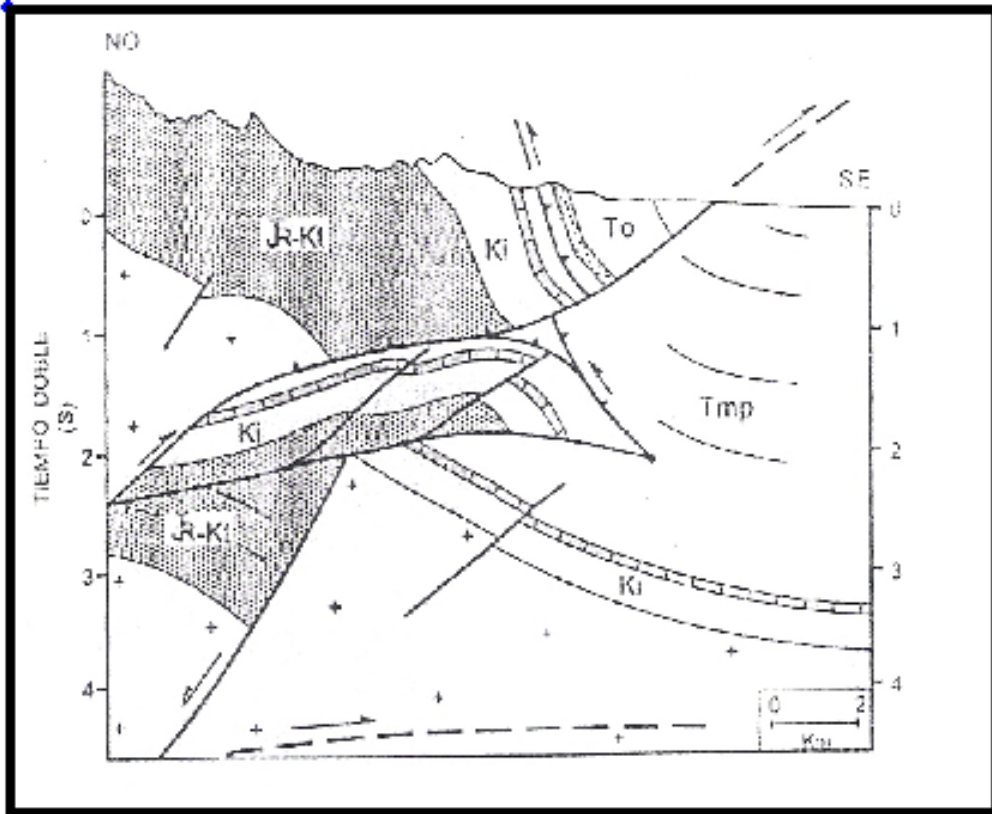


Figura 2-13 Estilo estructural del sector central de la Sierra de Perijá, (Tomado y modificado de De Toni *et al.*, 1998)

CAPÍTULO III

3. LA TELEDETECCIÓN

Se denomina así a la percepción remota, la cual permite obtener información sobre un objeto, superficie o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento de forma inalámbrica, es decir, no se encuentra en contacto directo con este. Se fundamenta en que todos los objetos visibles en la superficie terrestre emiten un espectro electromagnético distintivo y particular, en función de su propia naturaleza y de las radiaciones que recibe, en este caso la energía solar.

La reflectancia de ese espectro electromagnético también es conocida como firma espectral, esta permite que el objeto observado sea distinguible de los demás. (Tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Teledetecci%C3%B3n>)

3.1 LOS ELEMENTOS DE UN PROCESO DE TELEDETECCIÓN

El proceso de teledetección involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés. Un ejemplo de este proceso, con el uso de sistemas de captura de imágenes puede verse en la (Figura 3-1). Nótese, sin embargo, que la teledetección también involucra la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes.

- A. Fuente de energía o iluminación:** El primer requerimiento en teledetección es disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés.
- B. Radiación y la atmósfera:** Ya que la energía “viaja” desde la fuente al objeto, entrará en contacto e interaccionará con la atmósfera. Esta interacción tiene lugar una segunda vez cuando la energía “viaja” desde el objeto al sensor.
- C. Interacción con el objeto:** La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de este y de la radiación incidente.

- D. Detección de energía por el sensor:** Necesitamos un sensor remoto que recoja y grabe la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera.
- E. Transmisión, recepción y procesamiento:** La energía grabada por el sensor debe ser transmitida, normalmente en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos son convertidos a imágenes digitales.
- F. Interpretación y análisis:** La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca del objeto que fue iluminado (o que emitió radiación).
- G. Aplicación:** El paso final en el proceso de teledetección se alcanza en el momento en que aplicamos la información extraída de las imágenes del objeto para un mejor conocimiento del mismo, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular.

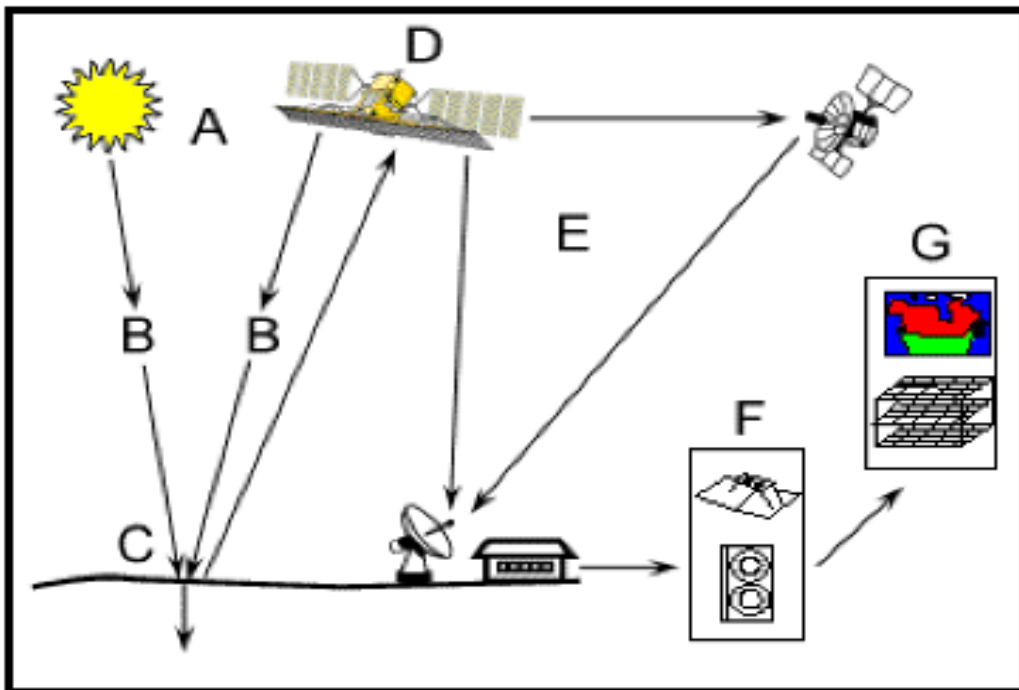


Figura 3-1 Elementos necesarios para la teledetección (tomado y modificado de página web <http://webpages.ull.es/users/marbelo/rs1.pdf>).

3.2 PRINCIPIOS FÍSICOS Y FUNDAMENTOS EN TELEDETECCIÓN

La energía electromagnética que emite un objeto en la superficie de la tierra es recibida por los sensores de los satélites, esta información esta codificada en una frecuencia y una intensidad que el satélite puede recibir directamente o indirectamente, bien sea por Reflexión, Dispersión o Reemisión de la onda hasta el sensor.

Debido a que todos los materiales de la Tierra reflejan o emiten energía electromagnética. Los sensores miden la intensidad de la radiación electromagnética emitida por un objeto y estudian sus propiedades físicas a partir de su variación con la frecuencia. (CARRERO D., Franklin J. e INFANTE, Juan J. 2004)

3.2.1 Términos y unidades de medida usados en teledetección.

Como se mencionó anteriormente la superficie terrestre emite un flujo energético que es detectada por el sensor, este flujo a su vez tiene una intensidad específica, por lo tanto, es necesario explicar las unidades más comunes usadas en teledetección las cuales hacen más fácil la elaboración de los procesos de adquisición.

A continuación se presentara una tabla con las unidades de medidas y su respectiva explicación. (Ver tabla N° 4-1)

Tabla N° 4-1 Lista de unidades más usadas en Teledetección.

| TABLA DE UNIDADES | |
|--------------------------------|---|
| UNIDAD DE MEDIDA | DESCRIPCIÓN |
| Energía radiante (Q). | Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J). |
| Densidad radiante (W) | Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J/m ³) |
| flujo radiante (ϕ) | Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en Vatios (W). |
| Emitancia o exitancia radiante | Total de energía radiada en todas las direcciones desde una |

| | |
|------------------------------------|---|
| (M) | unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado. (W/m ²) |
| Irradiancia radiante (E). | Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien ésta indica la energía emitida, mientras la radiancia refiere a la incidente (W/m ²). |
| Intensidad radiante (I). | Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estéreo-radianes, (ver fig. Nº 3-2). Por lo tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estéreo - radian (W/sr) |
| Radiancia (L). | Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección, porque, de hecho, describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estéreo - radian (W/m ² sr) |
| Radiancia espectral (L λ) | Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por un ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e Irradiancia también puede completarse con el calificativo de espectral (añadiéndole el subíndice λ) para referir a una determinada longitud de onda. |

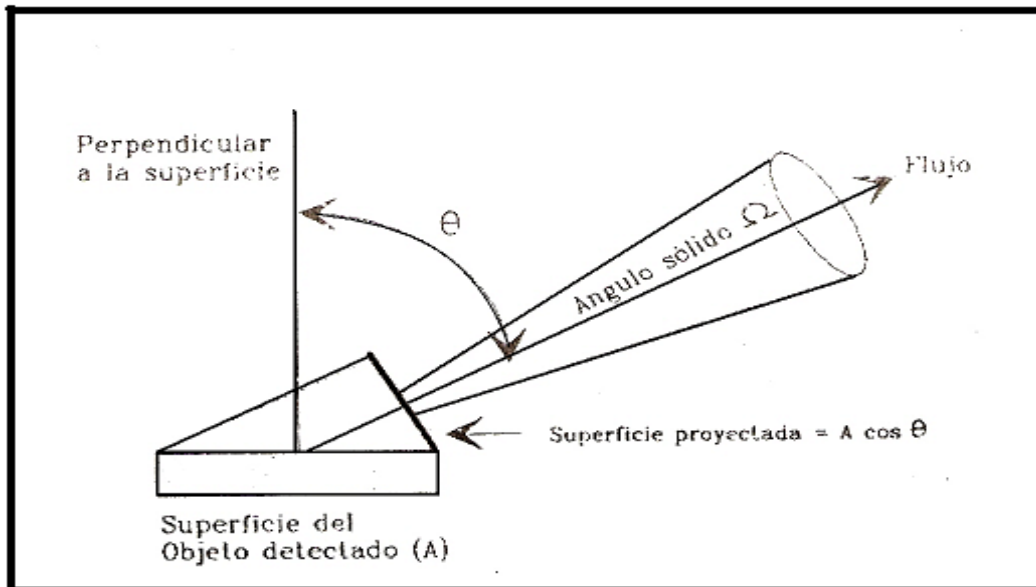


Figura 3-2 Diagrama del ángulo sólido (Adaptado de CARRERO, F. e INFANTE, J. 2004)

3.3 PRINCIPIOS Y LEYES DE LA RADIACIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA

Para poder hablar de estos principios y leyes de la radiación electro-magnética es necesario tener en cuenta que, las distintas cubiertas de interés del medio ambiente que se observan en una imagen, deben ser caracterizadas espectralmente. Estas sufren cierto tipo de variaciones según las condiciones actuantes en el momento como la atmosfera, la temperatura y las propiedades intrínsecas del objeto en sí. Es por esta razón que se deben manejar algunos argumentos físicos y matemáticos para obtener una mejor interpretación de las imágenes. A continuación se presentará una tabla donde aparecen las formulas físicas y matemáticas más usadas en la teledetección. (Ver tabla 4-2)

Tabla N° 4-2 Lista de algoritmos empleadas en teledetección (CARRERO Franklin e INFANTE, Juan 2004)

| Nº | ECUACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|----|---|---|
| 1 | $Q = h(c/\lambda)$ | Representa la cantidad de energía transportada por un fotón. La cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda. Esta relación entre flujo de energía y longitud de onda, puede establecerse con mayor rigor gracias a la Ley de Planck. |
| 2 | $M_{n,\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \exp(-hc/\lambda kT)$ | Ley de Planck: Donde $M_{n,\lambda}$ Indica la emitancia radiactiva espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda (λ); h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ W s}^2 / \text{K}$); c es la velocidad de la luz; λ la longitud de onda y T la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin, K) |
| 3 | $M_{n,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \exp(-C_2/\lambda k T)$ | Donde C_1 puede sustituirse por $3,74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$, y C_2 por $1,44 \times 10^{-2} \text{ mK}$. Es decir la formula de Planck indica que cualquier objeto por encima de cero absoluto (-273 °C) radia energía. La cual aumenta con la temperatura, es decir, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de ondas más cortas, (ver Fig. N°5) |
| | | |

| | | |
|---|---|---|
| 4 | $\lambda_{\text{Max}} = 2998 \mu\text{m K} / T$ | Ley de desplazamiento de Wien: A partir de la fórmula de Planck puede calcularse la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura (T) en Kelvin. Esta es de gran importancia en la selección de la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno. Siempre que se conozca su temperatura, por ejemplo, el caso de un incendio forestal, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se encuentra entre 275 y 420°C. La ley de Wien nos permite situar entre 5,28 y 4,30 μm (infrarrojo medio). |
| 5 | $M_n = \sigma T^4$ | Acumulando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de ondas, podemos calcular el total de energía que radia por unidad de superficie, gracias a la ley de Stefan - Boltzmann. Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-6} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), y T la temperatura en Kelvin. |
| 6 | $M = \epsilon M_n$ | La emisividad se define como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. Con este nombre se indica un emisor perfecto; esto es, un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe. También se habla de cuerpos blancos o reflectores perfectos, cuando no absorben nada de la energía incidente, sino que reflejan por completo (emisividad =0). |

En conclusión se puede decir que entre las ecuaciones (2 a 6) se puede hacer una estimación de la emitancia total y espectral de un objeto determinado con solo conocer su temperatura absoluta, siendo la emitancia total mas alta a medida que la temperatura también lo sea, entonces, la energía emitida de un objeto es una función de su temperatura y de haber pequeños cambios en esta se reflejaran directamente en la emitancia total según la ecuación N°5.

Por otra parte conociendo la temperatura de la cubierta u objeto de interés y estimando su emisividad, se puede determinar la banda del espectro que resulte ideal para su discriminación.

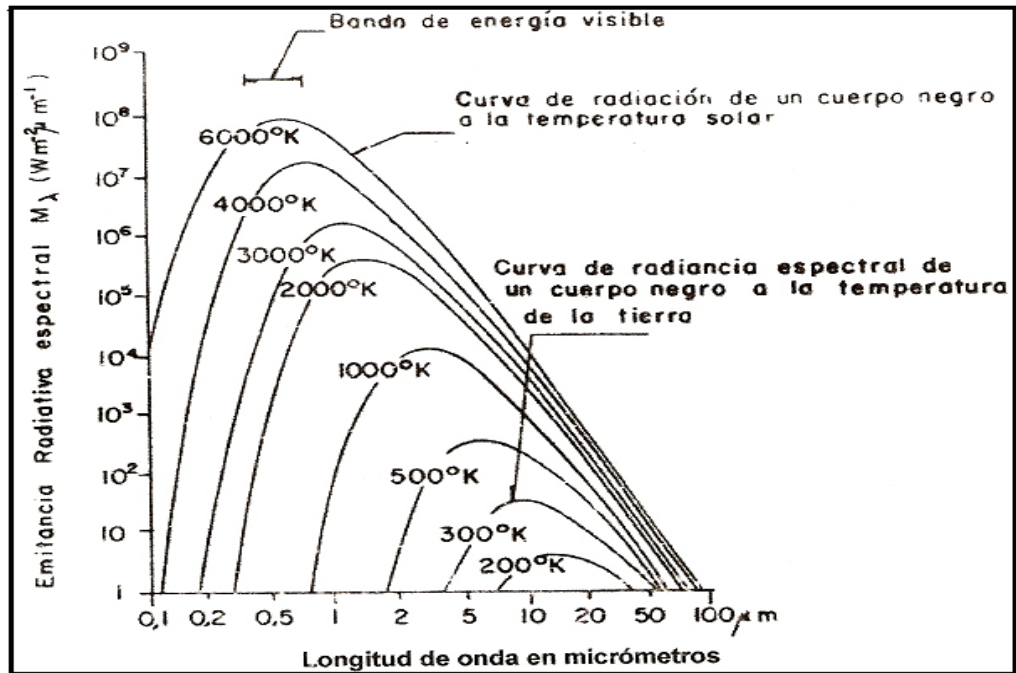


Figura 3-3 Curva de emittancia radiativa (Adaptado de CARRERO, F. e INFANTE, J. 2004).

3.4 FIRMA ESPECTRAL

El sol es el emisor de radiación más usual para imágenes de teledetección, este emite la radiación que incide inicialmente con la atmósfera, Los gases presentes en dicha atmosfera, como el resto de la materia presente en el universo, interactúa con la radiación, absorbiéndola, reflejándola y/o transmitiéndola.

Una vez que la radiación solar ha traspasado la atmósfera interacciona con la superficie terrestre, encontrándose con todo tipo de materiales diferentes, aguas dulces, saladas, tierras desnudas, nieve, zonas de vegetación densa, zonas de vegetación arbustiva, ciudades, etc. Cada tipo de superficie interacciona con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. Esta característica hace posible que se puedan identificar los distintos objetos: suelo, vegetación, aguas, etc.

Experimentos realizados en laboratorio han podido caracterizar el comportamiento de estas distintas superficies al recibir radiación y caracterizando los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión. A este comportamiento concreto de cada objeto es a lo que se llama firma o signature espectral del mismo. (Ver figura 4-4). Tomado y modificado de (CARRERO F. e INFANTE, J. 2004).

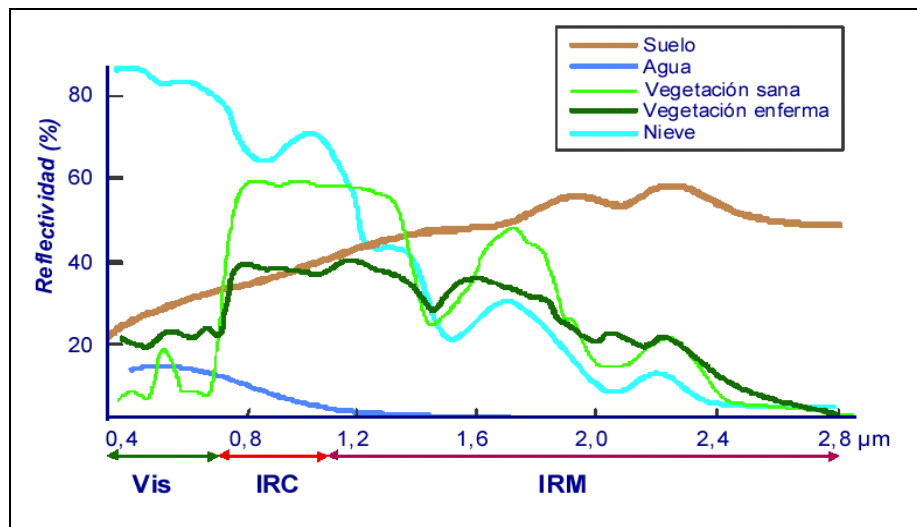


Figura 3-4 Firma espectral para distintos tipos de cubierta. (Tomado de <http://fanpaulieb.blogspot.com/2007/09/reflectancia-espectral-curvas.html>).

Una vez conocida la firma espectral de la cubierta que se necesita estudiar, se clasifica los píxeles correspondientes a dicha cubierta. Por ejemplo, la vegetación tiene una firma espectral caracterizada por un pico de reflexión en infrarrojo cercano, lo que permite diferenciarla de otras cubiertas que en el rango visible tengan una respuesta espectral semejante. Dentro de la firma espectral, dependiendo de las longitudes de onda analizadas, es posible el análisis particularizado de características de la cubierta bajo estudio.

En el siguiente diagrama se observa como aspectos como la pigmentación, contenido en agua, etcétera influyen sobre la firma espectral de la vegetación.

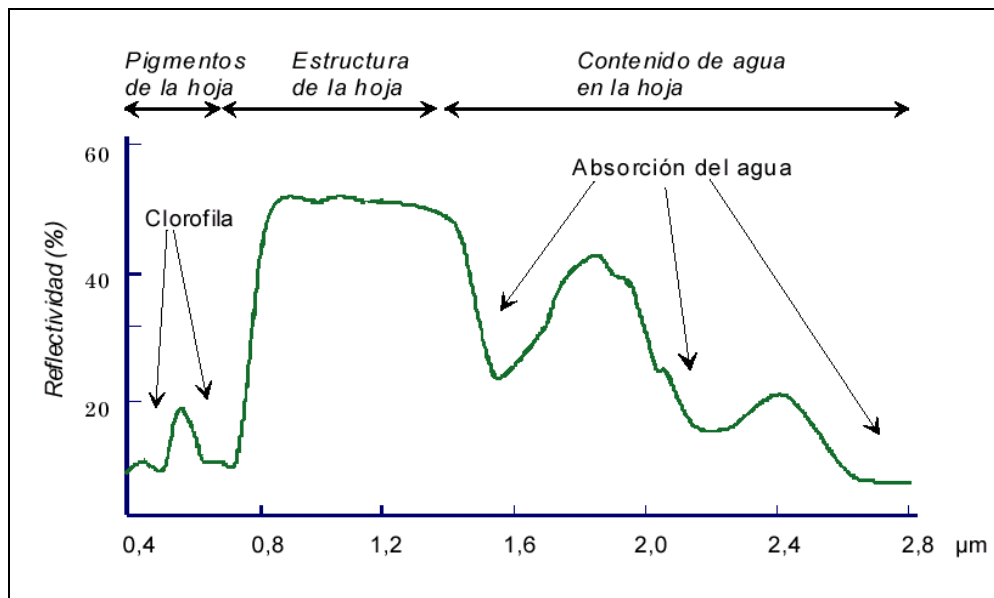


Figura 3-5 Factores en la reflectividad de las hojas verdes. (Tomado de http://www.scanterra.com.ar/conozca_mas.html)

Se debe tener presente que 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 puede variar debido a factores como el ángulo de iluminación solar, relieve, influencias atmosféricas, ángulo de observación entre otros, es por ello que comprender y determinar la firma espectral es esencial si necesitamos diseñar instrumentos que puedan detectar los rasgos que se desee.

3.5 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Es la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia, en el caso de emisión se denomina Espectro de emisión y para el caso de la absorción Espectro de absorción. La radiación emitida sirve para identificar la sustancia de manera similar a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir observar el espectro, permiten realizar medidas sobre éste, como la longitud de onda o la frecuencia de la radiación.

Está comprobado que La energía electromagnética puede ser visible al ojo humano, ya que esta no solo se presenta en forma de ondas de radio, calor, microondas, rayos ultravioleta, rayos gamma y rayos X, sino también en un **Espectro visible entre** (0.4 -0.7 μm) que además es la única radiación electromagnética percibida por el hombre, como coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima se distinguen tres bandas elementales que son los colores azul (0.4 a 0.5 μm), Verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm). Véase en la Figura 4-6

Hay otras series de bandas espectrales que se usan en la teledetección como: **Infrarrojo próximo** (0.7 -1.3 μm) también conocido como infrarrojo reflejado o fotográfico, es de gran utilidad para la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.

Infrarrojo medio (1.3 -8 μm) en esta banda espectral se mezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

Infrarrojo lejano o térmico (8 – 14 μm), esta incluye la emisión del espectro terrestre.

Micro-ondas (a partir de 1mm), su interés radica en que es un tipo de energía que resulta transparente a la cubierta nubosa. (CARRERO F. e INFANTE J. 2004)

La siguiente tabla muestra el espectro electromagnético con sus respectivas longitudes de onda, frecuencias y energías de fotón.

Tabla N° 4-3 Tipos de Espectro Electromagnético y sus longitudes de onda, frecuencia y energía.

| Espectro Electromagnético | Longitud de onda (m) | Frecuencia (Hz) | Energía (J) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Rayos gamma | < 10 pm | >30.0 EHz | >19.9E-15 J |

| | | | |
|----------------------------------|---------------|-----------|----------------|
| Rayos X | < 10 nm | >30.0 PHz | >19.9E-18 J |
| Ultravioleta Extremo | < 200 nm | >1.5 PHz | >993E-21 J |
| Ultravioleta Cercano | < 380 nm | >789 THz | >523E-21 J |
| Luz Visible | < 780 nm | >384 THz | >255E-21 J |
| Infrarrojo Cercano | < 2.5 μ m | >120 THz | >79.5E-21 J |
| Infrarrojo Medio | < 50 μ m | >6.00 THz | >3.98E-21 J |
| Infrarrojo Lejano/submilimétrico | < 1 mm | >300 GHz | >199E-24 J |
| Microondas | < 30 cm | >1.0 GHz | >1.99e-24 J |
| Ultra Alta Frecuencia Radio | <1 m | >300 MHz | >1.99e-25 J |

| | | | |
|---------------------------|--------|----------|-------------|
| Muy Alta Frecuencia Radio | <10 m | >30 MHz | >2.05e-26 J |
| Onda Corta Radio | <180 m | >1.7 MHz | >1.13e-27 J |
| Onda Media Radio | <650 m | >650 kHz | >4.31e-28 J |
| Onda Larga Radio | <10 km | >30 kHz | >1.98e-29 J |
| Muy Baja Frecuencia Radio | >10 km | <30 kHz | <1.99e-29 J |

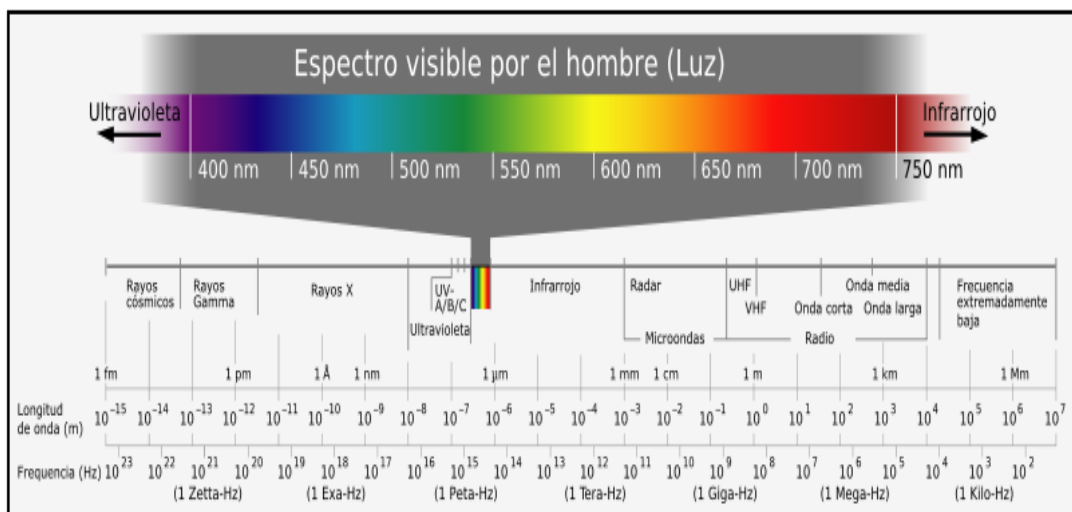


Figura 3-6 Rango de espectros electromagnéticos, Tomado de http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnetico.

3.6 INTERACCIONES ATMOSFÉRICAS

En la superficie terrestre el objetivo de interés emite una energía la cual es recibida por un sensor, esta debe pasar a través de la atmósfera, pero las partículas de materia y los gases dentro de dicha atmósfera, pueden afectar la intensidad y la distribución espectral de la energía lo que complicaría la observación de características de la superficie. Otro efecto atmosférico que también puede alterar significativamente la radiación que llega al sensor es la dispersión o difusión de radiación por partículas de la atmósfera.

Los mecanismos de absorción de la atmósfera dependiente de la frecuencia, alteran la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra. (CARRERO F. e INFANTE J. 2004)

3.6.1 Dispersión

La dispersión viene dada por la interacción entre las partículas de gas presentes en la atmósfera y la radiación electromagnética, dichas partículas tiene un tamaño muy variable y provocan cambios en la radiación incidente, desviándola de su camino.

A la pérdida de energía que ocurre entre la absorción y dispersión se le denomina atenuación atmosférica. Se determinó que el fenómeno de dispersión añade intensidad a la señal que recibe el sensor, mientras que la absorción atmosférica reduce el nivel de las medidas espectrales realizadas.

Las regiones del espectro que están menos influenciadas por los efectos de la absorción y dispersión se denominan ventanas atmosféricas. Tenemos una ventana bien definida en el rango del visible y unas cuantas dentro de las frecuencias correspondientes al infrarrojo. Estas bandas son empleadas extensivamente en teledetección, generando las familias de sensores del visible/infrarrojo cercano y del infrarrojo térmico. (Ver Figura 4-7)

3.6.2 Absorción

La absorción es el segundo proceso que interacciona con la radiación que llega a la atmósfera. Gases tales como el dióxido de carbono, el vapor de agua y el ozono tiene bandas de absorción en regiones particulares del espectro electromagnético. Para longitudes de onda cortas ($<0.3 \mu\text{m}$) la atmósfera absorbe casi toda la radiación incidente. Entre $0.3\text{-}0.7 \mu\text{m}$ encontramos una ventana atmosférica en la que la atmósfera es muy transparente a la radiación visible. Incrementando la longitud de onda encontramos una secuencia de bandas de absorción más o menos fuerte alternadas con otras zonas de relativa transparencia.

La teledetección evita tener que emplear las bandas de absorción para el estudio de la cubierta terrestre, sin embargo, para algunos estudios de naturaleza climatológica y meteorológica estas zonas se eligen deliberadamente.

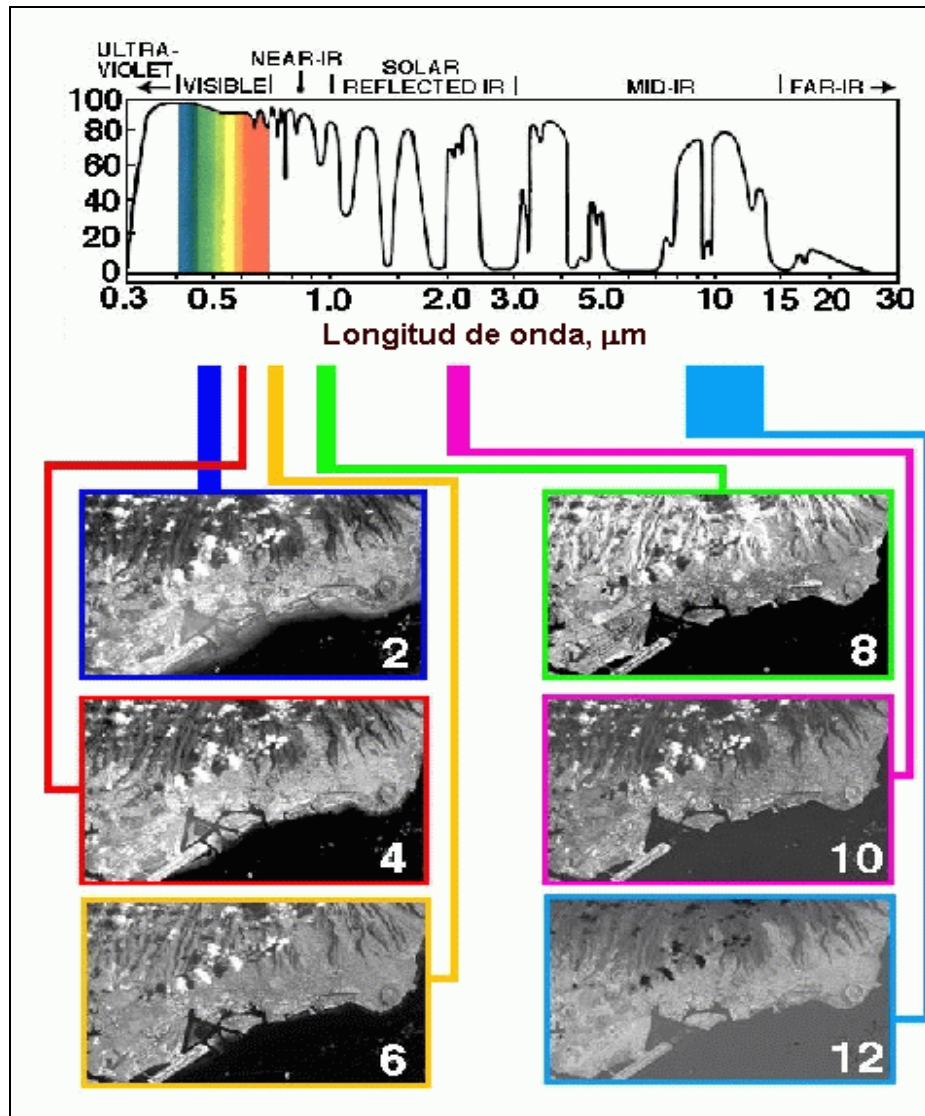


Figura 3-7 Bandas del visible espectral, observadas en las distintas bandas del RGB.

3.7 EL DOMINIO ÓPTICO DEL ESPECTRO.

Se denomina así al grupo de longitudes de ondas que son dependientes de la energía solar, además se han incluido a estas las correspondientes al infrarrojo medio, ya que mantienen una fuerte relación con dicha fuente de energía.

Según la ley de Wien, la máxima emitancia espectral de la energía solar debido a su temperatura radiante próxima de 6000°k es de 0.48μm, y este coincide con el color verde que puede percibir el ojo humano.

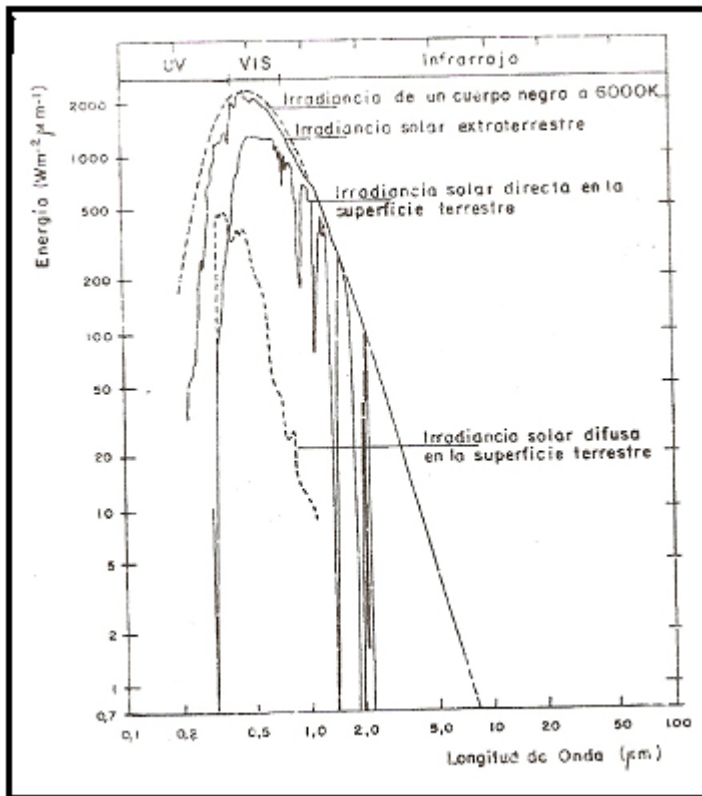


Figura 3-8 curva de emitancia radiativa del Sol. (Adaptado de CARRERO, Franklin e INFANTE, Juan 2004).

Es importante entender como la energía solar interacciona con la superficie terrestre, la radiación que esta emite se descompone en tres términos que son los siguientes:

Ecuación: $\varnothing_i = \varnothing_r + \varnothing_a + \varnothing_t$

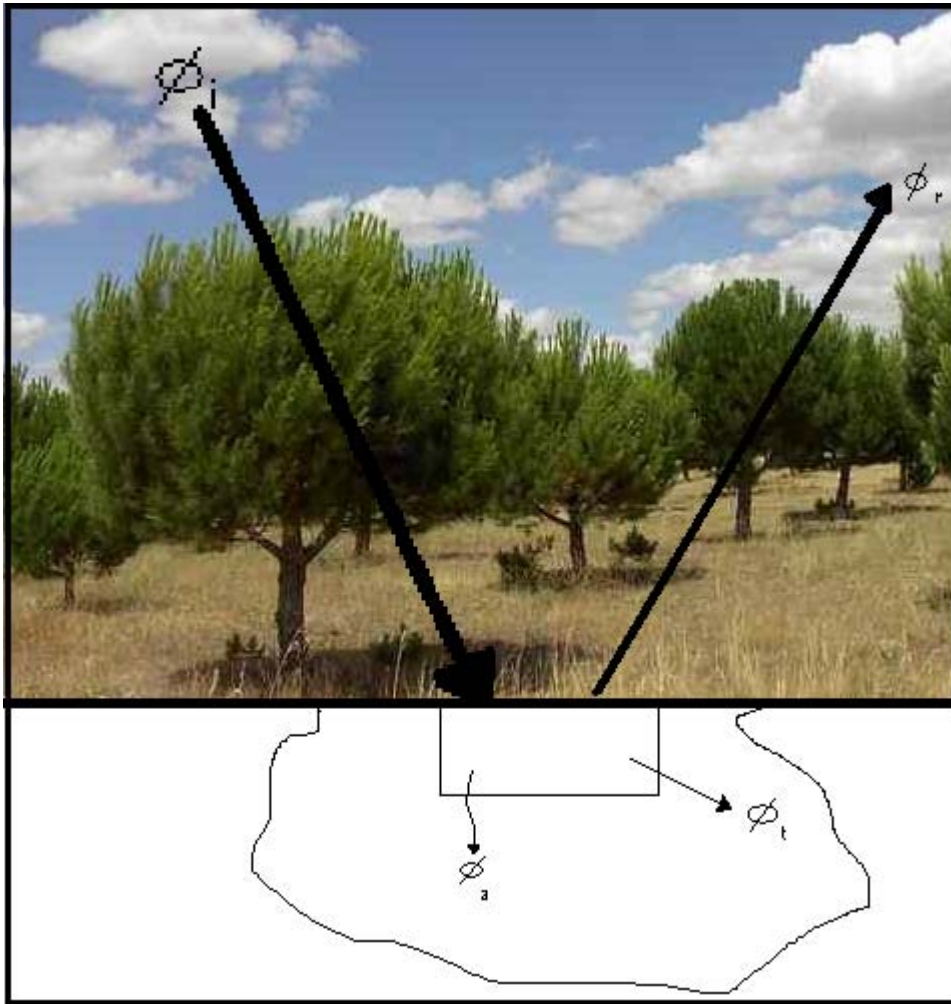


Figura 3-9 Relación entre el flujo incidente y reflejado.

ϕ_i = Energía incidente.

ϕ_r = Energía reflejada.

ϕ_t = Energía transmitida.

ϕ_a = Energía absorbida.

Se dice que en una superficie es reflejado, transmitido o absorbido el flujo incidente en ella, de esta forma se puede expresar la siguiente formula en unidades relativas, donde todos los términos son divididos entre el término ϕ_i .

$\frac{\rho_i}{\rho_i} = \frac{\rho_r}{\rho_i} + \frac{\rho_a}{\rho_i} + \frac{\rho_t}{\rho_i}$ o lo que es lo mismo expresarla de la siguiente manera:

$$1 = \rho + \alpha + T$$

En conclusión la sumatoria de la reflectividad, absorptividad y transmisividad debe ser igual a uno y las relaciones entre las tres van a depender directamente de las características que presente la superficie que se observa, por lo tanto esa proporción varía en las distintas bandas del espectro.

En el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que se denomina color: un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto (dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía incidente en esa banda), mientras será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras.

A partir de medidas de laboratorio, se han obtenido unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres, como puede observarse, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda.

Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto mas según nos situamos en longitudes de ondas mayores. Por su parte, la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible y más elevado en el infrarrojo cercano.

3.8 FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA

Los elementos principales en sistemas de teledetección son los siguientes:

- El sensor
- El objeto observado

- El flujo energético, medio de interacción entre los dos primeros.

El sensor puede ser cualquier instrumento que detecte dicho flujo energético (energía electromagnética que proviene del sol) de manera que pueda ser aprovechado para su estudio. En este caso estos sensores formaran parte de las plataformas espaciales diseñadas para la observación de la tierra (objeto).

Hay tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto, Ver figura 4-10

- Por reflexión
- Por emisión
- Por emisión-reflexión.

En la primera, el sol (principal fuente de energía de la tierra) ilumina la superficie terrestre y la energía reflejada, en función del tipo de cobertura, es captada por el sensor. Entre la superficie y el sensor se interpone la atmosfera que dispersa y absorbe parte de la señal original.

En la segunda forma, la percepción remota se basa en la energía emitida por la cobertura, siendo sus propiedades térmicas dominantes. Por último, un sensor que genere su propio flujo energético (emisión) y a la vez pueda recoger su reflexión después de haber interactuando con la superficie. (Tomado de CARRERO F. e INFANTE, Juan 2004).

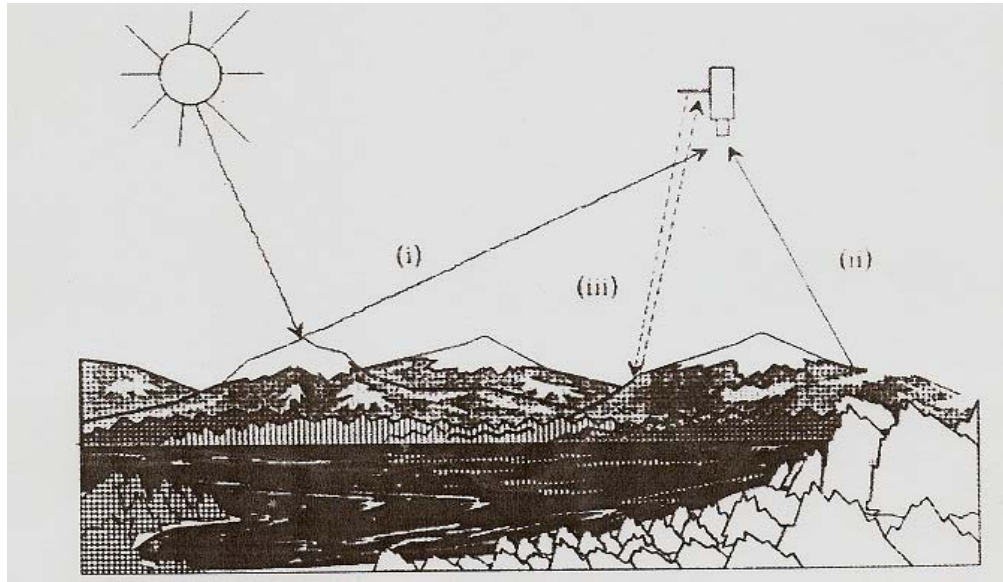


Figura 3-10 Representación de las tres formas de teledetección: (i) Por reflexión, (ii) por emisión, (iii) por emisión y reflexión (tomado y modificado de Chuvieco 1995).

CAPITULO IV

4. METODOLOGÍA

4.1 Procesamiento de imágenes digitales

En el procesamiento de imágenes digitales se requiere realizar una serie de pasos, que pueden variar de una imagen a otra. Las razones de esta variación incluyen el formato, las condiciones iniciales de la imagen, la información de interés a ser extraída, la composición de los elementos de la escena y otros.

Existen tres pasos generales en el procesamiento de imágenes digitales: pre procesamiento, despliegue y realce y extracción de información. (Adaptado de CARRERO, F. e INFANTE, J. 2004).

4.1.1 Procesamiento

Antes de ser usadas, las imágenes requieren correcciones radiométricas, las cuales tienden a remover los efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales (atmosféricos). Las correcciones geométricas también son comunes antes del análisis de la imagen. Es un proceso mediante el cual los puntos de la imagen son registrados de acuerdo con los puntos correspondientes sobre un mapa u otra imagen que ha sido rectificadas. El objetivo de la corrección geométrica es poner los elementos de la imagen en su posición planimetría apropiada (posiciones X, Y)

4.1.2 Realce de la información

Los numerosos procesos que existen para realizar una imagen han sido clasificados dentro de dos grandes categorías: operaciones puntuales y operaciones locales. Las operaciones puntuales cambian el valor de pixeles individuales, en el contexto de los valores de sus pixeles vecinos.

Los realces comunes incluyen: ajuste del contraste (lineal y no-lineal), coeficientes de bandas, filtros espaciales, transformaciones de Fourier, componentes principales y transformación de textura.

4.1.3 Extracción de información

El procesamiento de imágenes digitales se basa enteramente en los elementos primarios de tono y color del pixel de la imagen para la extracción de información.

Ha habido algún éxito probando los sistemas expertos y las redes neurales los cuales tienden a facultar al computador para que imite las formas en las cuales los humanos interpretan las imágenes.

4.2 CORRECCIONES RADIOMETRICAS

Se refiere a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética registrada por cada detector. Una variedad de agentes puede causar distorsión en los valores registrados por cada celda en la imagen. Algunas de las distorsiones más comunes para las cuales existen procedimientos de corrección son:

1. Valores elevados uniformemente: debido a la neblina atmosférica, la cual dispersa las longitudes de onda corta (particularmente las longitudes del azul)
2. Bandedamiento debido a los detectores que se encuentren sin calibración.
3. Ruido al azar: Debido al desempeño no sistemático e impredecible del sensor o de la transmisión de datos.

4.3 LOS EFECTOS DE CAMBIO EN EL TIEMPO

Para estudiar patrones de reflectancia en diferentes tiempos o a través de mosaicos de imágenes es necesario calibrar los valores de radiancia para que los niveles de reflectancia absoluta de los objetos medidos por diferentes sensores correspondan entre las imágenes separadas. Este procedimiento puede ser requerido también para normalizar los ángulos solares y las distancias tierra-sol.

4.4 CORRECCIÓN DE BANDAS

Antes de comenzar con los distintos procesos que requieren las imágenes previas a su interpretación, se realizó la corrección de las distintas bandas desde la 1ra hasta la 7ma, donde se colocaron datos obtenidos en un archivo llamado metadata, es importante señalar que cada banda tiene distintos datos de escala mínima y máxima, pero a su vez todas deben estar calibradas con la misma fecha en la que fueron tomadas las imágenes por el satélite, como muestra la figura 4-4.

Los pasos que se mostraran a continuación se realizaron para cada una de las bandas, una vez que se cargaron dichas bandas calibradas a radiancia se combinaron al azar para obtener una imagen. Ver figura 4-8.

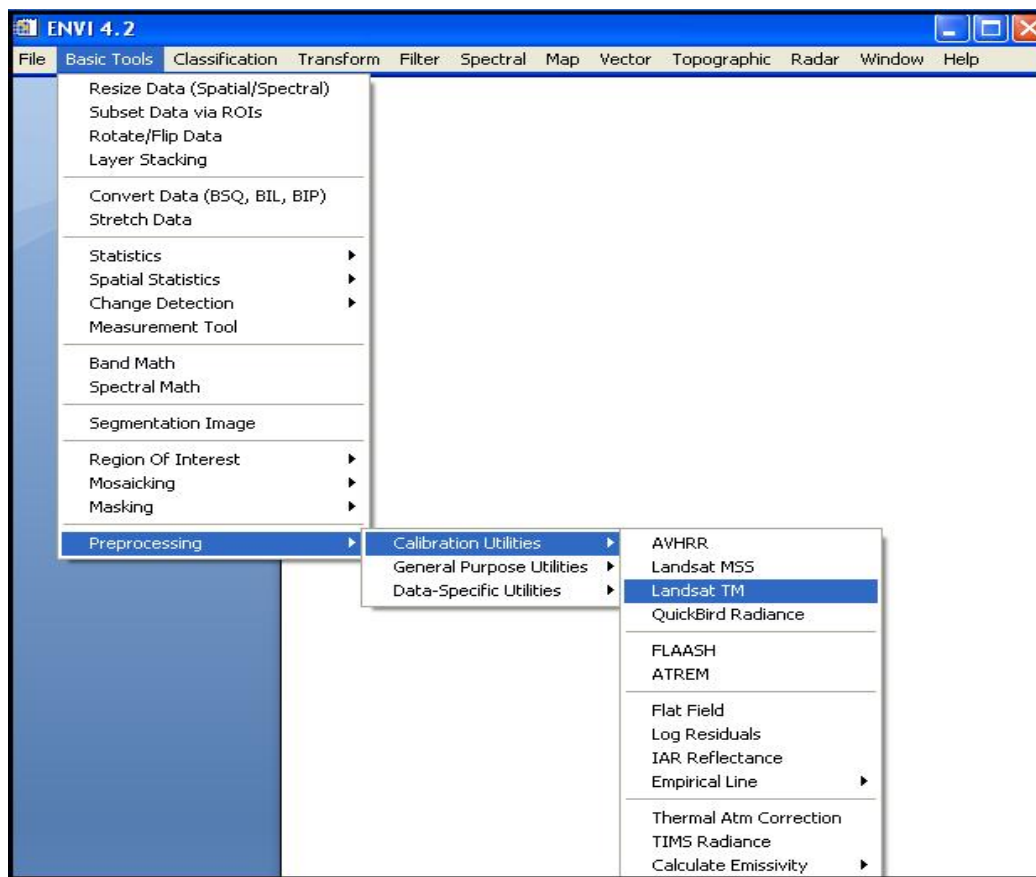


Figura 4-1 Inicio de la calibración de la imagen Landsat, con la herramienta *Landsat TM*

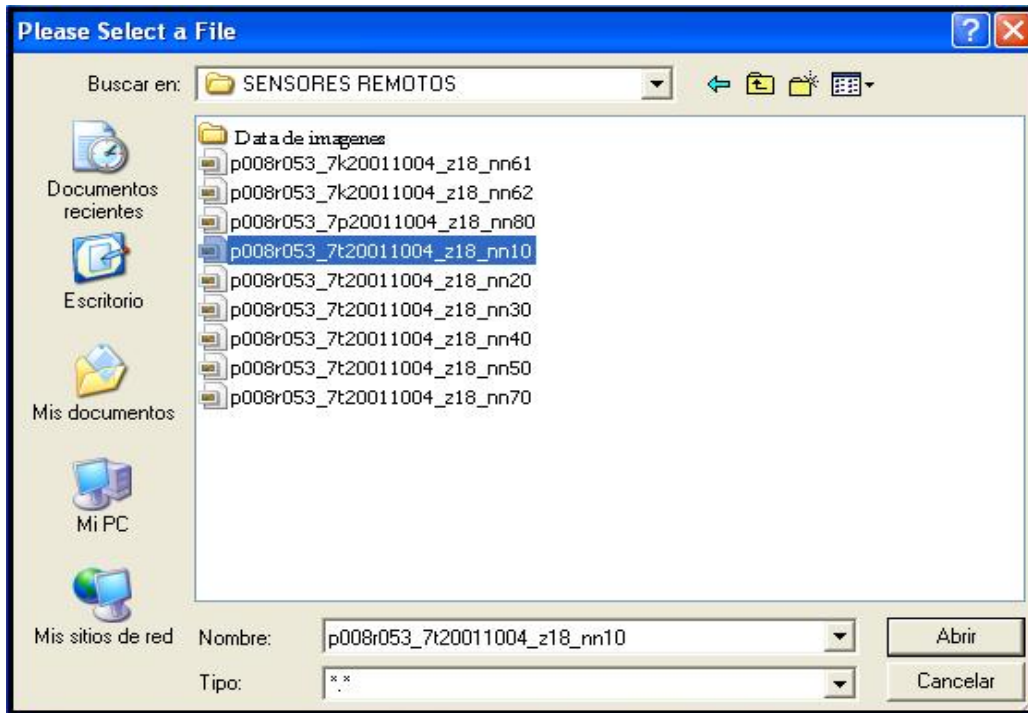


Figura 4-2 Selección individual de cada una de las 6 bandas para su posterior calibración.

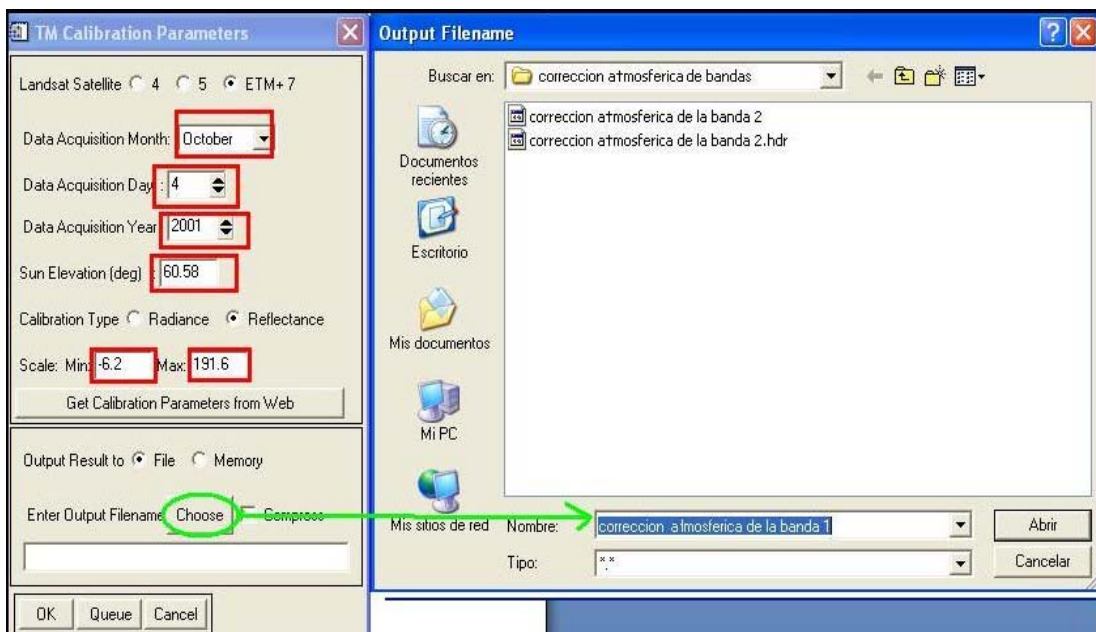


Figura 4-3 Datos obtenidos previamente en la metadata para la corrección de cada banda.

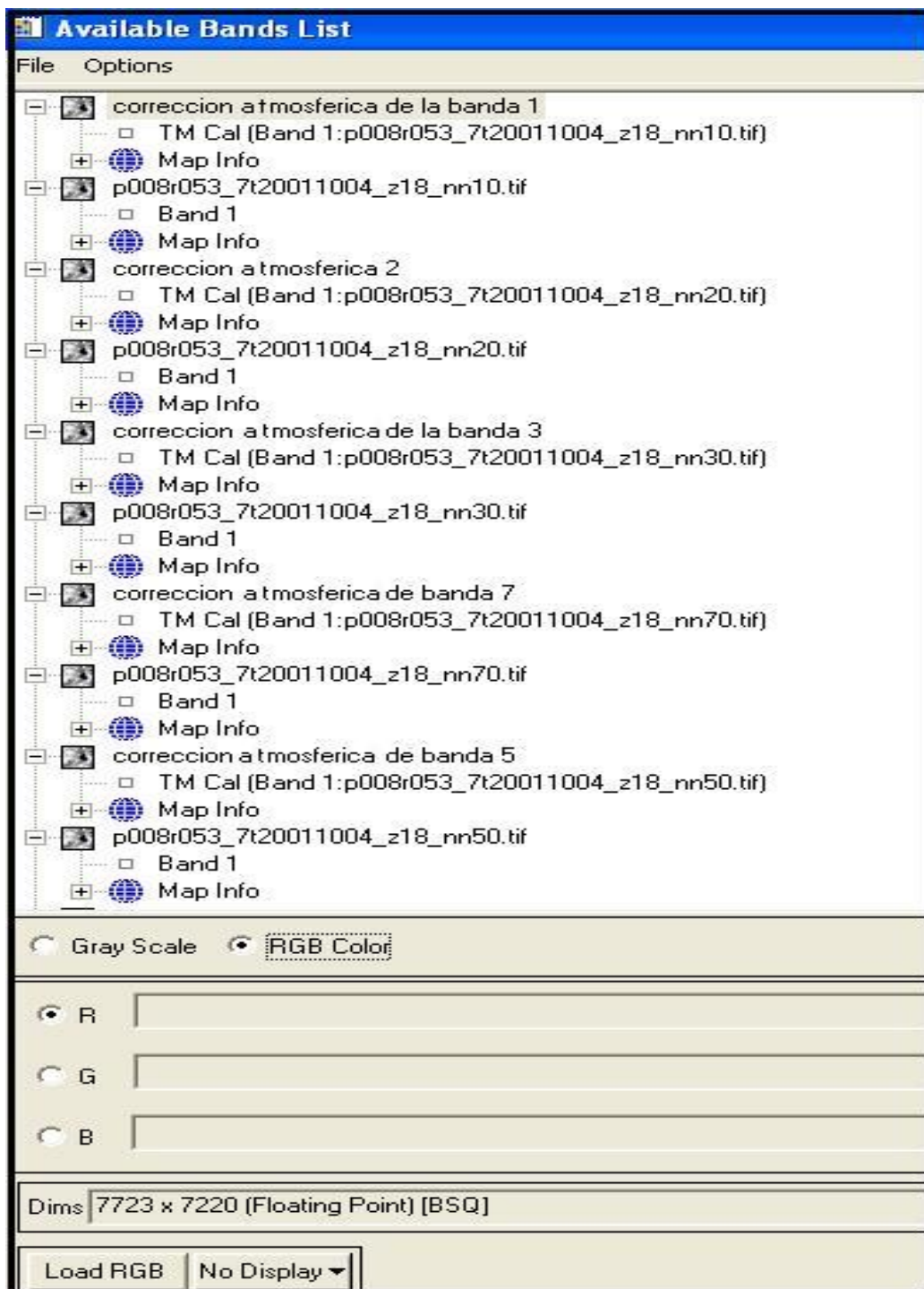


Figura 4-4 Bandas cargadas en el programa para ser procesadas por medio de las combinaciones RGB.

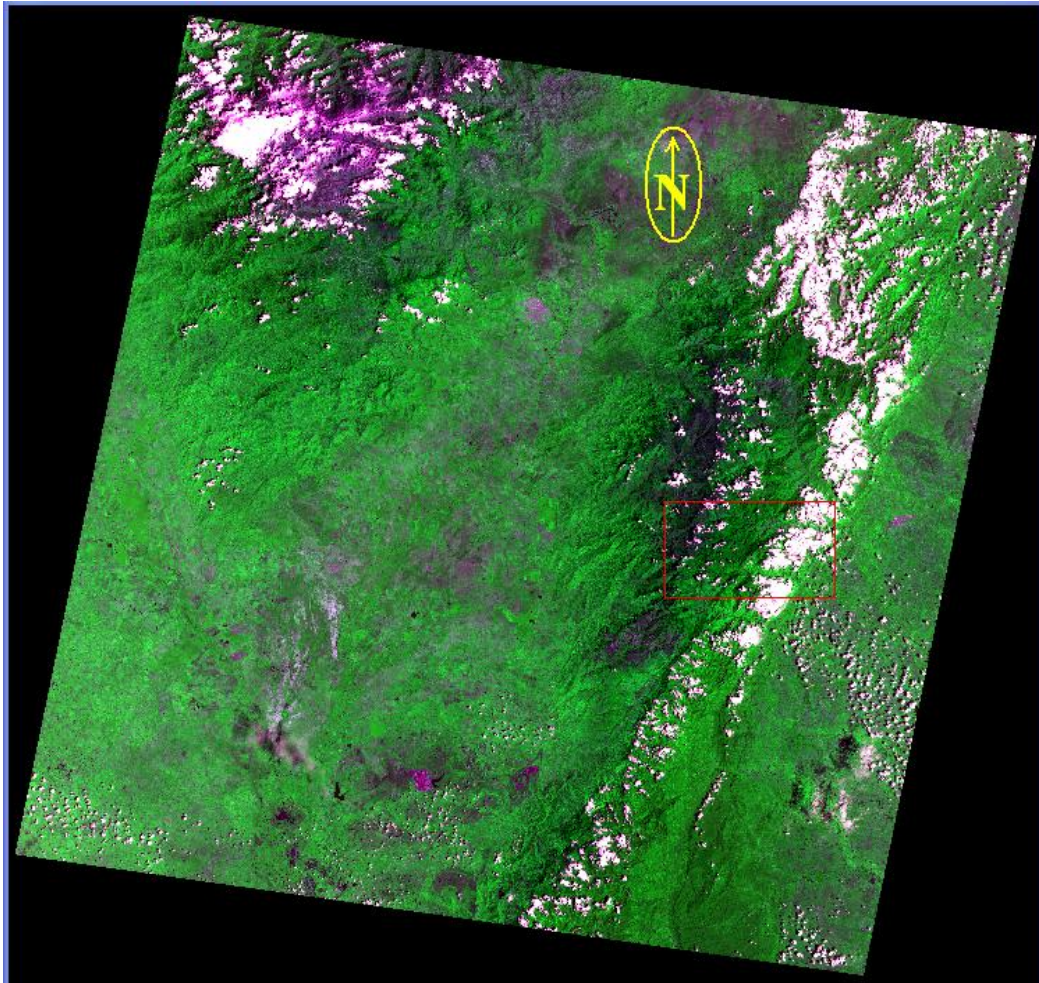


Figura 4-5 Imagen generada con la combinación 1R, 4G y 2B.

4.5 CALIBRACIÓN *LAYER STACKING*

Una vez obtenida las bandas calibradas en radiancia se procedió a apilarlas en una sola, es decir, se combinaron las distintas bandas en un solo archivo, conservando el orden creciente de las mismas. Para ello se procedió de la siguiente manera:

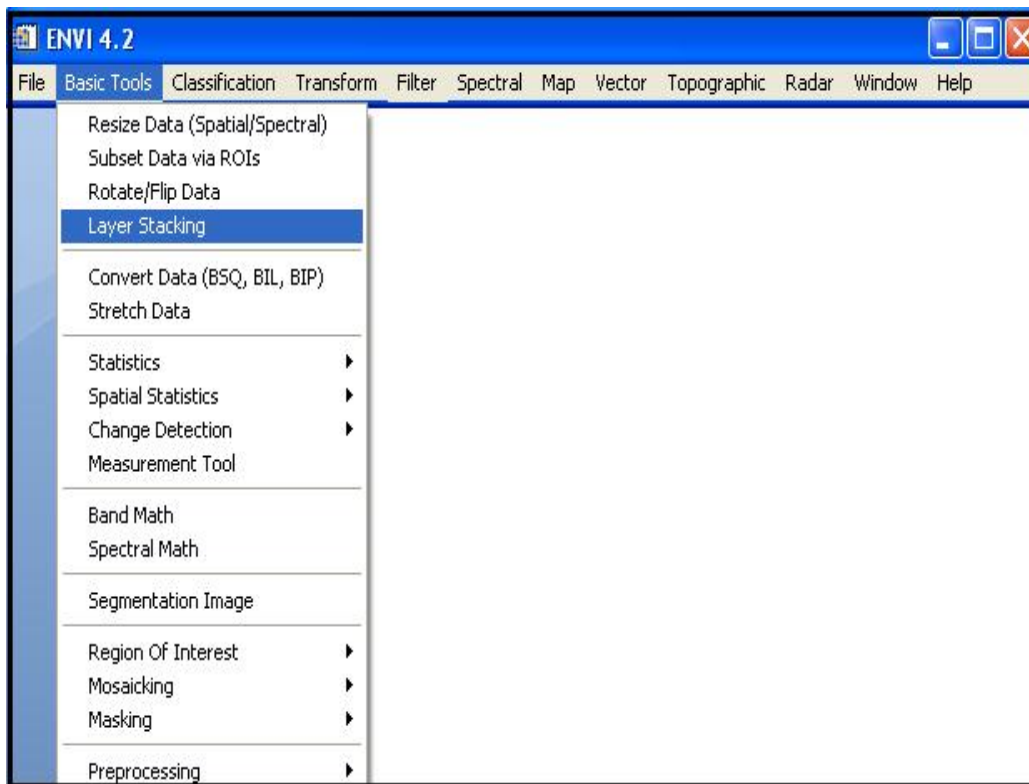


Figura 4-6 Imagen inicial en el programa ENVI 4.2 para la corrección *Layer Stacking*.

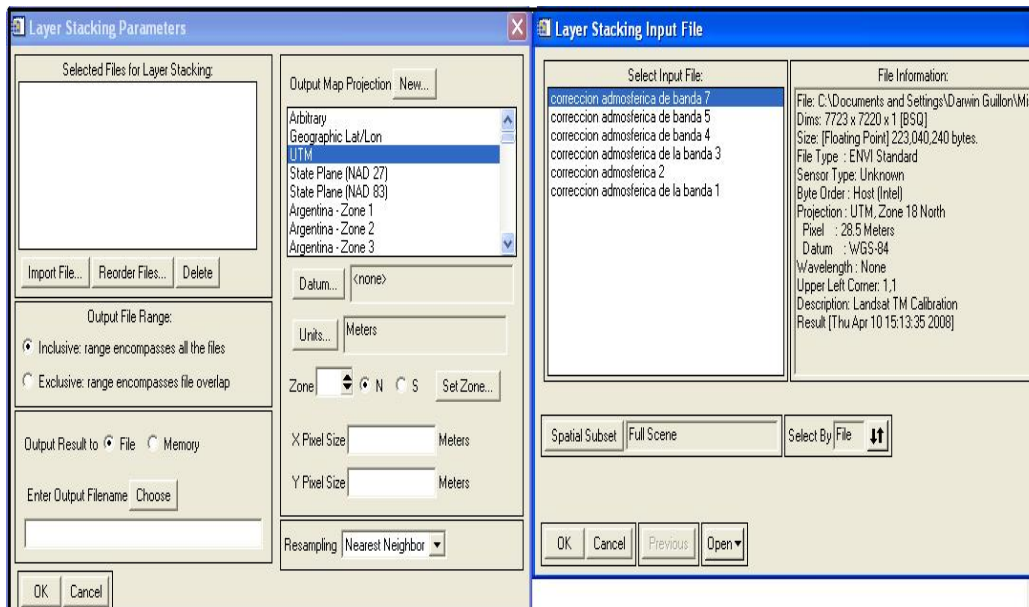


Figura 4-7 Utilizar la unidad UTM como siguiente paso para la corrección *Layer Stacking*.

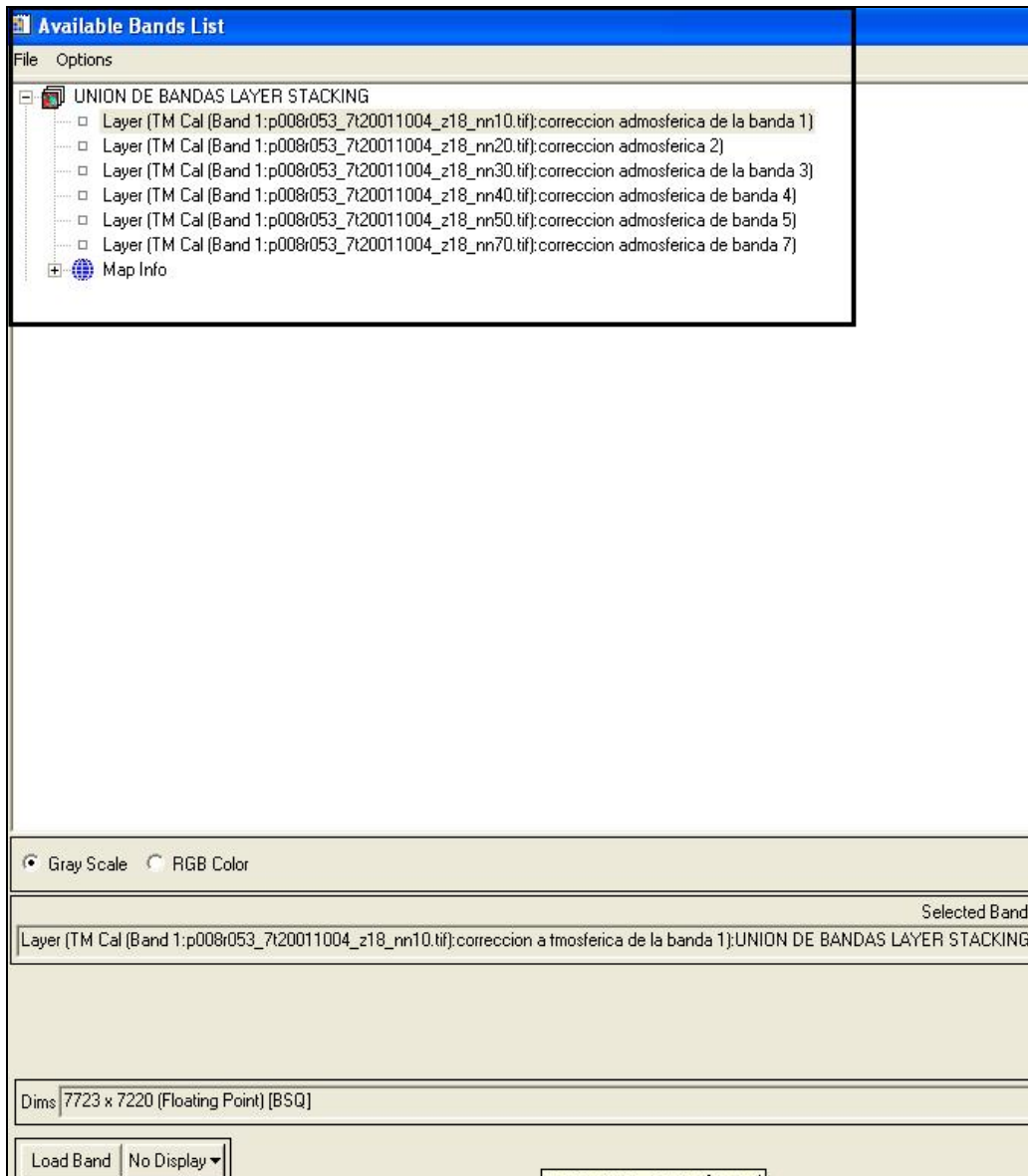


Figura 4-8 Unión de bandas de la calibración *Layer Stacking* generadas por el software.

4.6 CONVERSIÓN A FORMATO *BIL*

Una vez compiladas las bandas en Layer Stacking se transformo de formato BSQ (formato secuencial de bandas) a BIL (formatos de bandas intercalados por línea) ya que este es el formato recomendado para el procesamiento de las imágenes Landsat en el programa ENVI 4.2.

A continuación se mostraran paso a paso como se deben hacer los cambios en el programa ENVI desde el comando *Convert Data*.

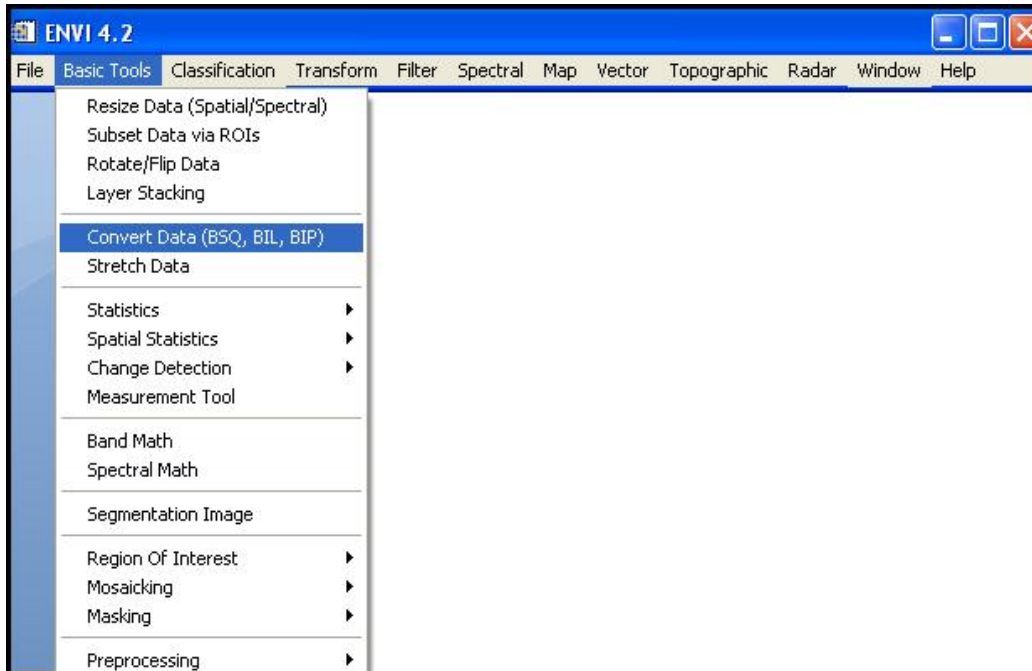


Figura 4-9 Paso inicial para la transformación de formato BSQ a BIL.

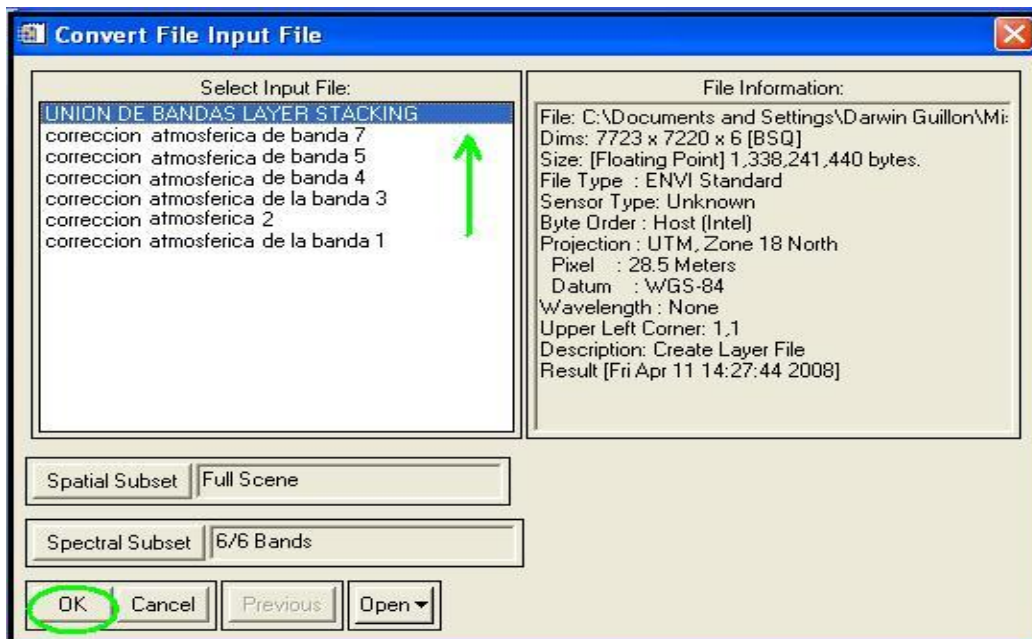


Figura 4-10 Selección de la unión de bandas *Layer Stacking* para su posterior procesamiento.

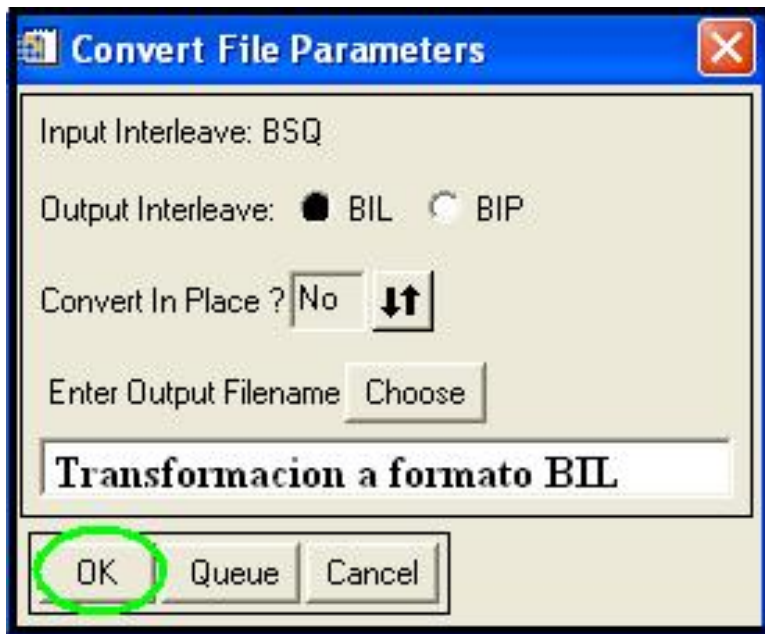


Figura 4-11 Ventana de parámetro de conversión de formato de BSQ a BIL el cual es el utilizado por el programa ENVI para procesar las imágenes.

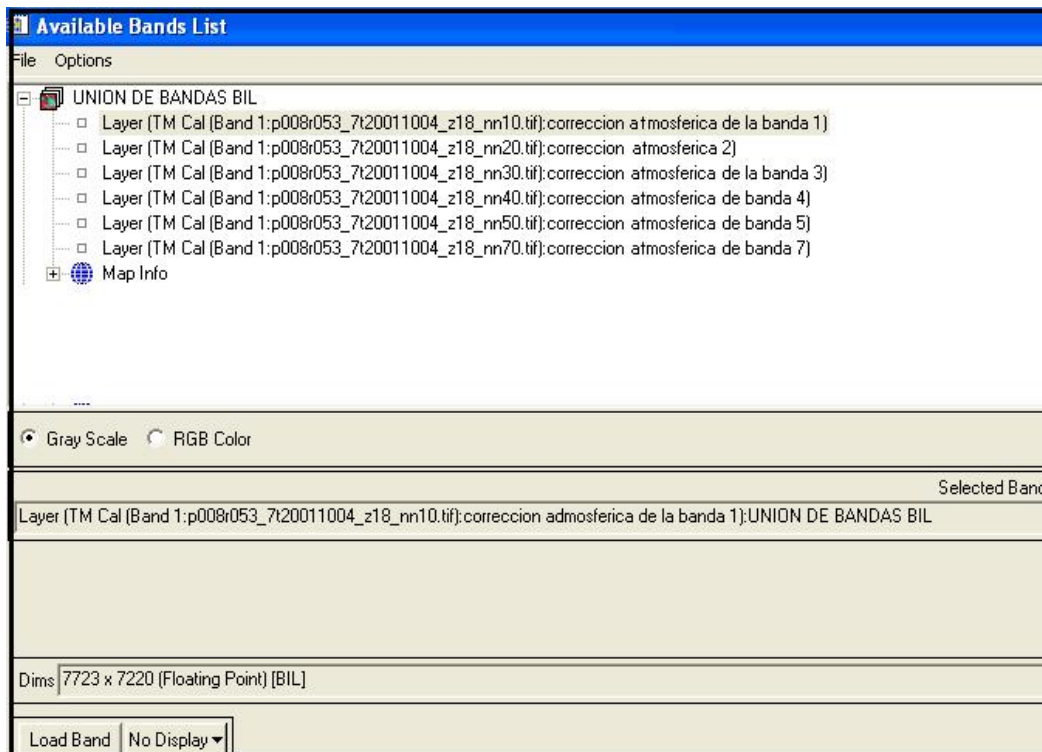


Figura 4-12 Lista de banda donde se muestran cargadas las transformaciones a formato BIL.

4.7 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA EN FLAASH

Es importante señalar que la atmosfera juega un papel importante al momento de la percepción remota ya que esta produce un efecto de absorción y dispersión, la cual modifica la señal que emite la superficie terrestre.

El programa ENVI posee un programa de corrección atmosférica llamado FLAAH (Fast Line-of-sight Atmospheric Análisis of Spectral Hypercubes), para hacer dicha corrección se deben aplicar los siguientes pasos.

- Abrir la ventana de **Basic tool** → **processing** → **Calibration utilities** → **FLAASH**.
- En la casilla de Input Radiance Image (**seleccionar unión 1-7 radiance BIL**).
- Abrir el block de notas y presionar **OK**.
- Posteriormente abrir el archivo tipo **MET** y obtener de este toda la meta data donde se incluyen la fecha y hora del momento en que fue tomada la imagen.
- Cambiar las unidades de las coordenadas en la casilla **DD<->DMS**.
- Copiar las coordenadas tanto de longitud como de latitud en sus casillas correspondientes.
- Seleccionar en Sensor **Type** → **Multispectral** → **Landsat TM7**
- Colocar los datos de **Ground Elevation** (Km) y **Pixel size** (m) correspondientes obtenidos de la metadata.

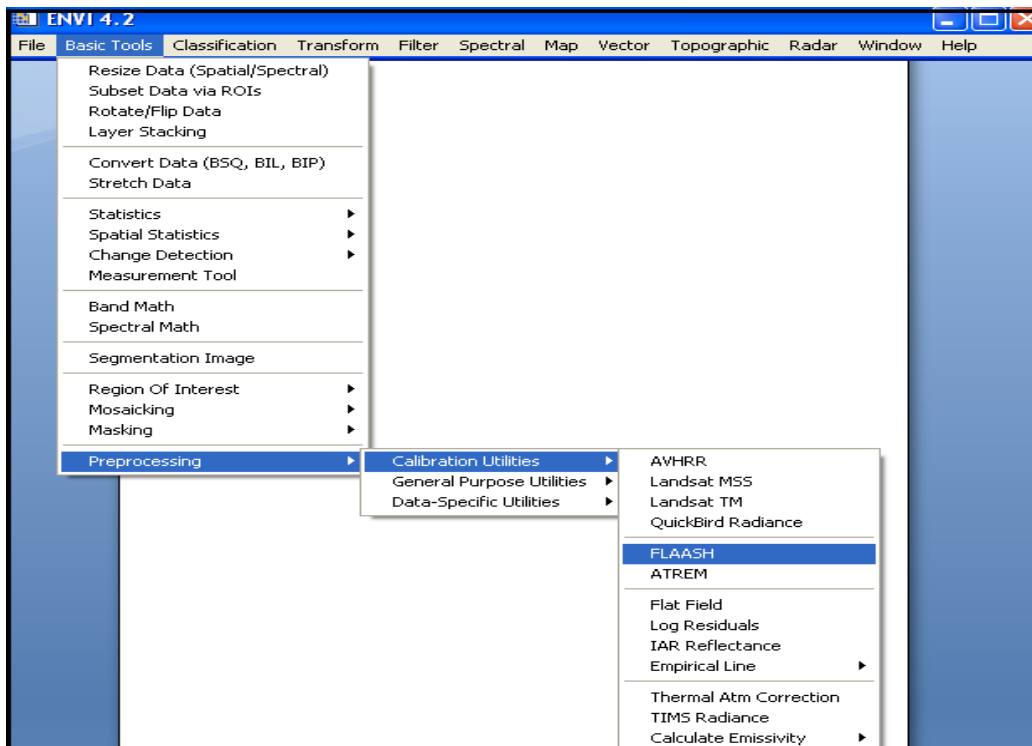


Figura 4-13 La imagen muestra la herramienta que se debe utilizar para la corrección atmosférica en *Flash* en el programa ENVI.

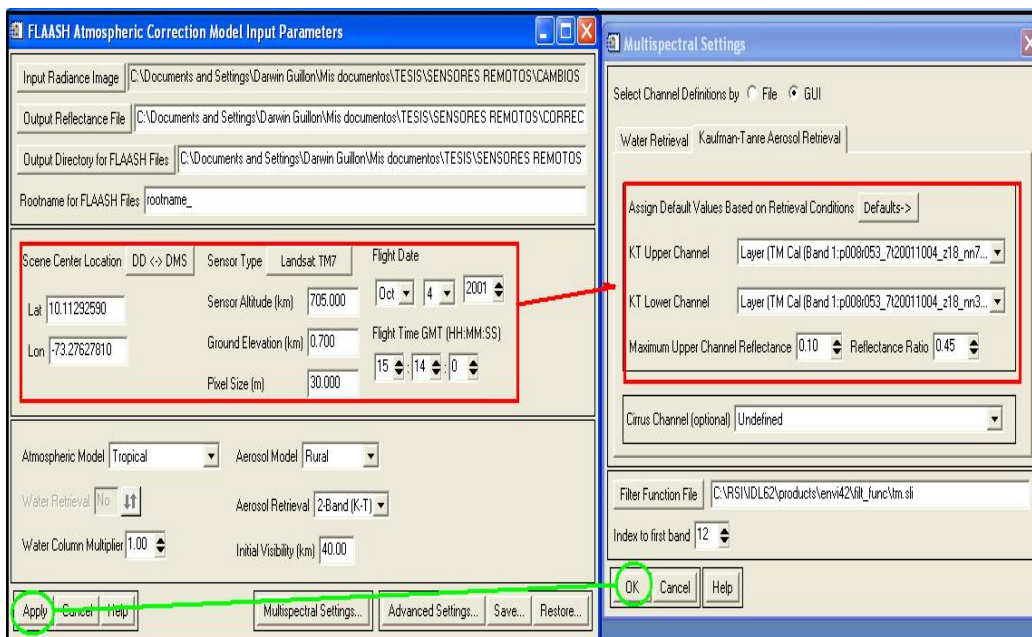


Figura 4-14 Los cuadros rojos muestran los datos y valores que se aplicaron obtenidos previamente en la metadata que fueron descargadas junto a las imágenes.

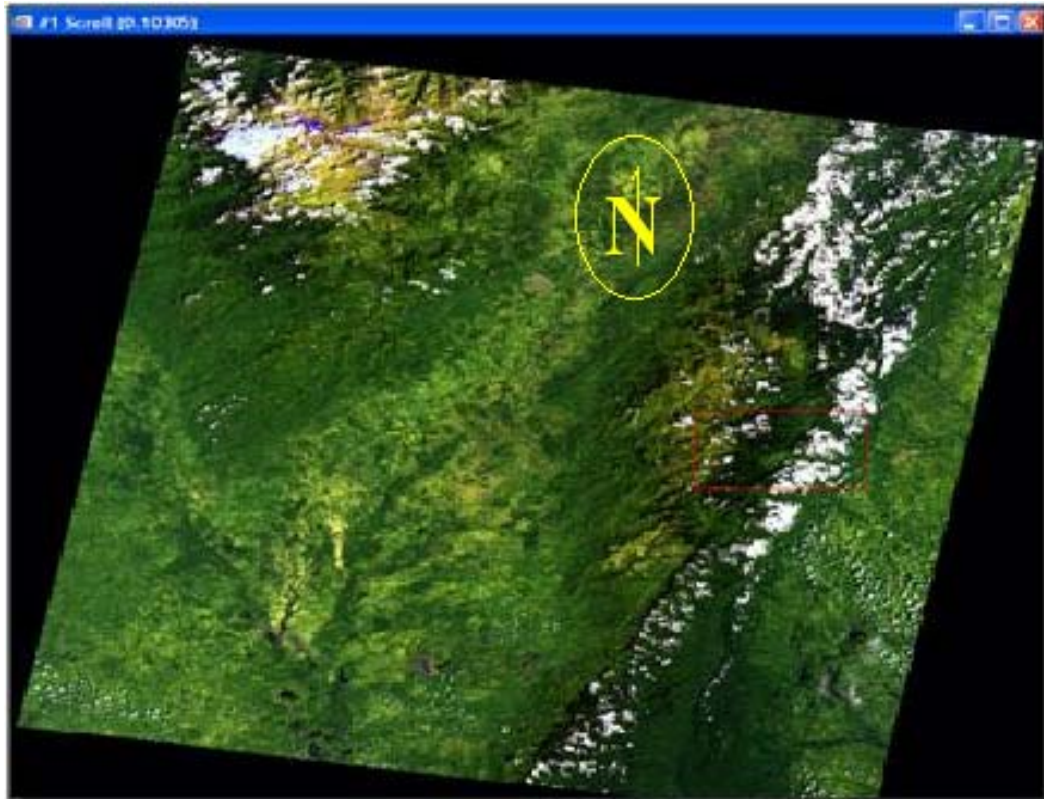


Figura 4-15 Imagen generada por la combinación de los cañones 6R 2G y 1B de la imagen con la corrección atmosférica previamente realizada.

4.8 EXTRACCIÓN DE PÍXELES DE LAS NUBES.

Como era necesario generar una imagen pura, se extrajeron los píxeles que guardaban relación directa con las nubes y sus sombras, para ello se procedió a la construcción de un archivo de tipo *Shapefile* creado en el programa ARCGIS el cual fue transformado a dato ROI. A continuación se mostraran los pasos para dicha construcción de máscara.

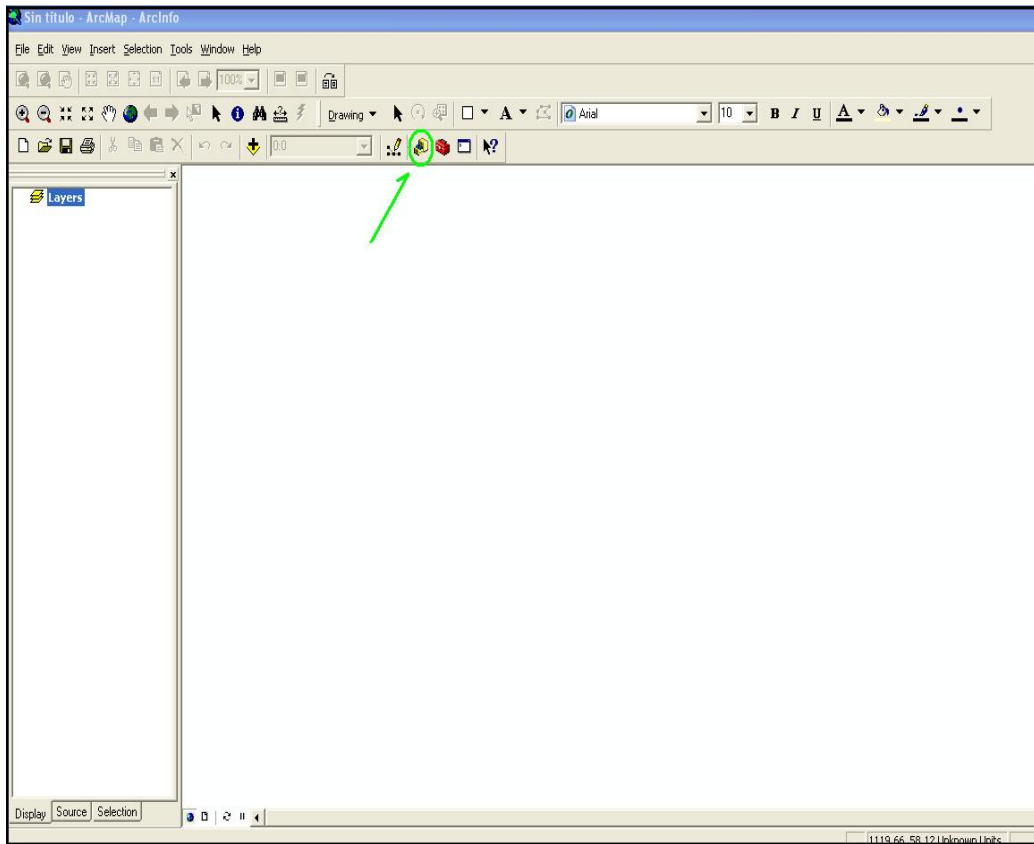


Figura 4-16 Ventana de inicio del software (ArcGis) donde se genera el *Shapefile* que permite la extracción de los píxeles de las nubes.

Para generar un *shapefile* que permita extraer los píxeles de las nubes de las imágenes es necesario tener dichas imágenes abiertas en el programa previamente, (ver figura 4-17).

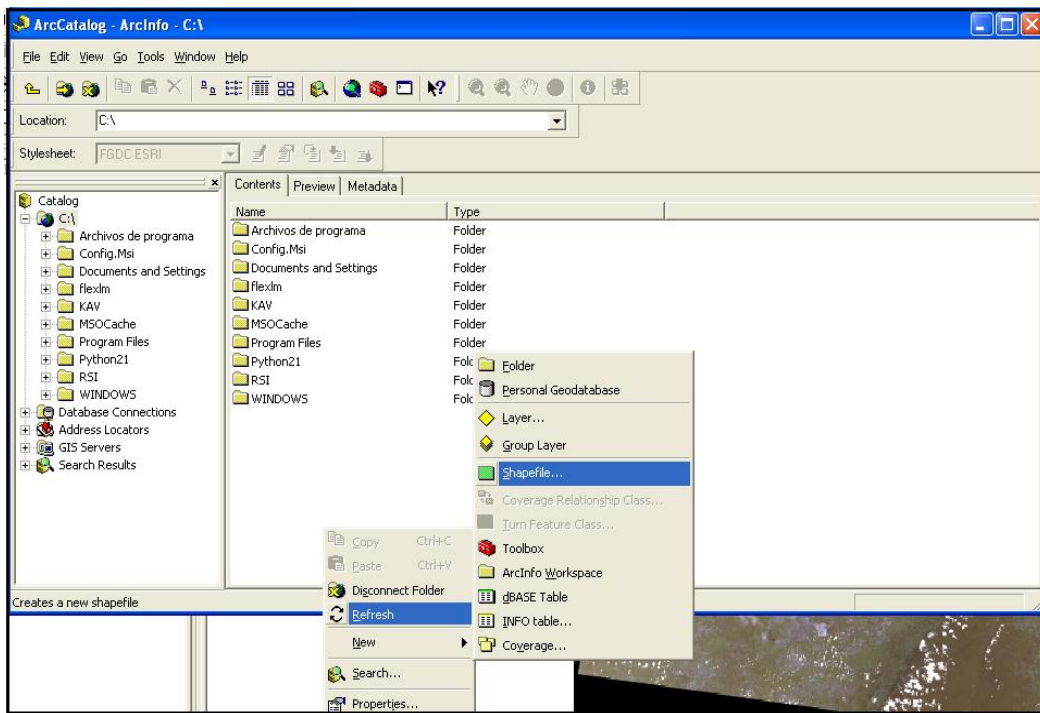


Figura 4-17 La imagen muestra la herramienta que se debe utilizar (*ArcCatalog*) para generar el Shapefile y de esta manera aplicar la máscara de las nubes.

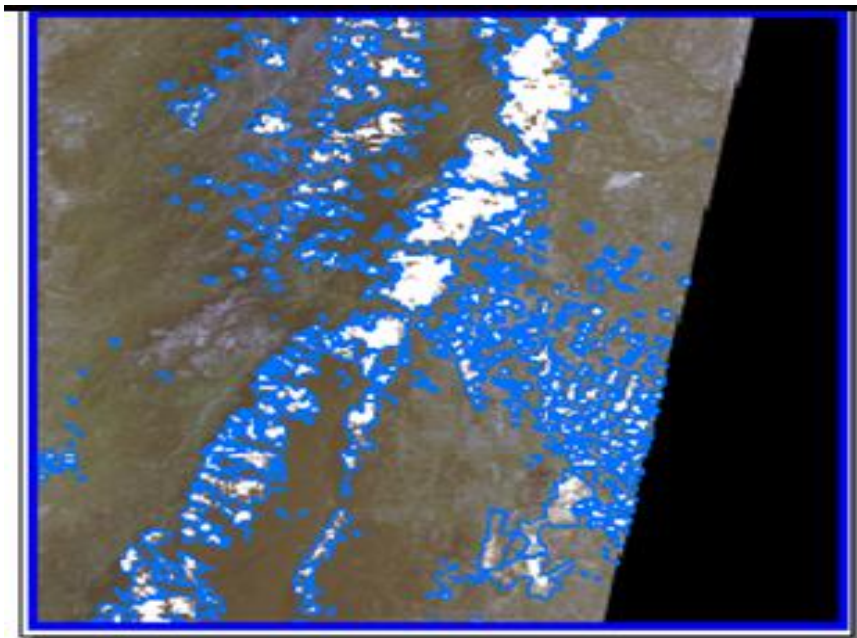


Figura 4-18 El color azul muestra los poligonos realizados para encerrar tanto las nubes como las sombras que estas generan.

4.8.1 TRANSFORMACIÓN DE DATO *EVF* A *ROI*

Una vez creado el archivo *shapefile* en ArcGis se abrió el programa ENVI para el cambio de dato *EVF* a *ROI* de la siguiente manera:

En la ventana de inicio del programa ENVI se presiona **File** → **Open Vector File**, se selecciona el archivo generado por el paso anterior de la construcción de la máscara de nubes y al presionar **Ok** se despliega la ventana de *Import Vector File Parameters*, (Ver figura 4-19).

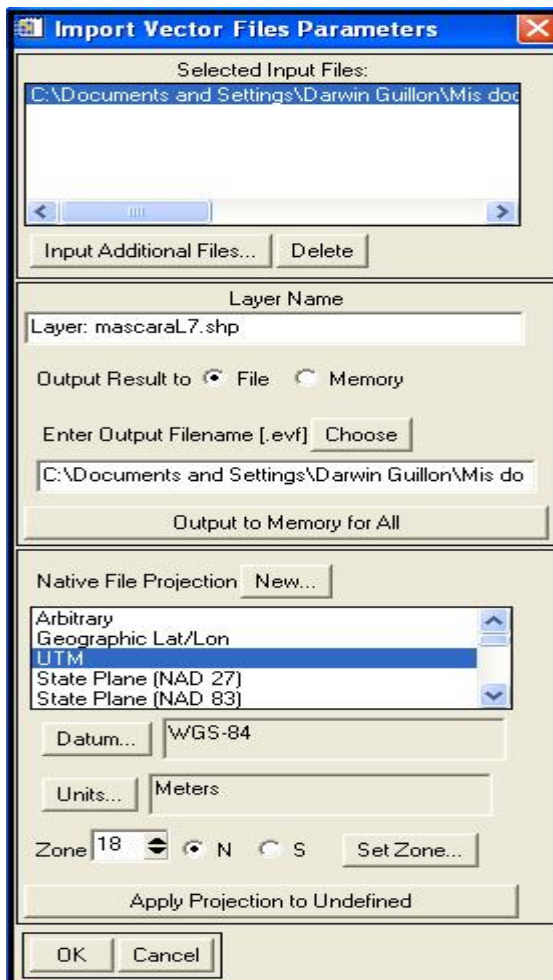


Figura 4-19 Ventana que permite importar el archivo del shapefile georeferenciado para procesar la imagen bajo ese parámetro de transformación (ROI).

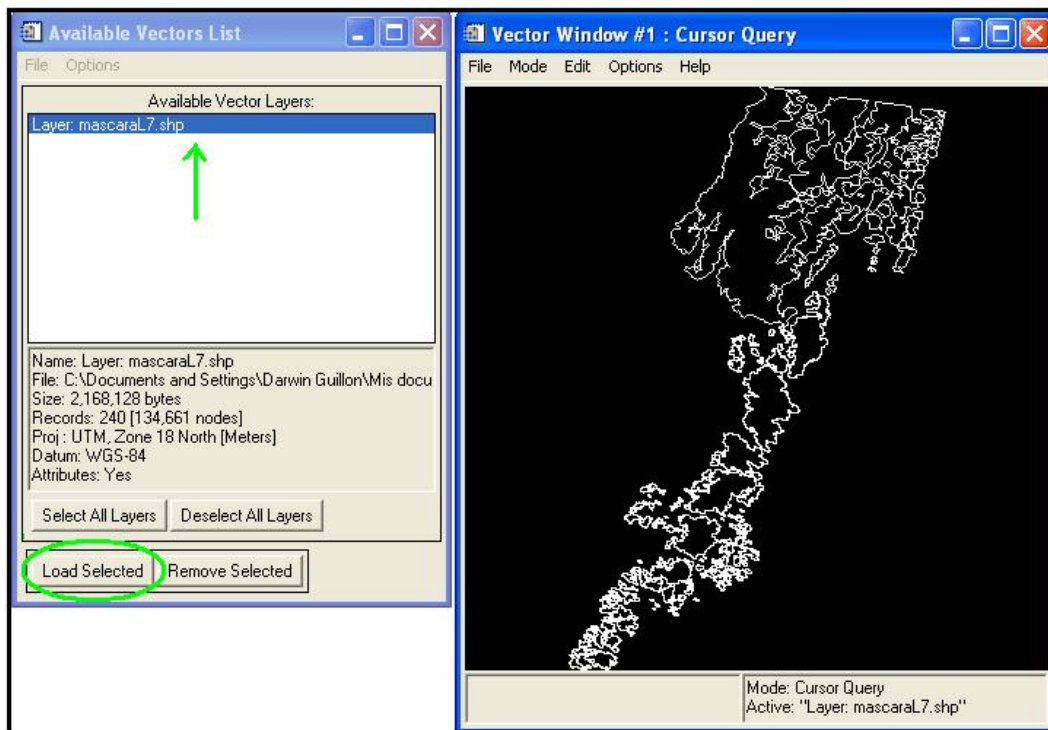


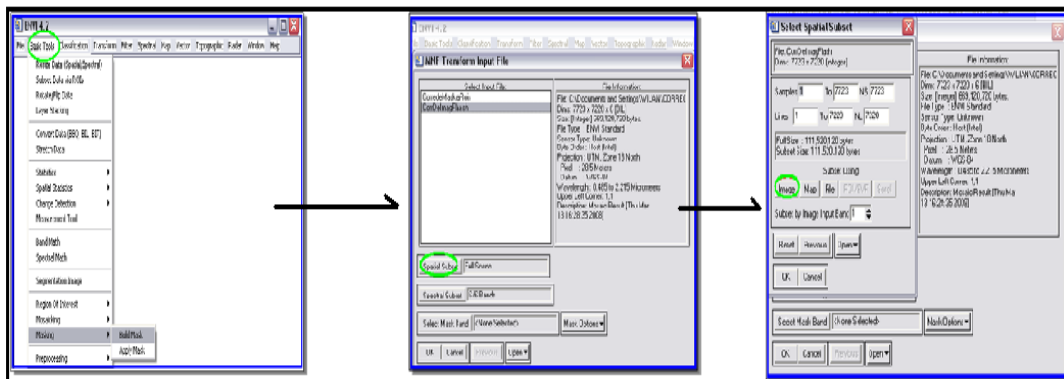
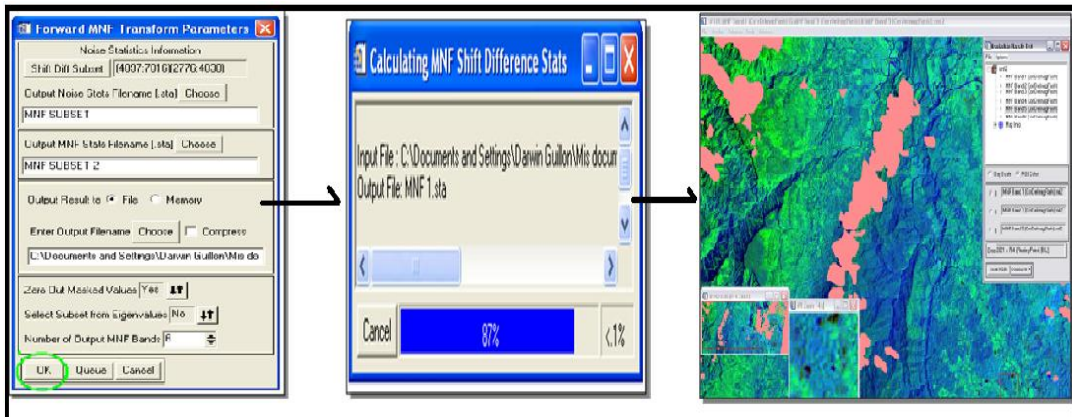
Figura 4-20 Máscara de nubes construida, mostrada en el cuadro derecho en color blanco.

Como siguiente paso se exportó el archivo creado ROI en la herramienta, **File → “Export Active Layer to ROI”**

4.9 CONSTRUCCIÓN DE MÁSCARA DE NUBES

Una vez seleccionada esta herramienta se hizo un *spatial subset*, que no es más que la delimitación de la zona de estudio ya que los pasos posteriores requieren de mayor capacidad de memoria ram de la PC para poder procesar toda la imagen LandSat.

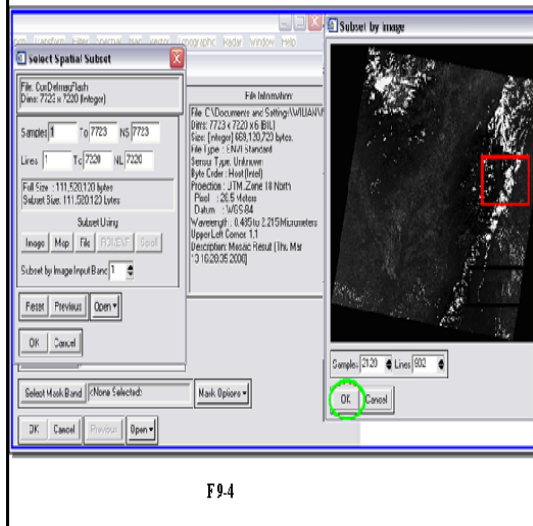
El subset se realizó en la imagen a la cual se le realizó en pasos anteriores la corrección atmosférica en Flaash. A continuación se muestra los pasos de dicha operación.



F9-1

F9-2

F9-3



F9-4

Figura 4-21 Pasos para la construcción de máscara de nubes a la zona de estudio delimitando.

4.10 TRANSFORMACIÓN DE LA FRACCIÓN MÍNIMA DE RUIDO (MNF)

Para realizar la Transformación de la Fracción Mínima de Ruido (MNF), inicialmente se selecciona en el menú principal del programa ENVI 4.2 “Spectral” “MNF Rotación”, “Forward MNF” “Estimate Noise Statistics From Data”, en este momento se activa una ventana llamada “MNF Transform Input File”, se seleccionó el archivo antes realizado del “subset de la imagen”, “Corrección de la máscara en ROI” y se presiona OK. Se desplegó otra ventana llamada “Forward MNF Transform Parameters” en la cual se guardan los tres archivos respectivo se presiona OK, donde finalmente se generó el resultado del MNF

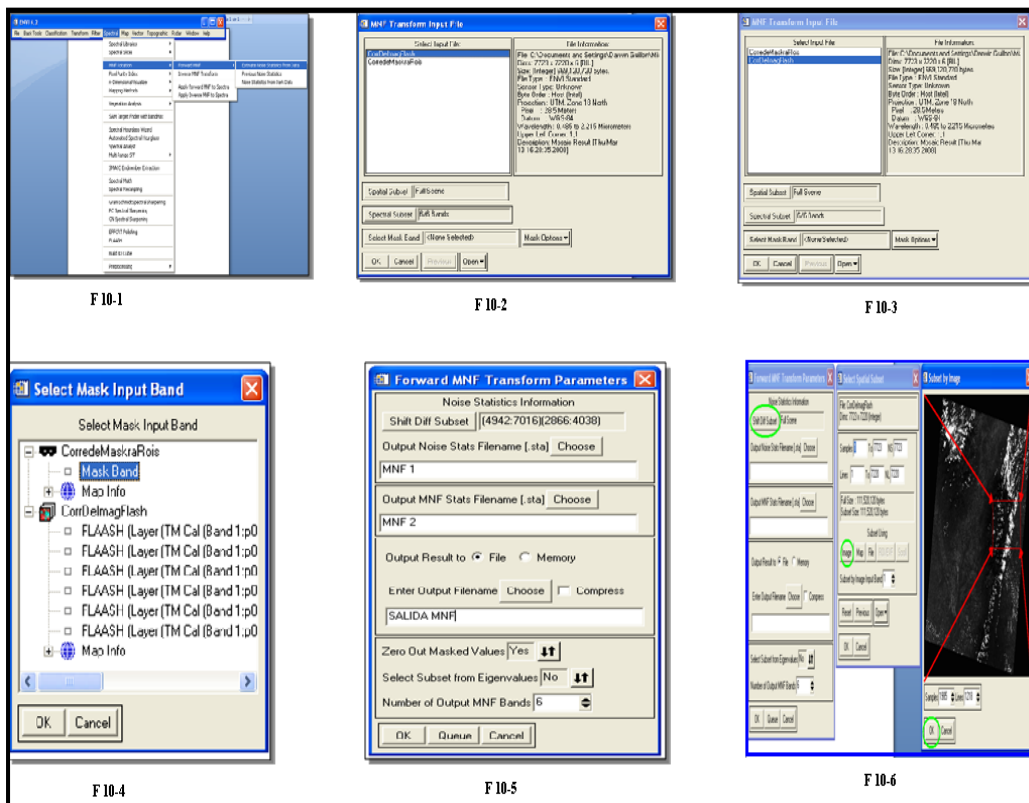


Figura 4-22 1er paso para la corrección de la Fracción Mínima de Ruido a la zona de estudio.

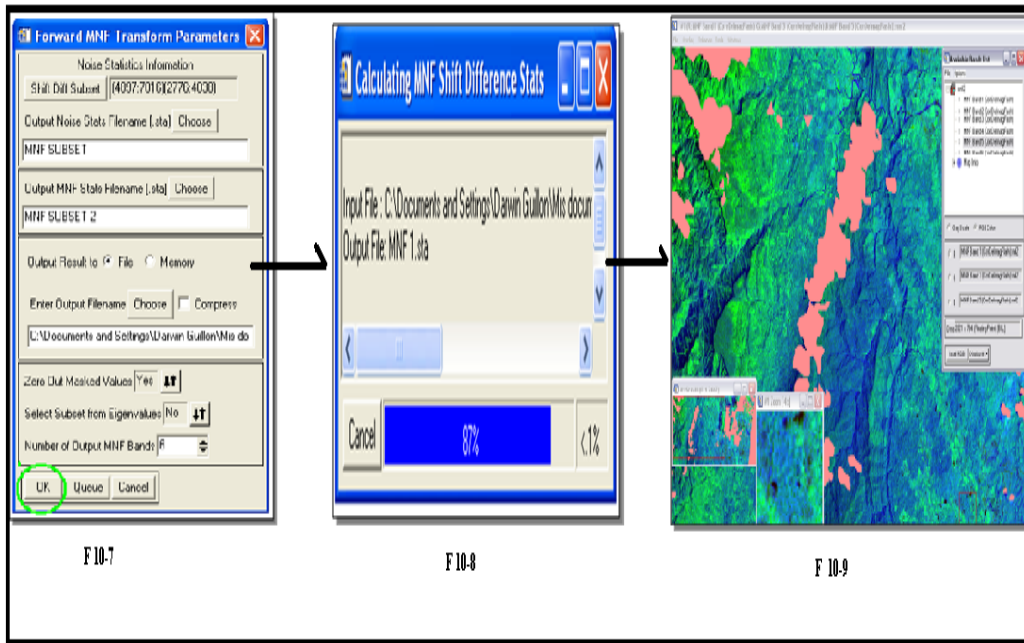


Figura 4-22 2do paso para la corrección de la Fracción Mínima de Ruido a la zona de estudio.

4.11 CORRECCION DEL ÍNDICE DE IMPUREZA DEL PÍXEL (PPI)

A continuación se muestra en la figura 4-23 paso a paso la corrección del índice de impureza del Pixel

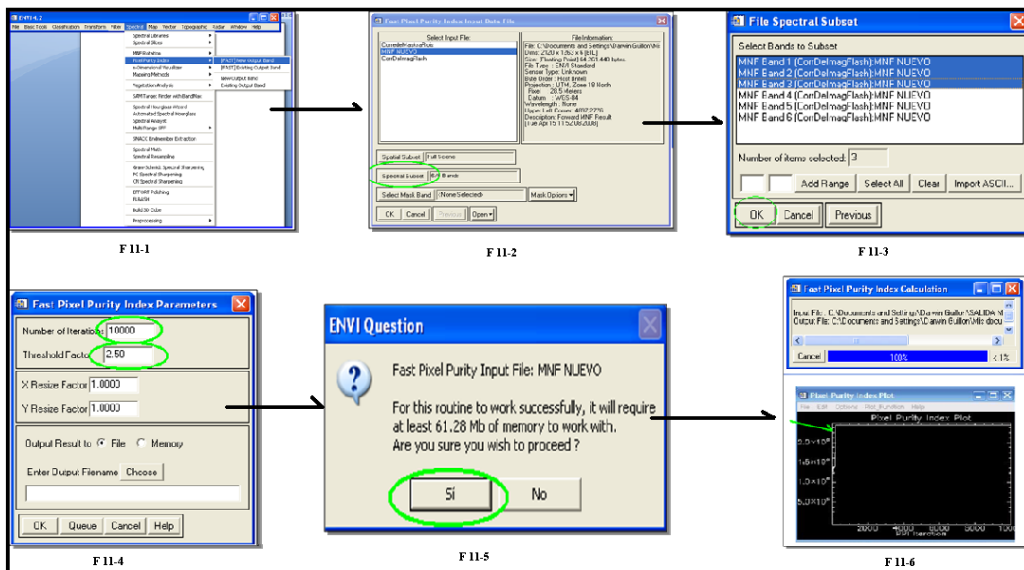


Figura 4-23 Esquema para construcción del índice de impureza de los Píxeles de la imagen.

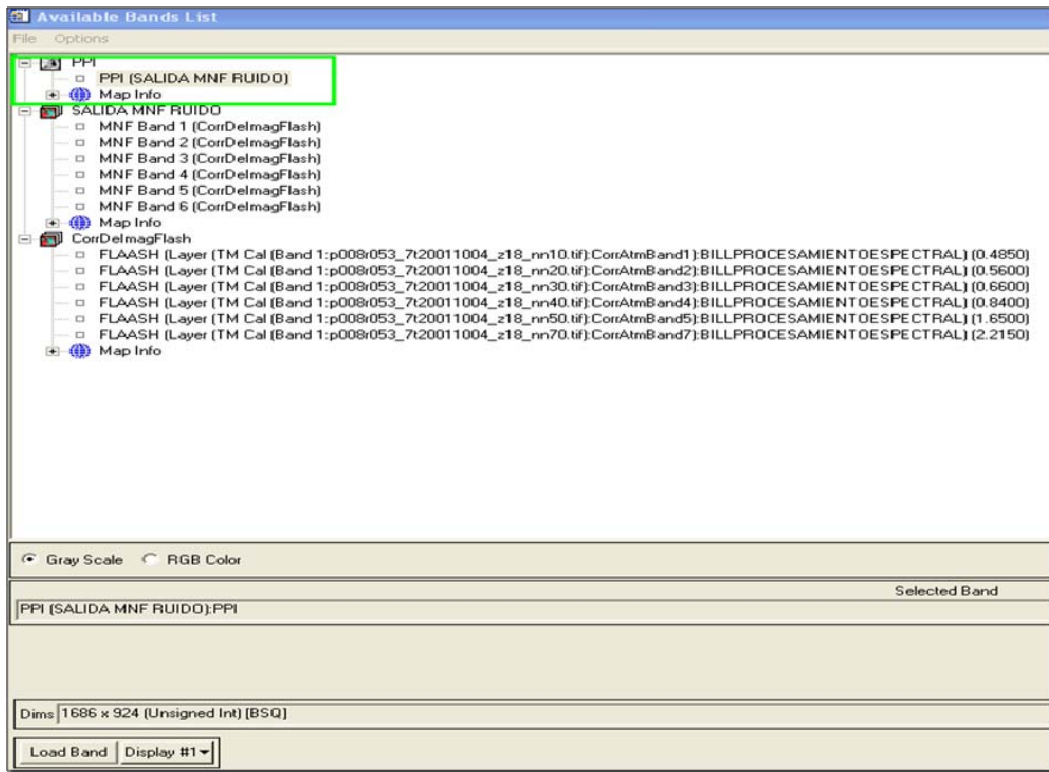


Figura 4-24 Ventana de listas de bandas, donde se muestra la corrección PPI.

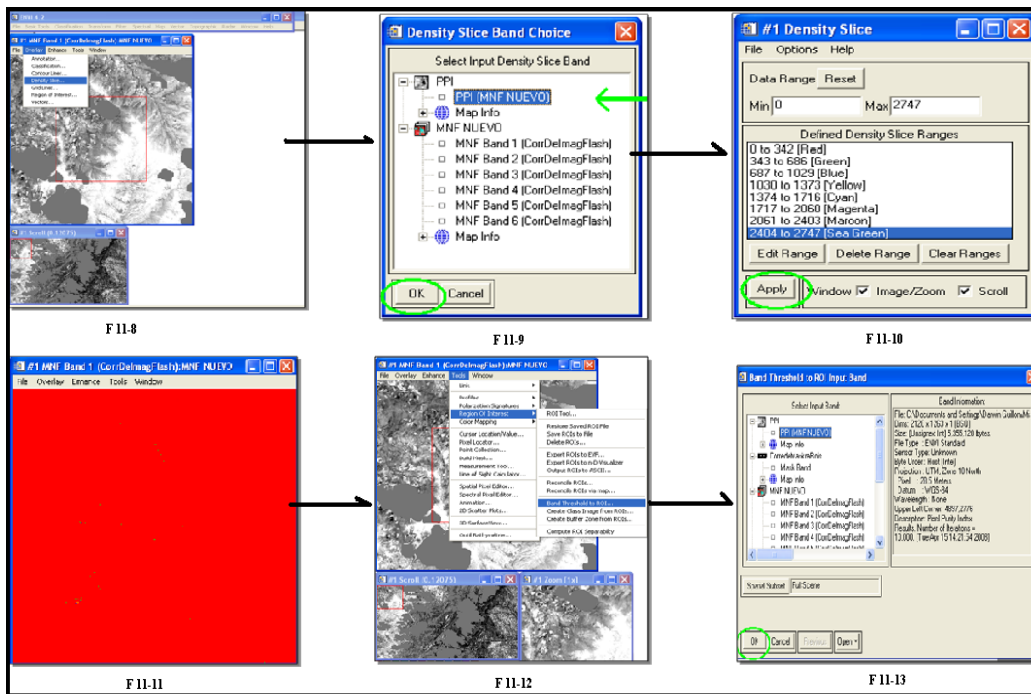


Figura 4-25 Transformación del PPI del área de interés a ROI.

Una vez obtenida la Corrección del PPI, se seleccionó haciendo clic en “*Load Band*”, posteriormente se desplegó el PPI Transformado, se hizo clic en *Overlay, Density Slice*, y luego en *OK*. Esta ventana muestra unos valores de rango de la cantidad de píxeles existentes, con la ventana de valores desplegada, volvemos al PPI.

Luego se procedió de la siguiente manera: Se despliega *Tools → Region Of Interest → Band Threshold To ROI*, con la ventana anteriormente abierta se vuelve a seleccionar el PPI Transformado y se abre una ventana en la cual hay que seleccionar de una manera aleatoria, en las casillas correspondientes a *Min y Max Thresh Value* (ver Figura 11-14). Aquellos píxeles extremos que estén cercanos a los **10.000** en este caso se obtuvo una gran precisión, con un resultado de **9.939**. Para el caso de que se pase de 10.000 se debe seguir combinando al azar aquellos números que den mayor precisión pero sin pasar de este rango.

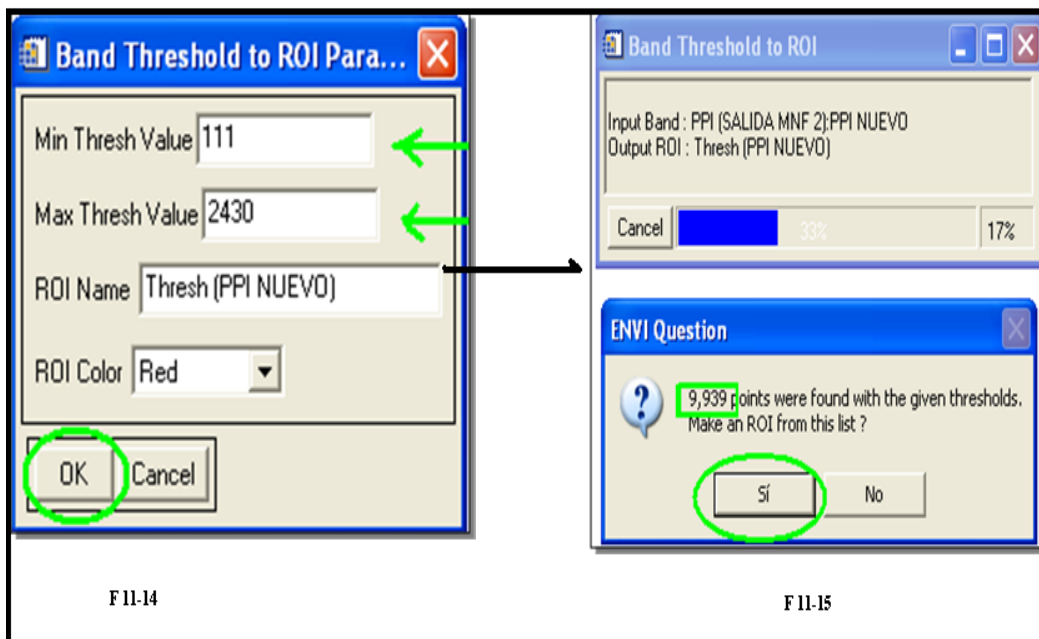


Figura 4-26 Ventana de selección de los valores mínimos y máximos de los píxeles de la imagen.

Al presionar SI, se desplegó una ventana llamada **#1 ROI Tool** → **File** → **Save ROI**, se guardó en la carpeta seleccionada. Luego de guardado se abrió File y se exportó al próximo procedimiento al “**Export ROI To n- D Visualize**”

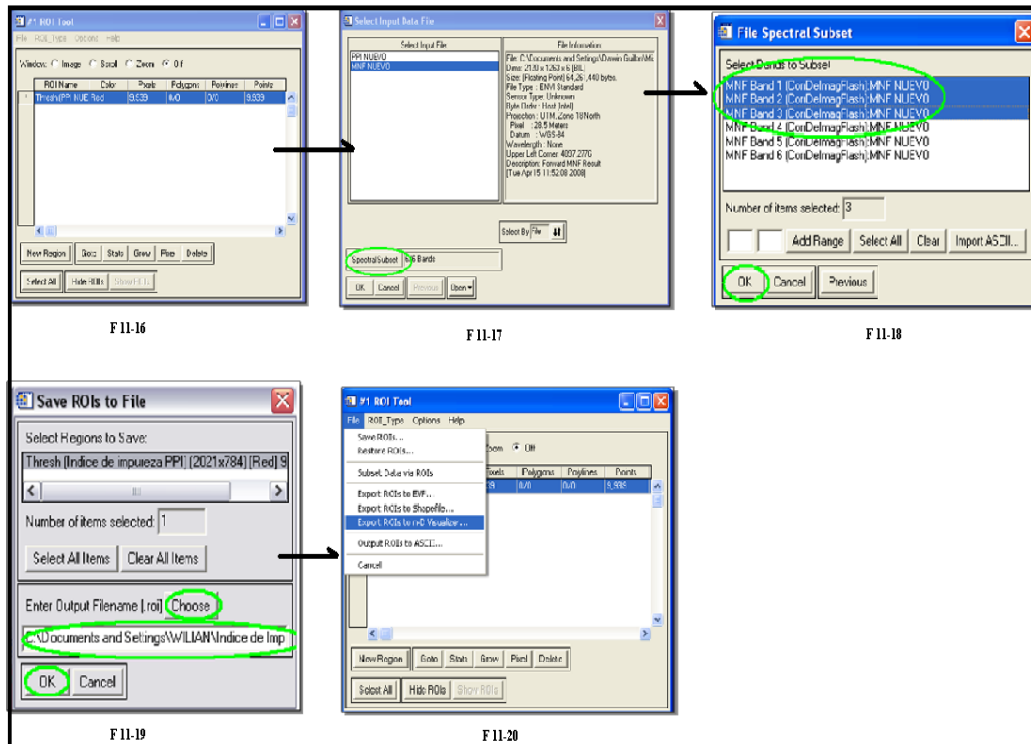


Figura 4-27 Selección de las 3 bandas para su posterior búsqueda de puntos extremos.

Para realizar la corrección en la **n-D Visualizador** se procedió de la siguiente manera: se exportaron los pixeles del paso anterior, haciendo clic en la ventana **n-D Control** → **File** → **Save State**. Luego **Options** → “**Show Axes**”, una vez seleccionado esto, se pudieron visualizar los ejes en 3D, posteriormente se abre **File** → **Save State**, se Luego de guardado y teniendo las ventanas **N- D Visualizador** y **n-D Control** con las tres coordenadas abiertas y los pixeles de la imagen, se seleccionaron los extremos con distintos colores denominadas clases (ver Figura 11-27), una vez obtenidas estas se hizo clic en **File** de la ventana **n- D Control** → **Save State**, para mostrar el numero de clases seleccionados, observadas el numero de clases escogidas

se seleccionó **File** → **Save ROI**. Por último se seleccionaron las clases escogidas y se guardaron en la carpeta correspondiente.

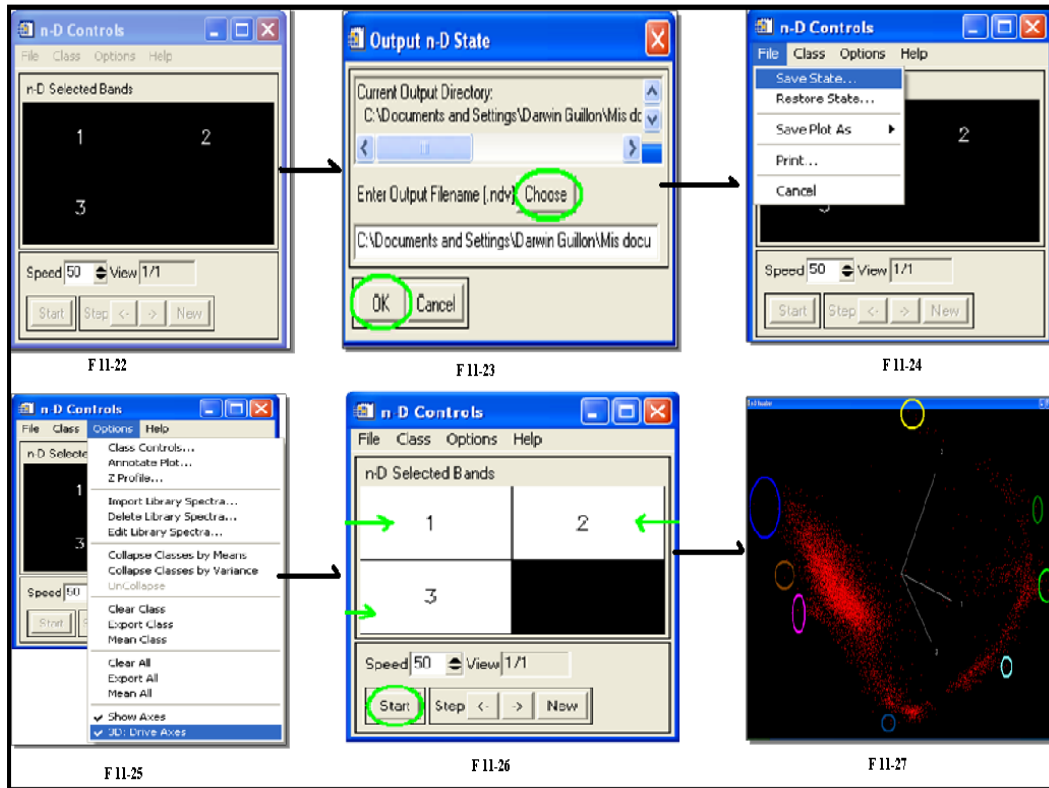


Figura 4-28 Pasos para la ubicación de valores o píxeles extremos de la imagen.

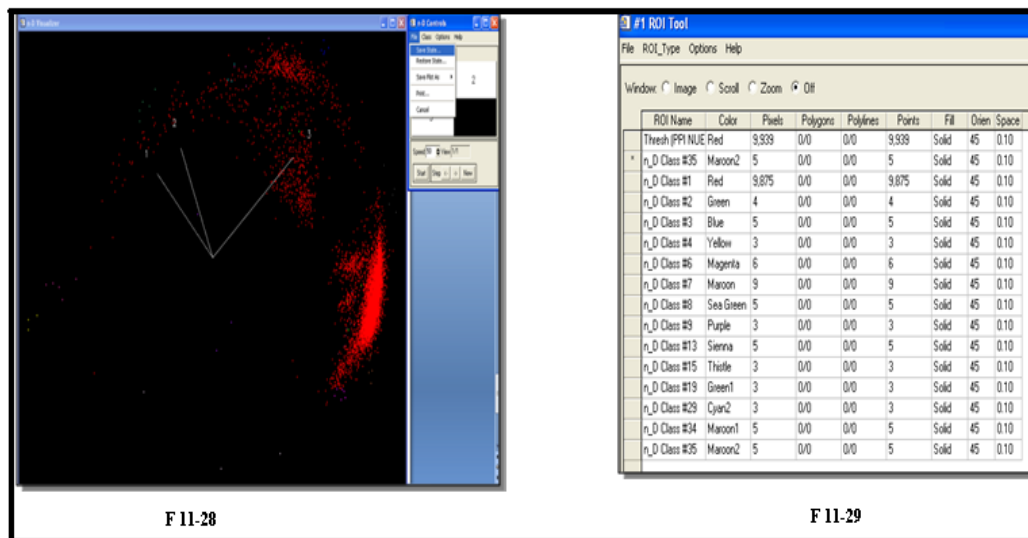


Figura 4-29 Valores extremos representados en la figura F 11-29

4.12 SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

Para realizar este procedimiento se seleccionó *Spectral* → *Mapping Methods* → *Spectral Angle Mapper*, se desplegó la ventana “*Classification Input File*” de donde se seleccionó *MNF Subset (MNF NUEVO)*, en el Spectral Subset se seleccionan las tres primeras bandas (1, 2, 3), ya que en este procedimiento tiene que repetirse también para las otras 3 bandas (4, 5, 7), se hizo clic en **OK**.

Posteriormente se abrió la ventana “*Endmember Collection: SAM*” se presiona *import* → “*From ROI/EVF from Input File*”, se desplegó “*Select Regions for Stats Calculat*”, donde se seleccionan las clases obtenidas en el procedimiento anterior, se presiona **OK**, se vuelven a remarcar las clases se selecciona “*Apply*”, lo que genera una ventana llamada “*Spectral Angle Mapper Parameters*”, en la cual se pueden modificar los ángulos existentes en la ventana como se muestra en la (Figura 12-7), se guardan los cambios realizados, se hace clic en **OK**.

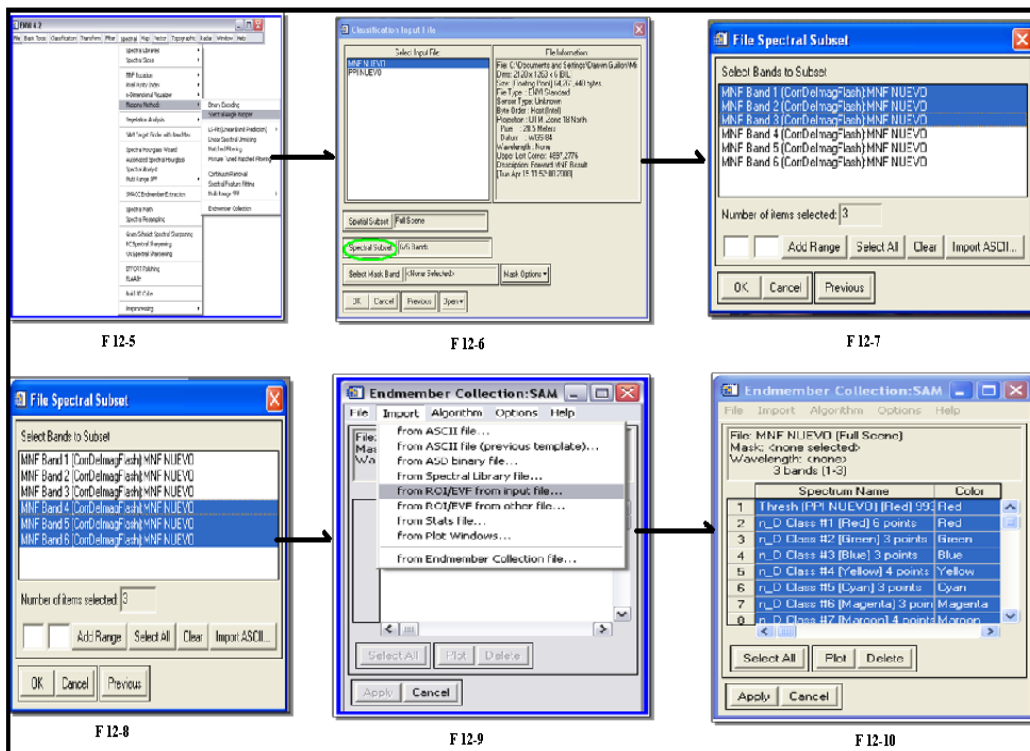


Figura 4-30 Selección de las 6 bandas por separado para la corrección del *Spectral Angle Mapper*.

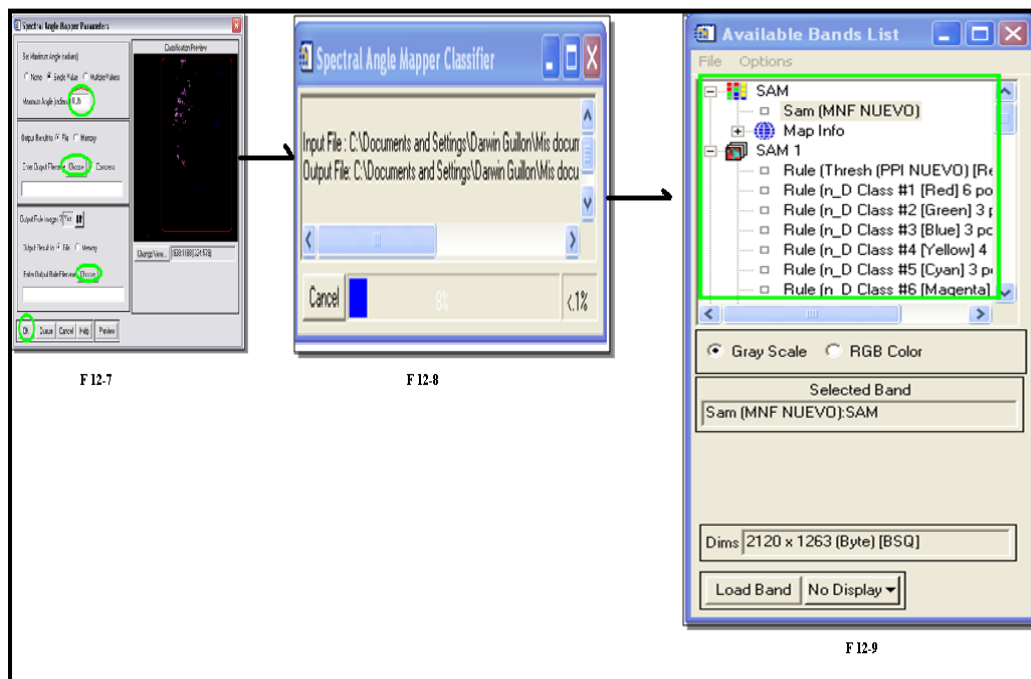


Figura 4-31 Corrección finalizada y agregada en la lista de bandas.

4.13 CLASIFICACION NO SUPERVISADA EN ENVI

Para realizar esta clasificación se utilizó la imagen generada por la corrección atmosférica en Flaash de pasos anteriores. En la ventana de parámetros de IsoData se asignaron al azar cierta cantidad de clases (tanto mínimas como máximas) las cuales el software reconoció por colores generando así una imagen donde se muestran agrupadas lo que posiblemente podrían ser superficies de características similares.

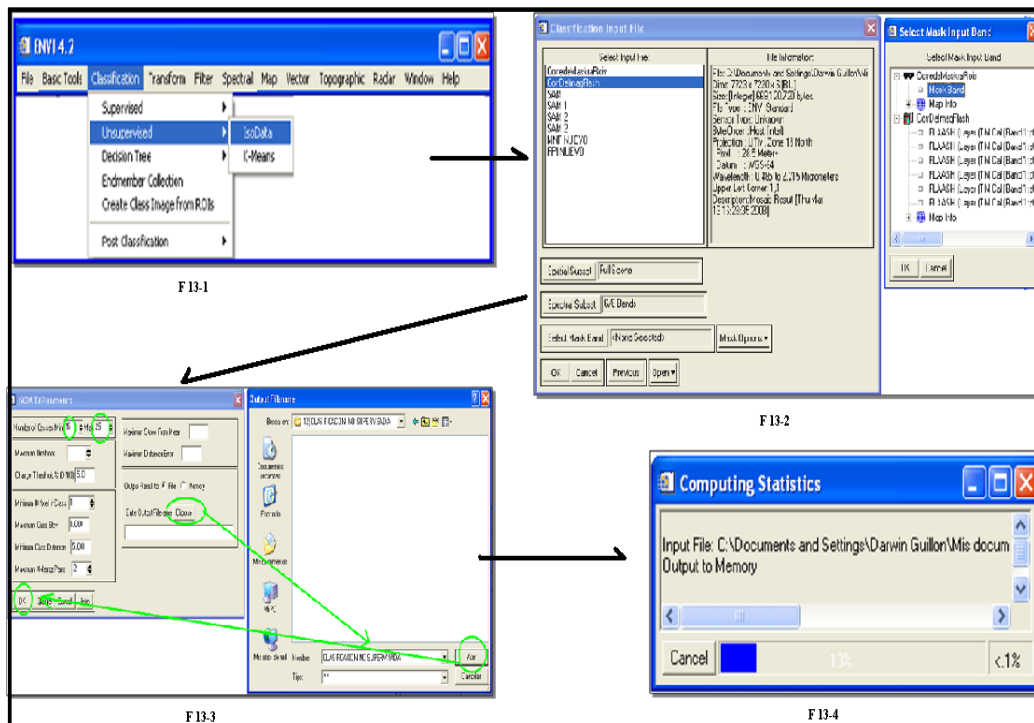


Figura 4-32 Pasos para la generación de una imagen general según las clases seleccionadas anteriormente en el cuadro F 13-3.

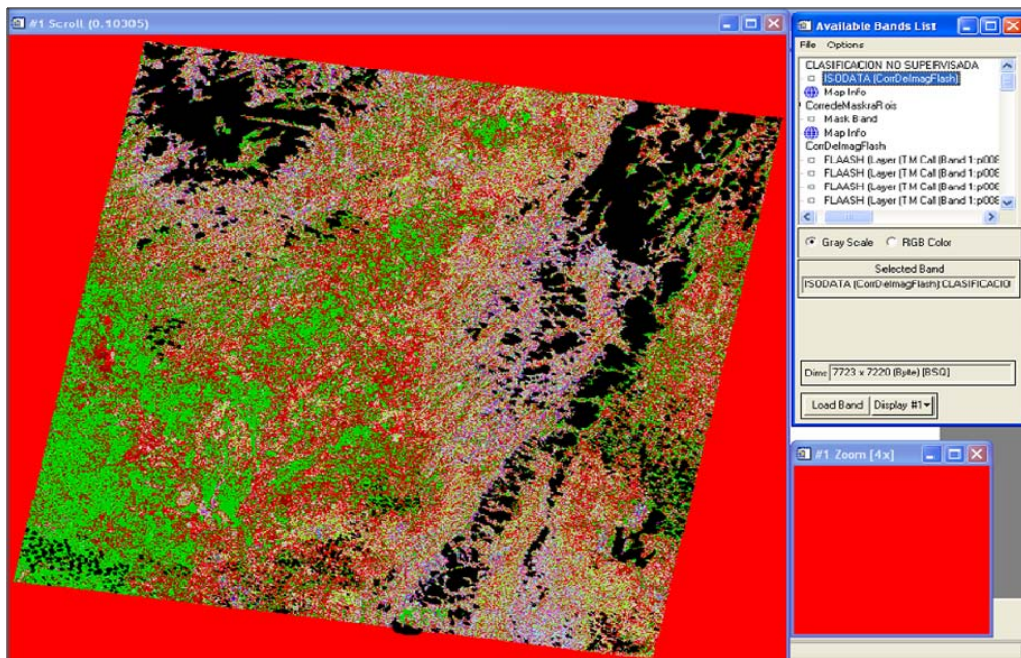


Figura 4-33 Imagen final generada por las clases dictadas al programa en la figura 13-3.

4.14 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA EN ERDAS

Al igual que en el paso anterior en el programa ERDAS se debe importar la corrección atmosférica en Flaash generada, con la diferencia que en este caso se seleccionaron por separadas las bandas del 1-3 y del 4 al 6, luego de haber realizado este paso se desplego la imagen en blanco y negro con las distintas clases generadas en distintos tonos de grises, donde se cambiaron manualmente los colores para analizar cuáles de estos tenían similitud y de esta forma generar el mapa con la información obtenida.

En la figura 4-34 se muestran detalladamente los pasos que se realizaron para la generación de la imagen antes mencionada.

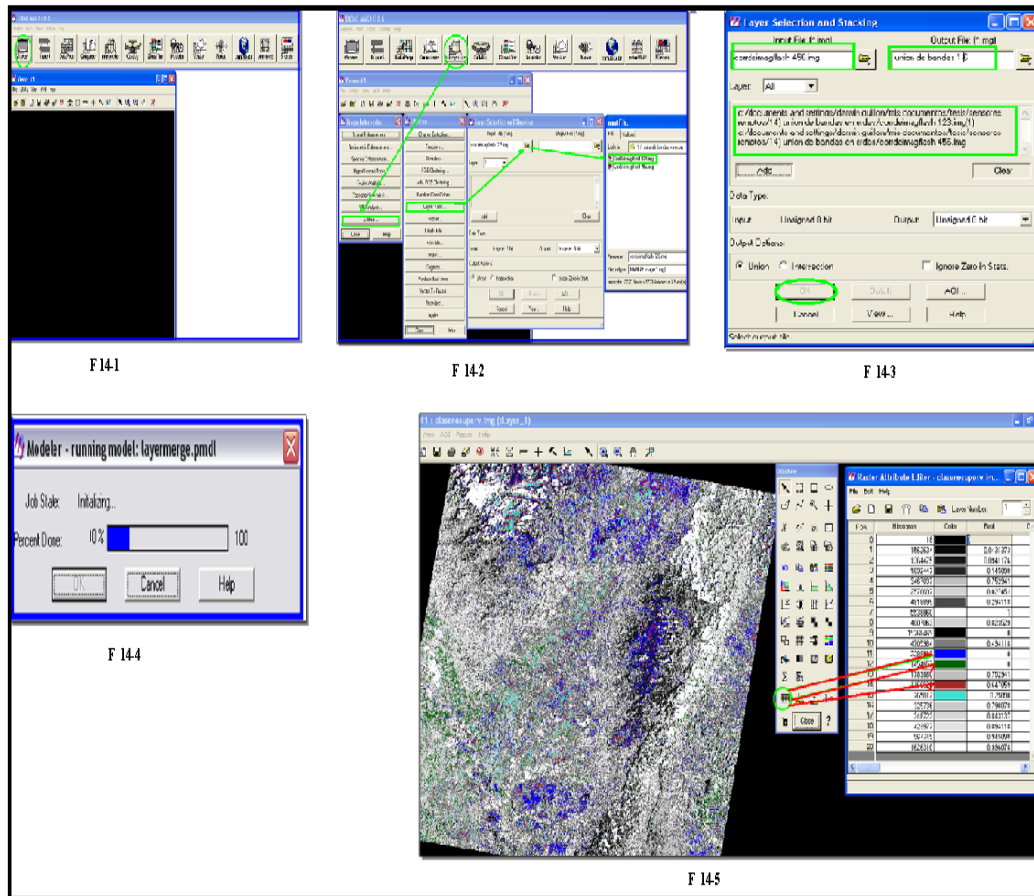


Figura 4-34 Imagen final en escala de grises para su posterior interpretación.

4.15 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA EN ERDAS

Aunque la clasificación supervisada es realizada con la imagen generada en el paso anterior (unión de bandas 1-6) es importante señalar que se procedió de forma inversa que en la clasificación no supervisada en ambos programas (ENVI 4.2 y ERDAS 6.8), ya que en este caso se le asignó directamente a la imagen las distintas clases que se observaron, para que el software posteriormente ubicara todos los píxeles que mantuviesen alguna similitud a lo largo de toda la imagen, para esto se procedió de la siguiente manera:

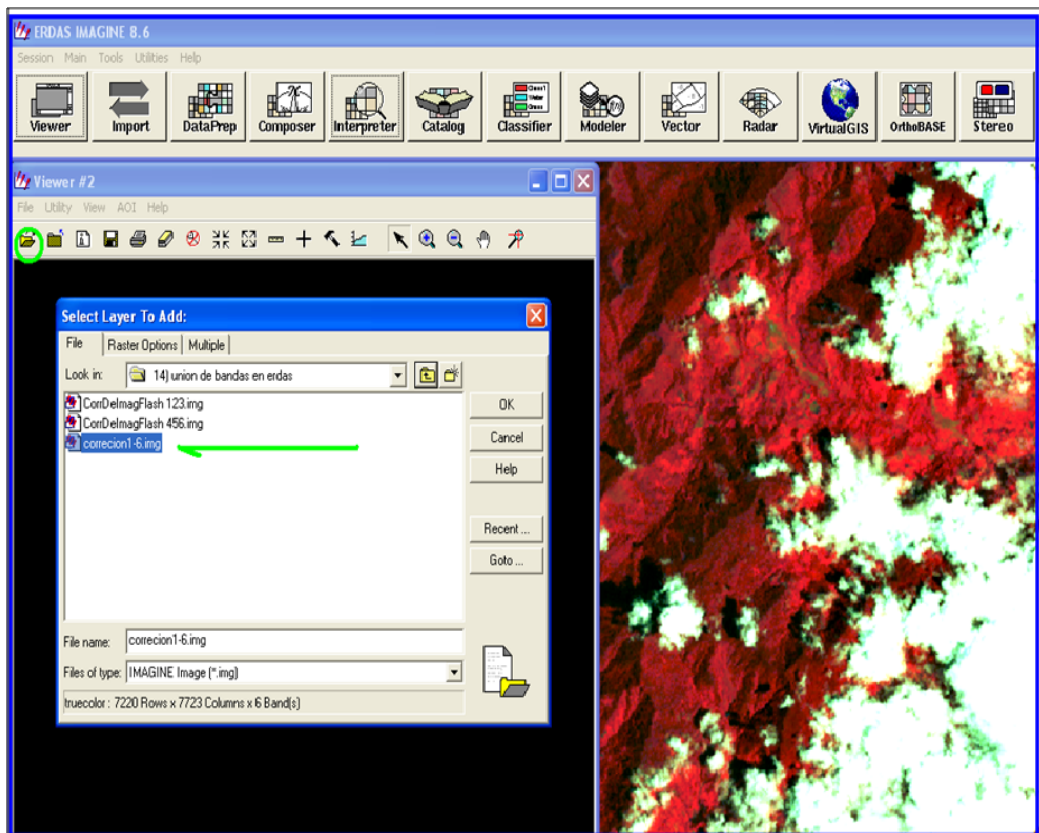


Figura 4-35 Selección de la unión de bandas 1-6 realizada en el paso anterior.

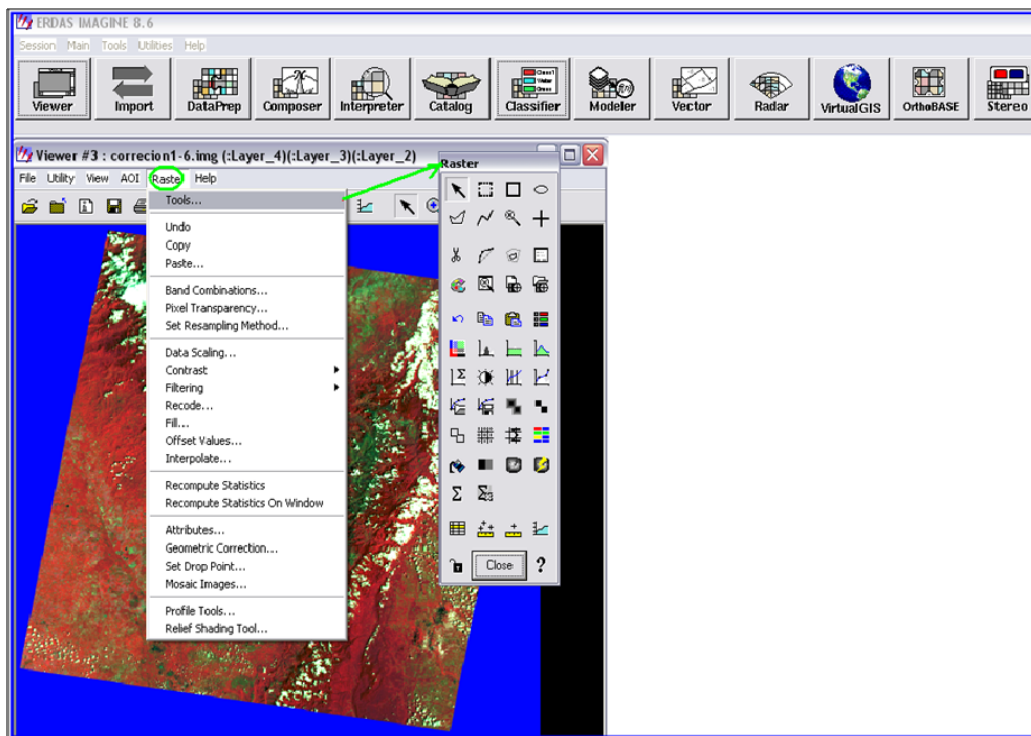


Figura 4-36 Selección de la herramienta Tool la cual permite seleccionar las clases.

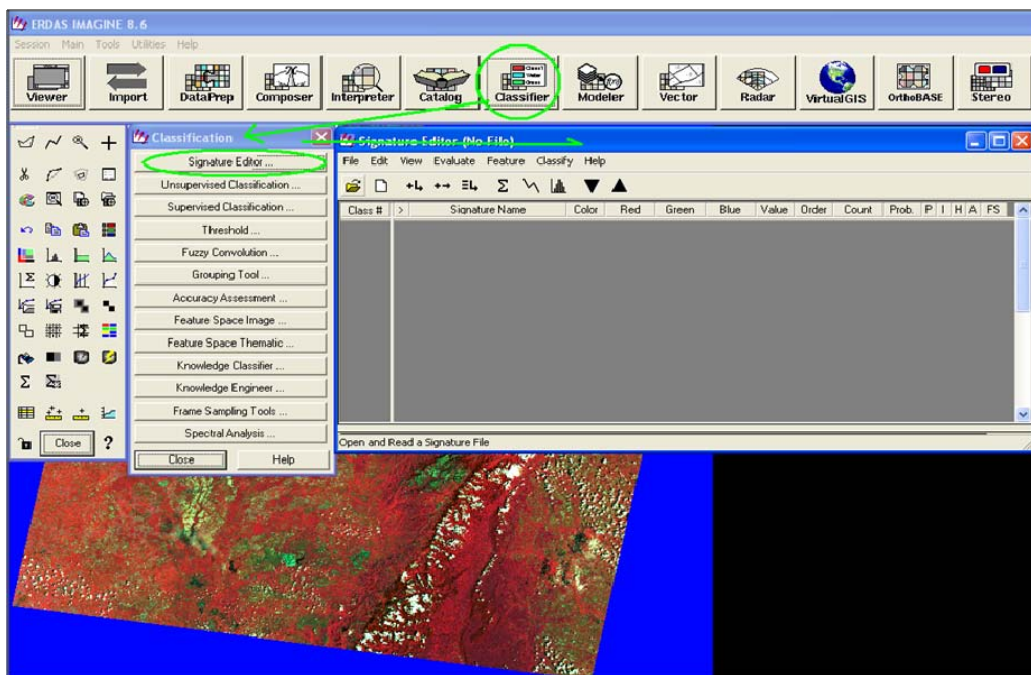


Figura 4-37 Selección del *Signatur Editor* para importar las clases generadas por el usuario.

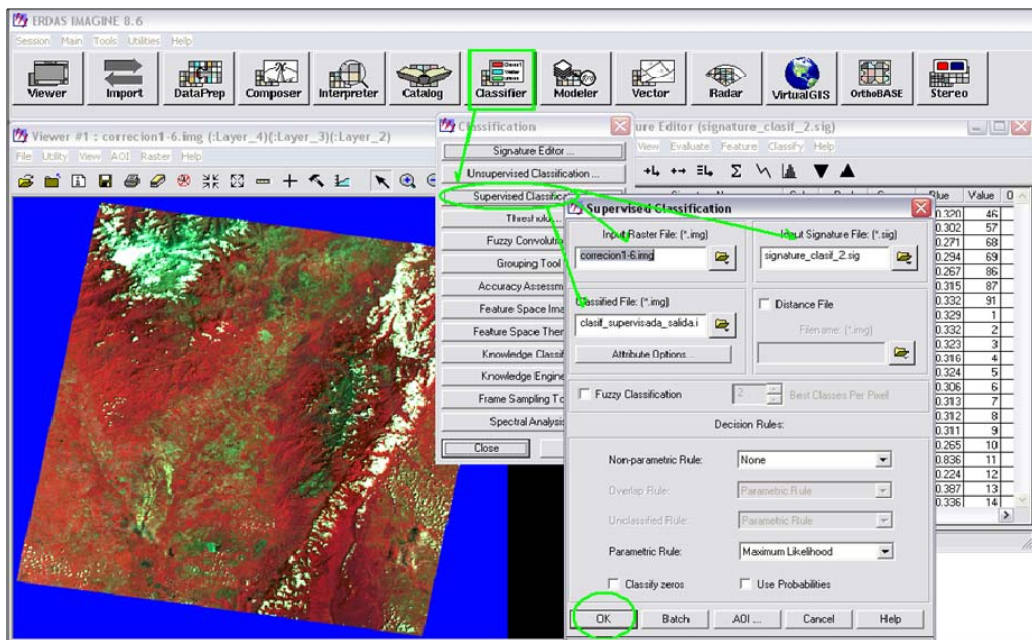


Figura 4-38 Comando para Copiar en las carpetas correspondientes con el nombre de salida de la imagen a generar.

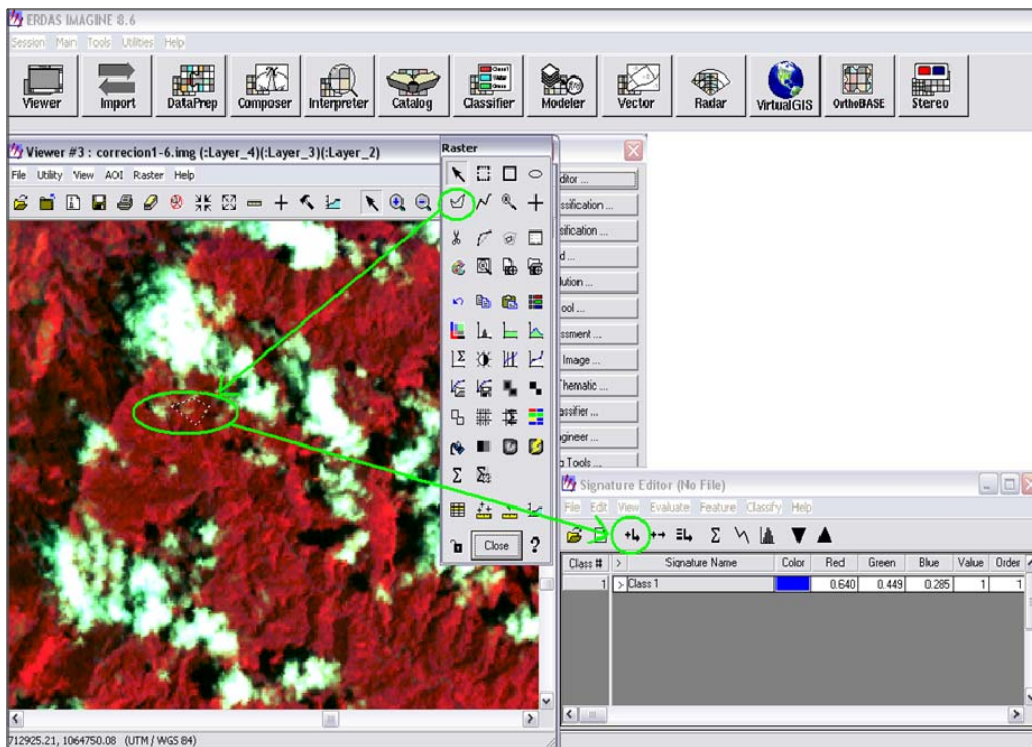


Figura 4-39 Pasos para generar las clases y exportarlas al *Signatur Editor*.

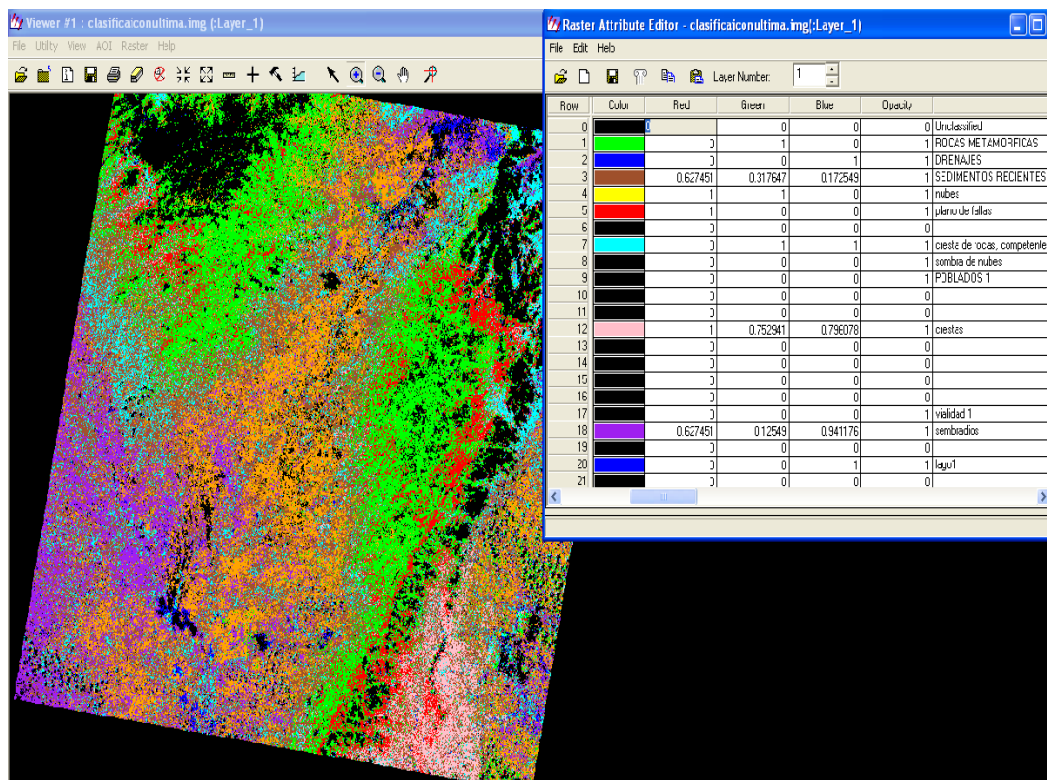


Figura 4-40 Imagen generada a partir de las clases asignadas apoyado en mapas preexistentes.

4.16 ÍNDICE DE VEGETACIÓN

El índice de vegetación es una herramienta que permitió determinar las zonas con mayor concentración de vegetación dentro del área de estudio, la imagen generada sirvió como complemento para la interpretación de las distintas litologías presentes, pero no es una herramienta que necesita ser acoplada con otras imágenes para su mayor efectividad al momento de discriminar los cambios litológicos existentes en una zona determinada.

Para ello se procedió de la siguiente manera: Como primer paso se abrió la ventana llamada *Interpreter Enhancement* → *Indices*. Luego se desplegó una ventana con el mismo nombre donde se le colocaron los nombres de salida de la imagen generada así como la imagen a la cual se le haría la transformación, en este caso fue la imagen de corrección atmosférica 1-6

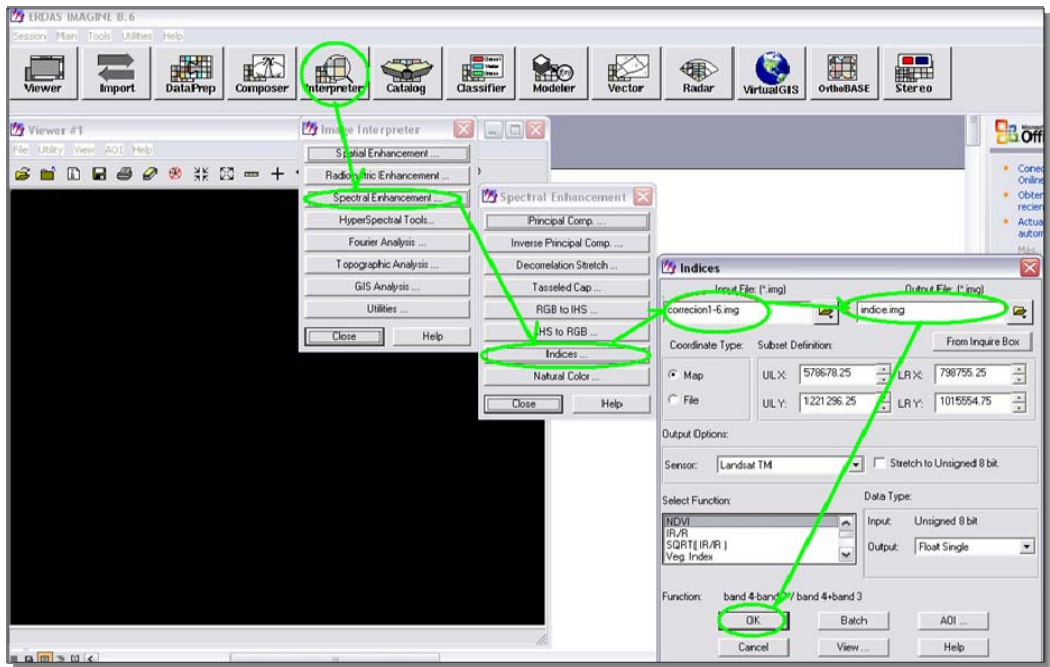


Figura 4-41 Elementos de salida para la generación del índice de vegetación.

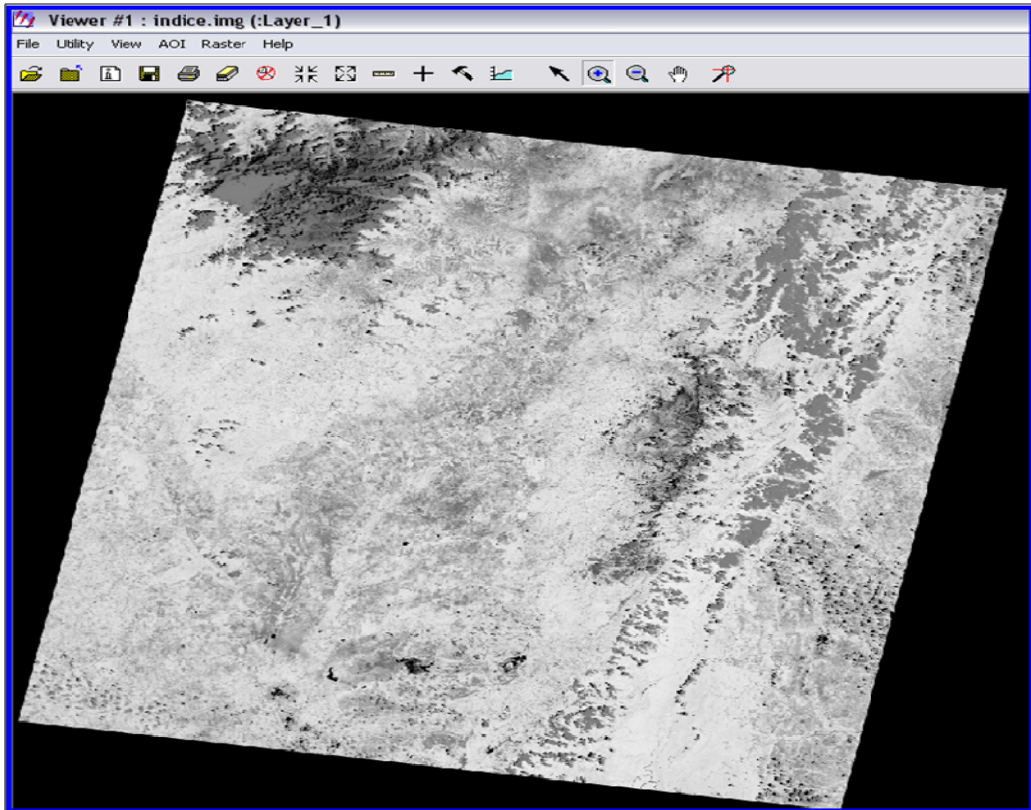


Figura 4-42 Imagen generada con la concentración de vegetación propuesta por los colores más claros.

4.17 COCIENTE DE BANDAS

Para la elaboración del cociente de bandas se procedió de la siguiente manera:

Inicialmente en el programa ENVI se abrió la imagen generada en la corrección 1-6 en Flaash.

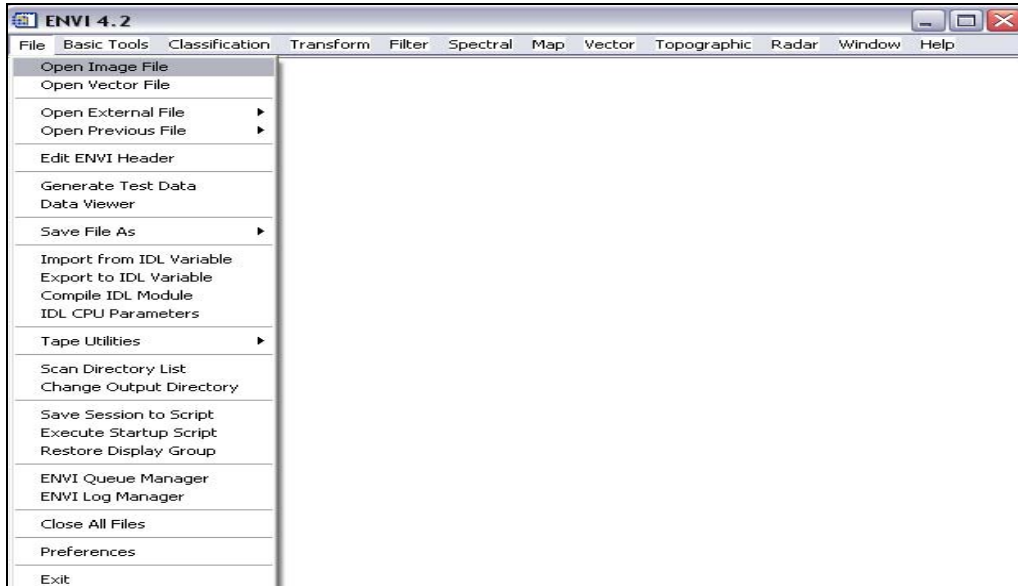


Figura 4-43 Ventana de inicio para la realización del cociente de bandas de la imagen *Landsat*.

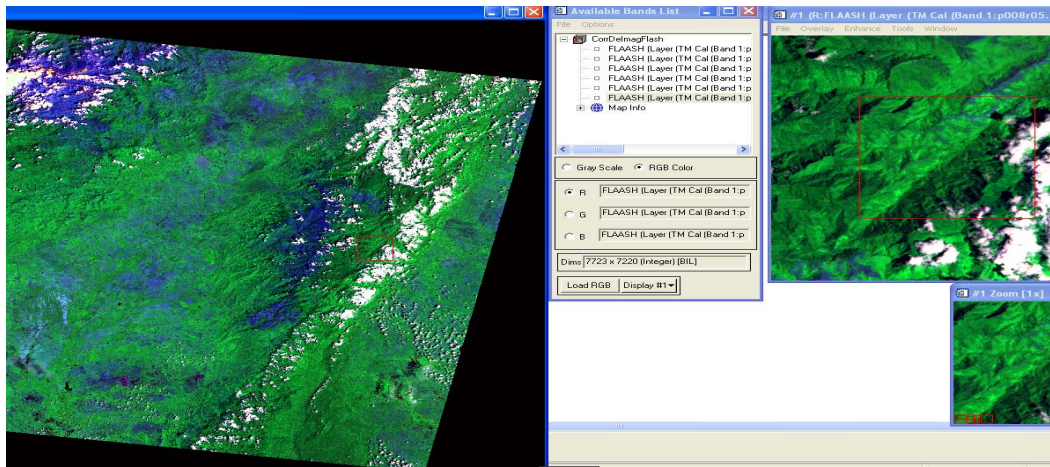


Figura 4-44 Imagen de la corrección en Flaash en combinación 7 RED, 4 GREEN, 2 BLUE.

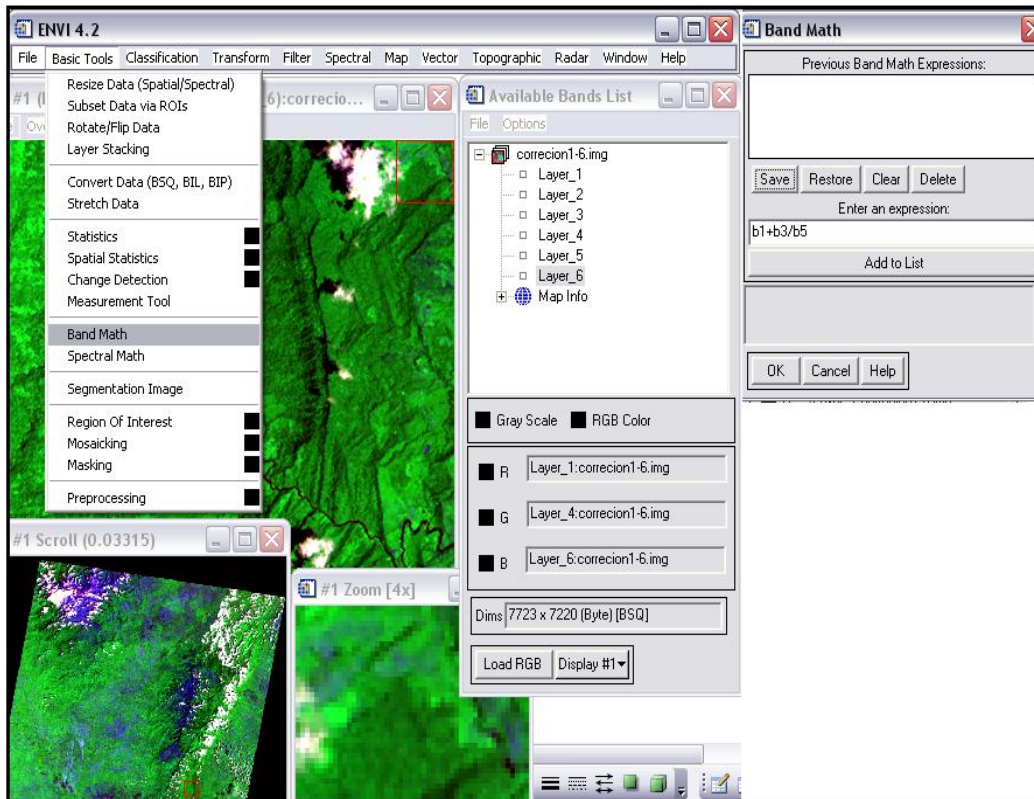


Figura 4-45 Selección de la herramienta *Band Math* para realizar el cociente de bandas.

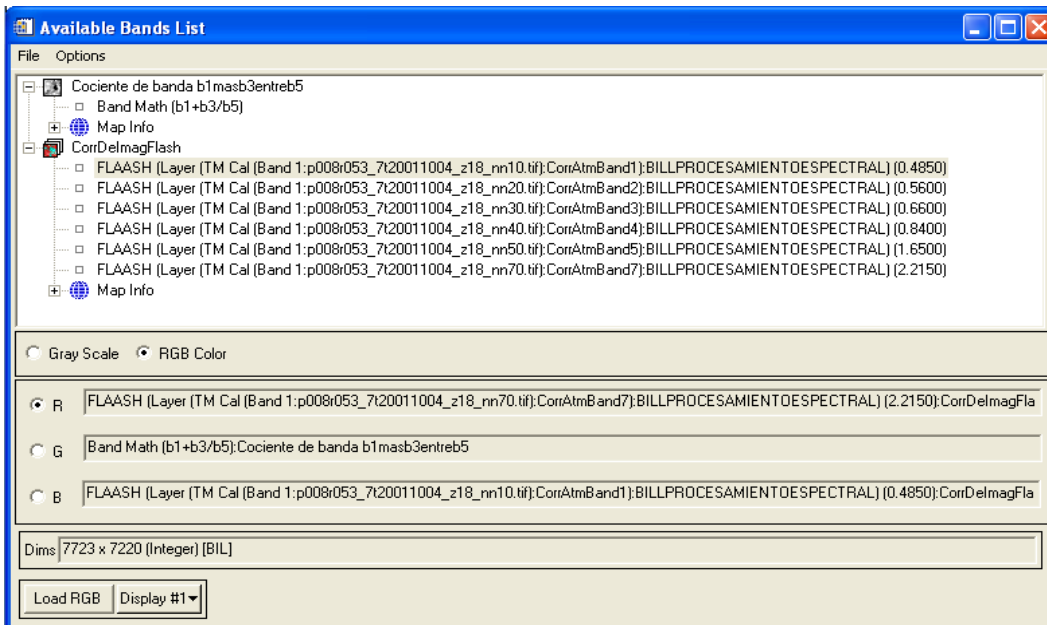


Figura 4-46 Valores generados por el cociente de bandas agregados al menú de uso del ENVI.

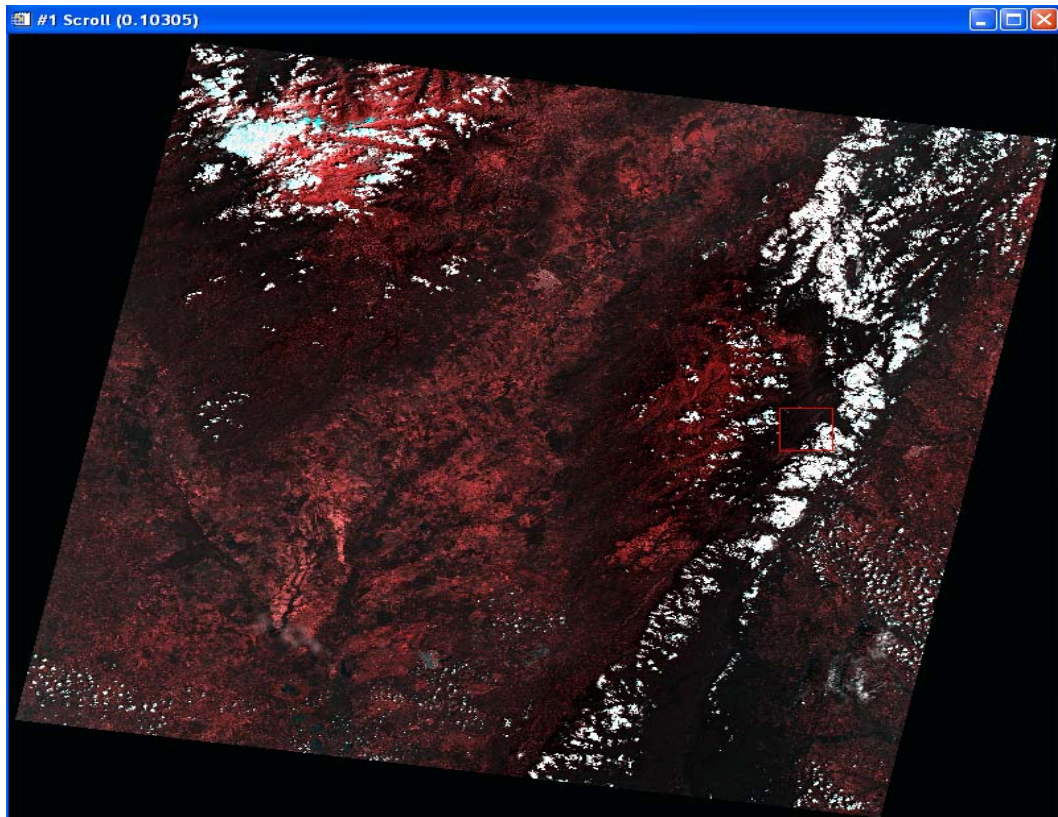


Figura 4-47 Imagen generada por la combinación de cañones y la sumatoria de bandas agregado en el paso anterior.

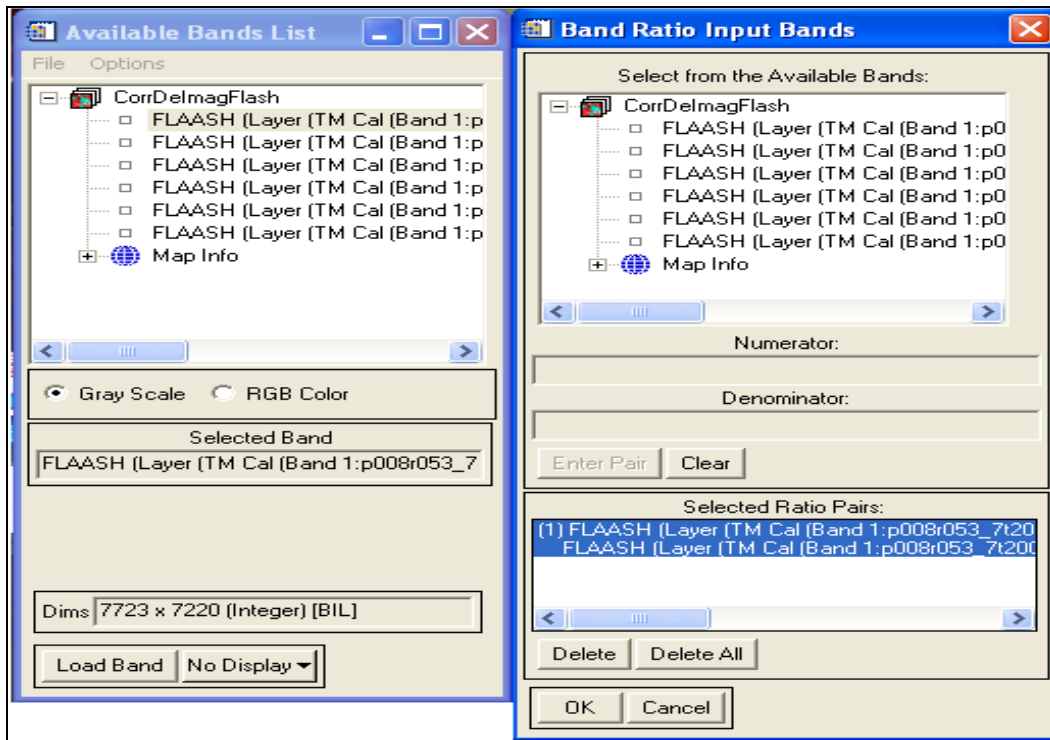


Figura 4-48 Pasos para la generación del cociente de bandas, al seleccionar OK para generar la imagen

4-49

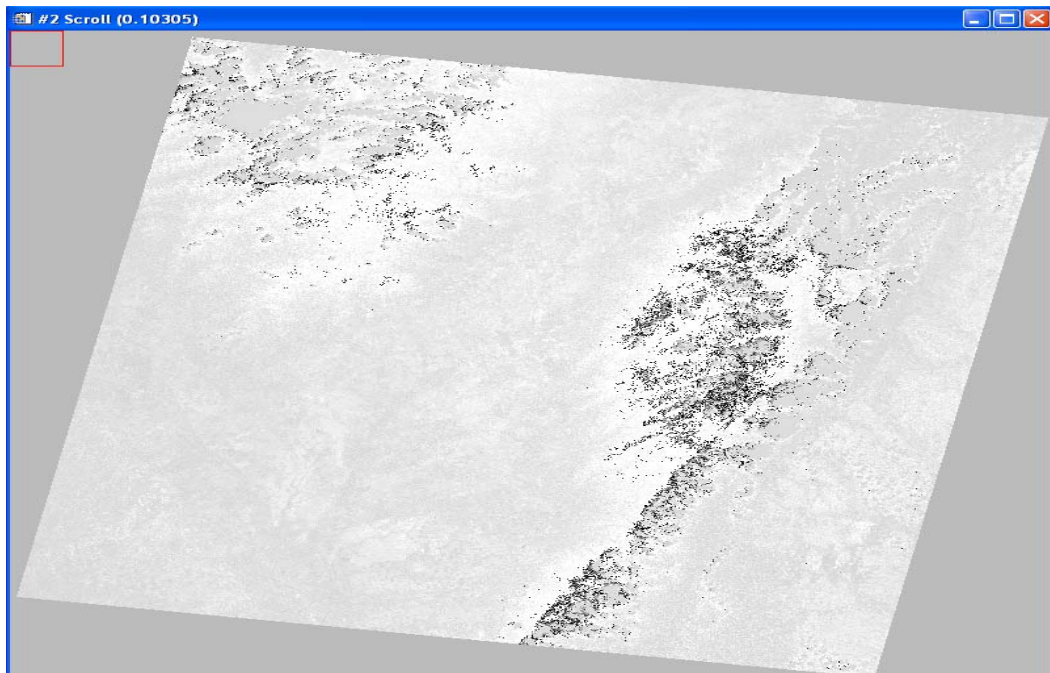


Figura 4-49 Imagen generada con el cociente de bandas donde se muestran en los colores más claros concentraciones de óxidos de hierro.

4.18 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

El modelo de elevación es una herramienta que permitió observar claramente los desniveles topográficos de la zona de estudio, la cual por medio de exageración de la escala vertical se determinó con mayor precisión las zonas de montaña, de valles y sus límites.

A continuación se mostraran los pasos para realizar dicho procedimiento en el programa ENVI 4.2.

Inicialmente se abrió la imagen de la corrección atmosférica en Flaash, donde se seleccionó una combinación de bandas de (7 RED, 4 GREEN, 1 BLUE). Dicha combinación generó la imagen que se muestra en la figura 4-50.

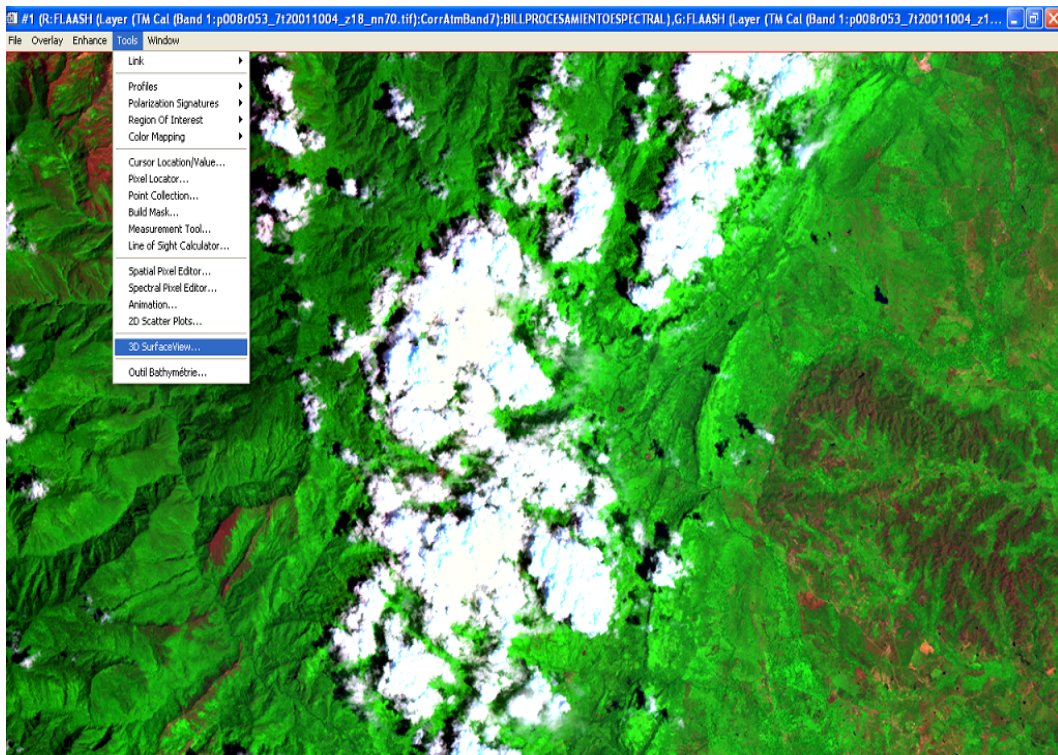


Figura 4-50 Imagen generada por la combinación de bandas 7Red, 4Green, 1 Blue.

Posteriormente en esta se seleccionó la herramienta *Tools* → *3D surfaceview*. Donde se despliega la ventana de *associated DEM input file* en la cual se permite seleccionar una de las 6 bandas de la imagen Flaash, para este

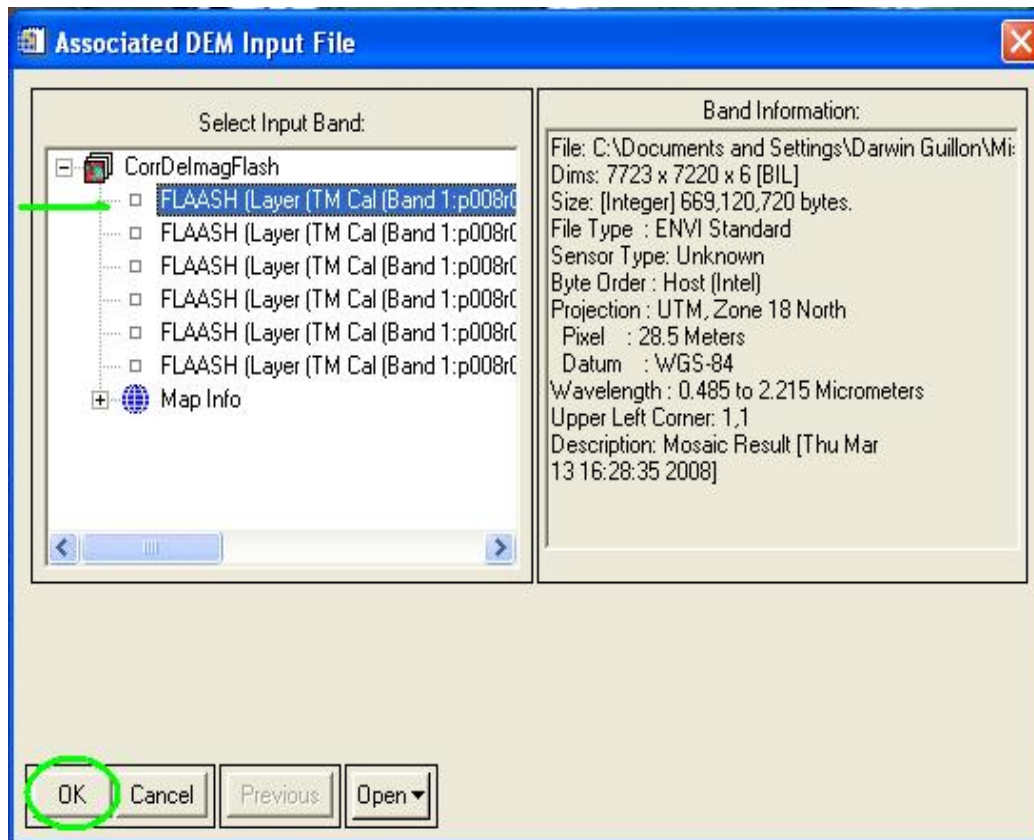


Figura 4-51 Selección de banda 1 de la imagen Flaash para la generación del modelo 3D.

Al presionar *OK* se despliega la ventana *3D SurfaceView Input Parameters*, en esta se generó la delimitación de la zona de estudio haciendo click en el botón Espatial Subset, posteriormente se abre una venta (*Select Spatial Subset*), al presionar el botón de *Image*, se genero un recuadro de color rojo la cual permite la ampliación o reducción del área a la cual se le aplicara el modelo *3D*, (Ver figura 18-3).

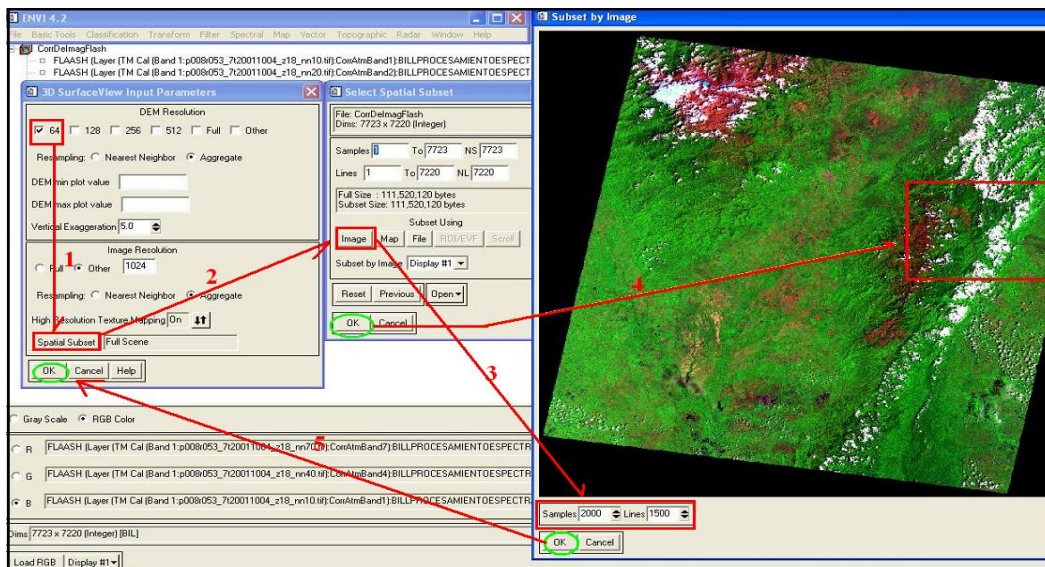


Figura 4-52 Elementos para la reducción de la zona a la cual se le aplicara el modelo 3D.

Realizado todos estos procedimientos se genera la imagen digital con el modelo de elevación, y esta se le podrá cambiar la forma de su expresión, puede verse tanto la imagen como las líneas en forma de malla para mejor realce de la topografía (Ver figura 4-53)

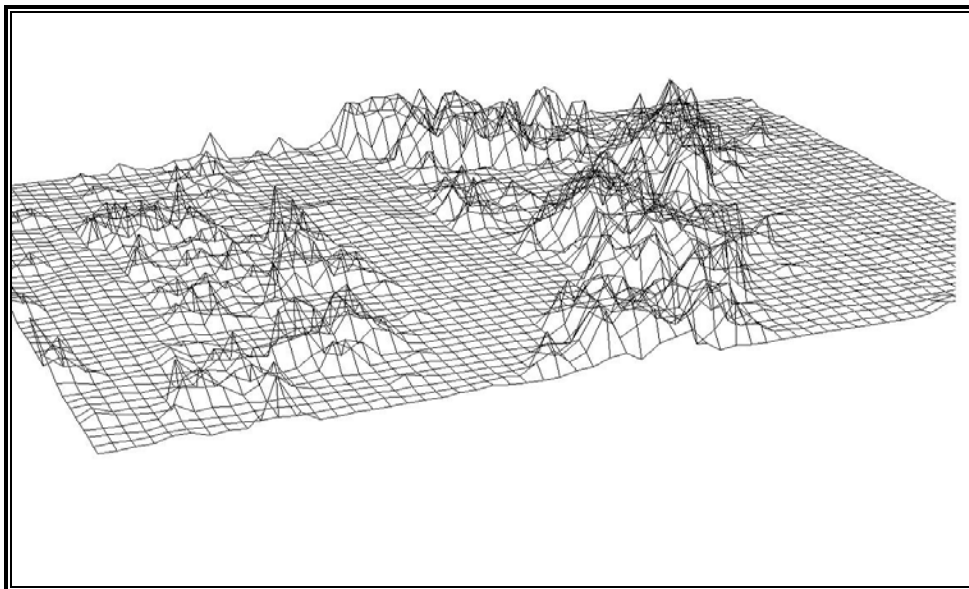


Figura 4-52 Modelo digital 3D de la zona de estudio con líneas en forma de mallas.

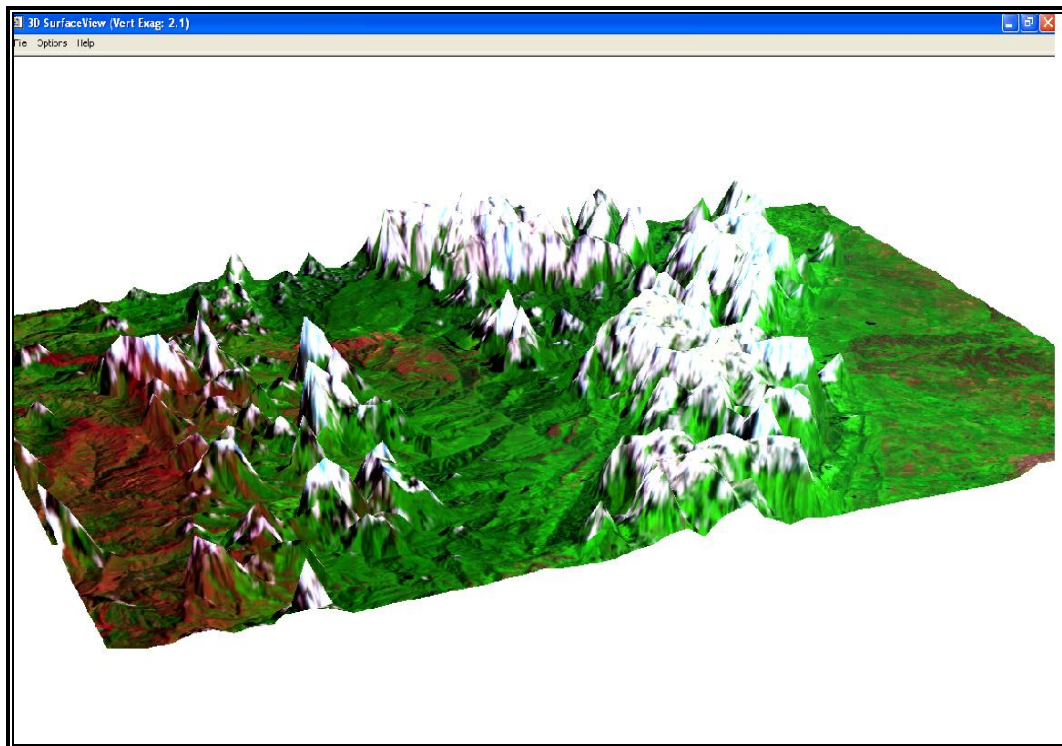


Figura 4-53 Modelo digital 3D de la zona de estudio con la imagen Landsat 7 de la corrección atmosférica en *FLAASH*.

CAPÍTULO V

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis del relieve, de la red hidrográfica, las estructuras y la litología, se basó en la interpretación de la imagen *LANSAT 7 ETM*, el mapa topográfico 5646 Machiques, la imagen de radar de la zona de estudio, y de la recopilación de la información de los Mapa Mosaico Guaraní de la Creole Petroleum Corporation 1954 D2, (Ver Anexo A6). A continuación se presentan los siguientes resultados.

5.1.1 Relieve

En el área de estudio se observaron dos (2) relieves contrastante bien diferenciados. Un área llana denominada Zona A, que representa el 30% de la superficie de la imagen, y una zona de relieve abrupto denominada Zona B, presente en el restante 70 % del área de estudio. El contacto entre estas dos unidades (línea azul y roja) es abrupto fundamentalmente, y se suaviza en la parte central de la Imagen, donde se localizan algunos valles (Ver figura 5-1).

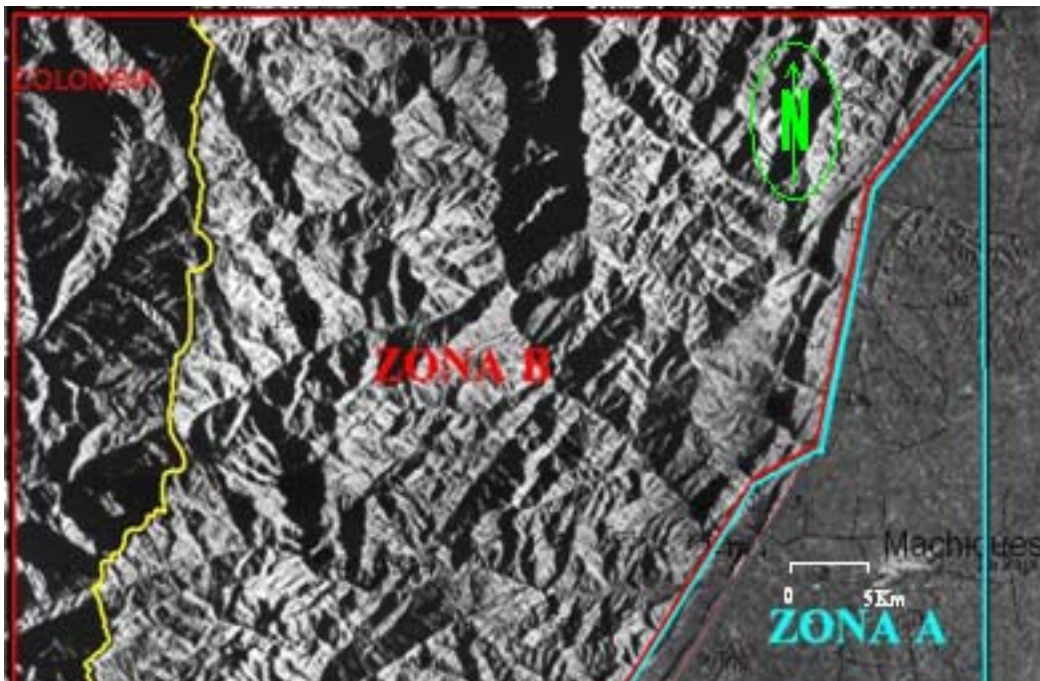


Figura 5-1 Límites entre las unidades más importantes presentes del área estudio, identificados por los contactos de líneas roja y azul.

5.1.1.1 Zona A (Relieve Llano)

Esta zona abarca 30 % de la zona estudiada. Se ubica al sureste y parte del noreste en la imagen de satélite *Landsat 7*. La altura máxima es 200 m en el contacto con la zona abrupta. Se observa un declive uniforme indicado con flechas negras (ver figura 5-2), hacia las adyacencias de la ciudad de Machiques, cuya altura es de 106 m, estas características permiten identificar a la zona llana como una planicie aluvial.

Esta planicie es drenada por el cauce del Río Negro, el río Apón, Macoita, y Apóncito. En la planicie, junto a las riberas de estos cursos de aguas, se han revelado topografías llanas, posiblemente remanentes de terrazas aluviales, determinadas gracias a la combinación de los Cañones (7 rojo, 4 verde, 1 azul) en la imagen *Landsat 7*, (Ver Figura 5-2). Estas zonas concuerdan con los trabajos de Chaplet (1999), así como también, con la Creole Petroleum Corporation (1954) Quienes proporcionan información cartográfica de terrazas aluviales en el mismo sector.

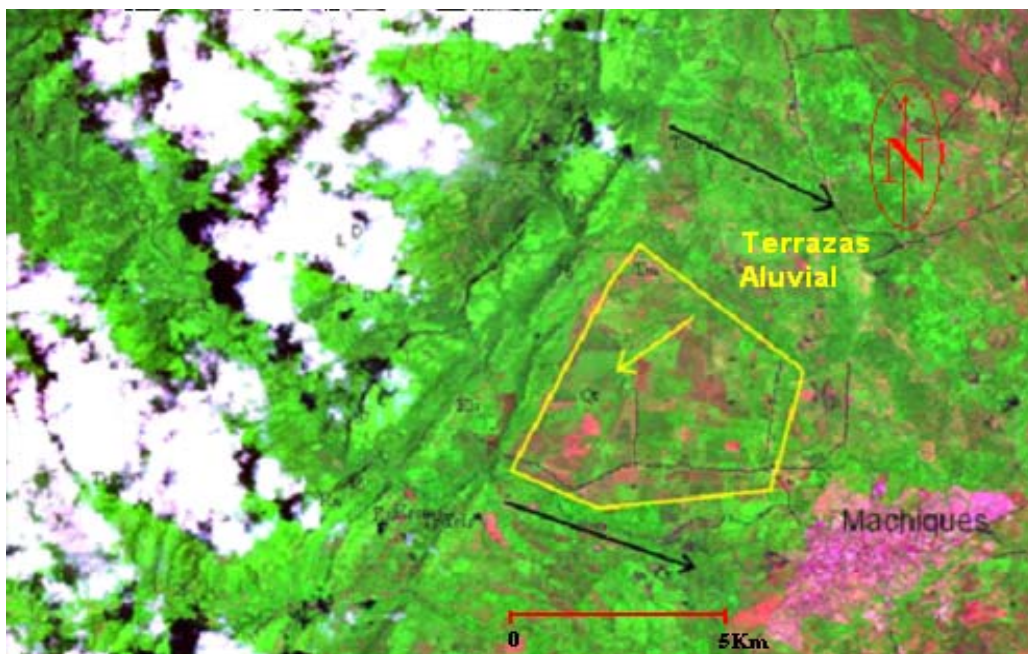


Figura 5-2 Terrazas aluviales observadas en la imagen *Landsat 7*, ubicada dentro del polígono amarillo.

Al noreste de la Zona A, aparecen cambios notorios en las tonalidades de la imagen satelital, indicando irregularidades en el terreno, (Ver Figuras 5-3, 5-4), posiblemente un relieve bajo con estribaciones asimétricas, el cual se relaciona con las formas lomas asimétricas. Estos rasgos son apreciables también en el mapa topográfico, hoja 5646 Machiques del Instituto Geográfico venezolano Simón Bolívar. (Ver Anexo A1).

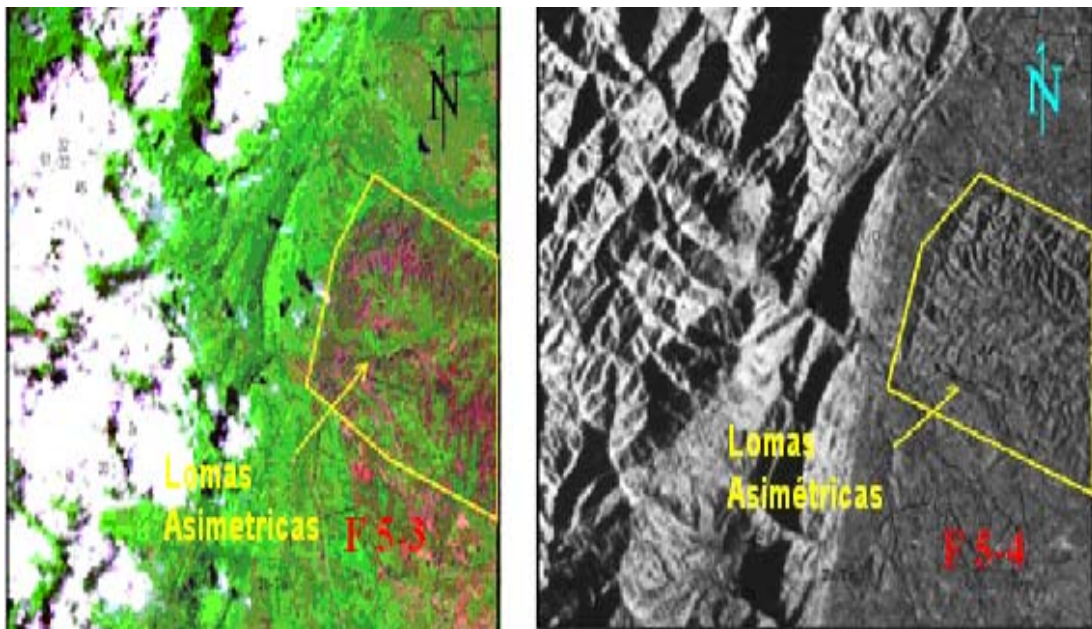


Figura 5-3 Lomas asimétricas observadas por la diferencias de los pixeles de la imagen *Landsat 7*. La figura 5-4 representa la imagen de radar que muestra las mismas lomas asimétricas, ubicadas dentro del polígono amarillo.

Al sureste de la planicie y cercano al contacto con la zona abrupta, se destaca una alineación topográfica, cuya línea de cresta se orienta N35°E preferencialmente. (Ver Figura 5-5), estas formas son semejantes a lomas alargadas.

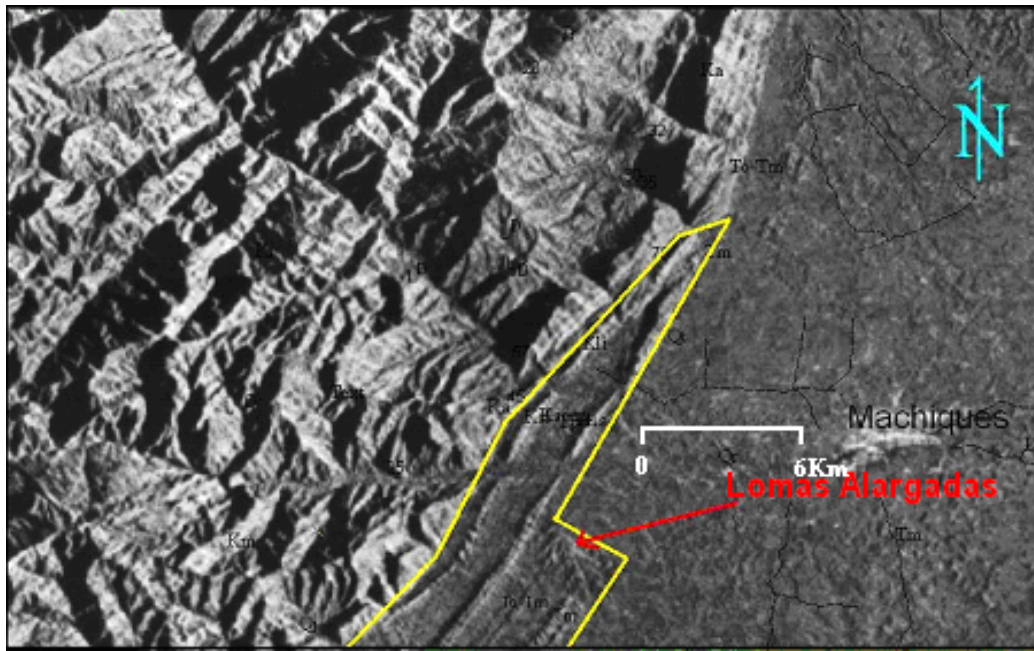


Figura 5-5 Lomas Alargadas pertenecientes a la Zona A vista en la imagen de radar. Ubicadas en el polígono amarillo.

5.1.1.2 Zona B (Relieve Abrupto)

La Zona B con relieve abrupto, presenta varios rasgos topográficos definidos como; Unidades Colinas arqueadas, Unidad Montaña y de Valles Interdigitados.

5.1.1.3 Zona B-1(Colinas Arqueadas)

Representada por el 4 % de la zona en estudio, se ubica entre el sureste y Noreste de ésta, en la cual se observan Colinas Arqueadas. La altura máxima es 650 m aproximadamente y la mínima coincide con la zona llana a 200 m. Estas colinas tienen orientación promedio N25°E. Sus líneas de crestas presentan una geometría curvilínea, acompañada de algunas discontinuidades (quebres notorios) que segmentan a esta unidad. Las laderas del Sureste presentan una pendiente suave

con irregulares en la superficie, estas indican trazas de capas que han aflorado (Ver Figura 5-6).

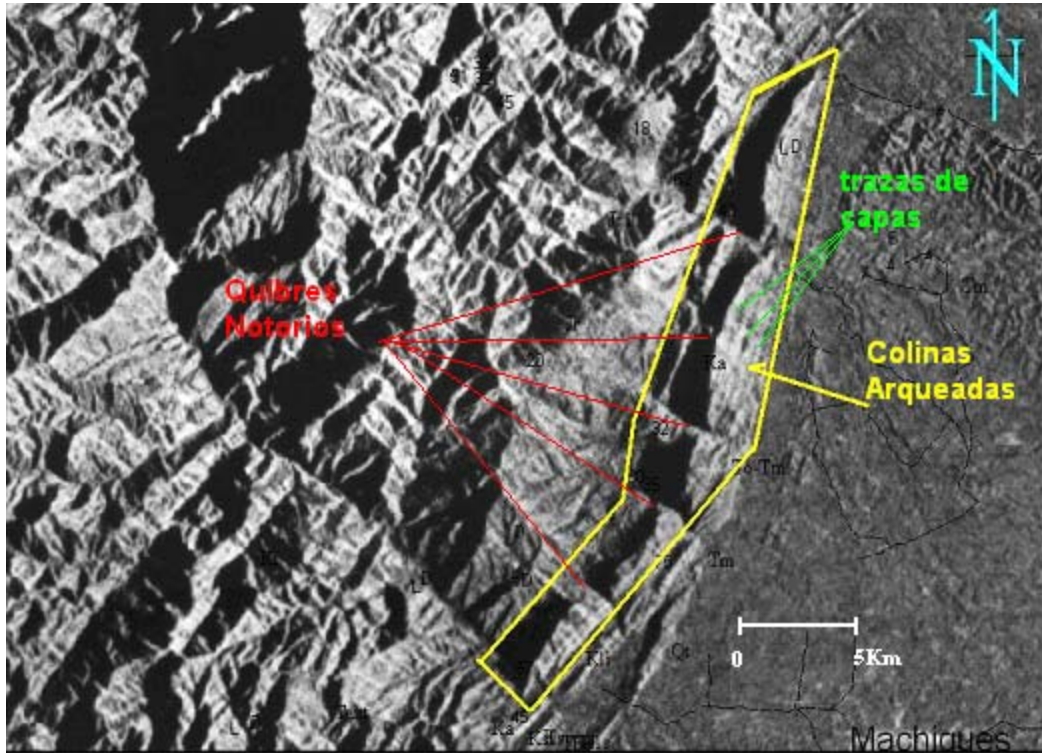


Figura 5-5 Unidad de Colinas Arqueadas, y sus quiebres notorios vista en la imagen de radar.

5.1.1.4 Zona B-2 (Valles Interdigitados)

Es un conjunto de valles asimétricos que se ubican entre la unidad de las colinas arqueadas y la zona de relieve de Montaña. Esta abarca el 2% del área, su punto más alto es 800m aproximadamente en los cauces de los ríos Apón, Cuiba, Riecito, los cuales drenan hacia el sureste. Estos valles se interdigitan con las laderas de la unidad de montaña, mientras que se ensancha hacia el Sureste. Las pendientes de las laderas del relieve que los rodean, son uniformes y empinadas en la base de las colinas arqueadas, e irregulares y suaves en la unidad de montaña, rasgos

confirmados en el mapa topográfico de Machiques Hoja 5646 (1974) (Ver Figura 5-7).

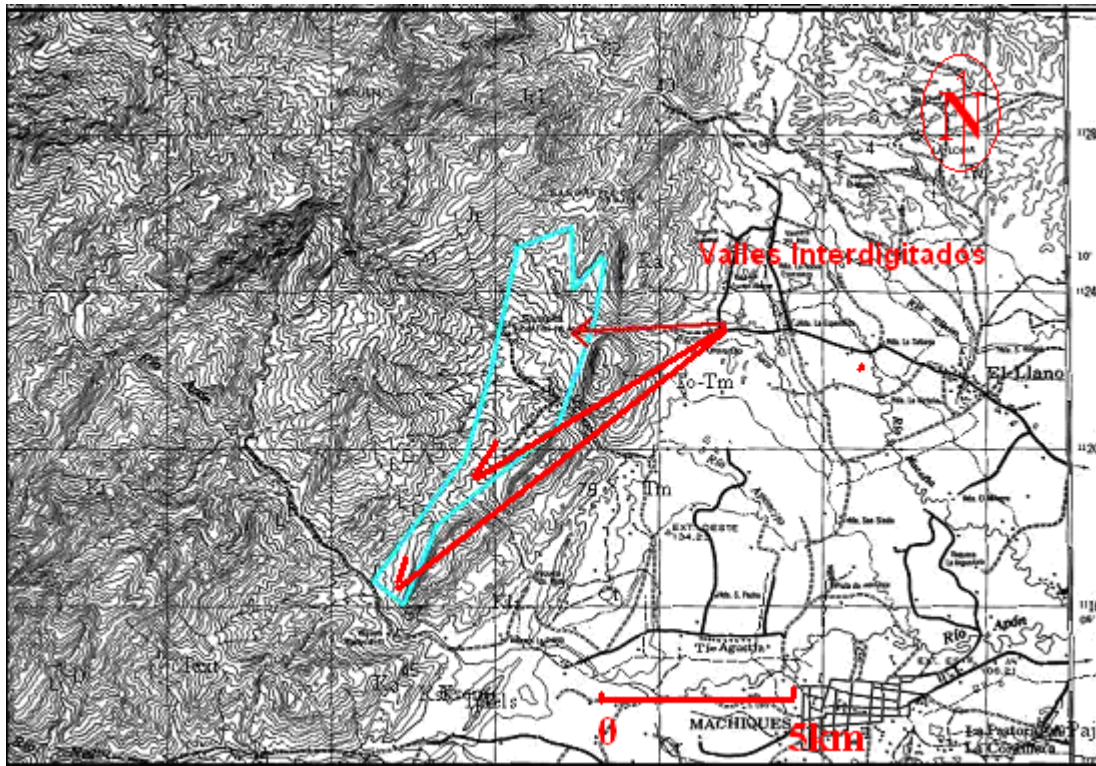


Figura 5-6 Unidad de valles Interdigitados vistos en el mapa topográfico a escala 1:100.000, hoja 5646 Machiques.

5.1.1.5 Zona B-3 (Unidad de Montañas)

La Unidad de Montaña representa el 64 % de la zona de relieve abrupto, que comprende el centro, el suroeste y todo noroeste del área. Su altura máxima es de 3600 m al noroeste, la altura disminuye hasta 400 m aproximadamente en el contacto con la zona de Valles Interdigitados. Geométricamente se presenta como un bloque con distintos desniveles. 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

N10°E en promedio, su punto más alto es 3600 m al noroeste, y el mínimo es 2800 m al suroeste.

La Línea de cresta de la Sierra de Perijá presenta un declive general hacia el suroeste. Su geometría es casi rectilínea hasta algunos quiebres notorios denominados puntos (a) y (b) respectivamente, lugar donde ocurren cambios bruscos de rumbo, en el cual se inician las estribaciones principales, 1, 2, 3 orientadas en dirección N70°E, guardando una relación de subparalelismo entre ellas. Se puede observar también, algunos cambios violentos en la orientación de estas estribaciones, de donde descienden algunos estribos menores 6,7 y 8 subparalelos entre sí, con rumbo general N20°W. En conjunto los estribos descritos presentan un arreglo angular (Ver figura 5-8).

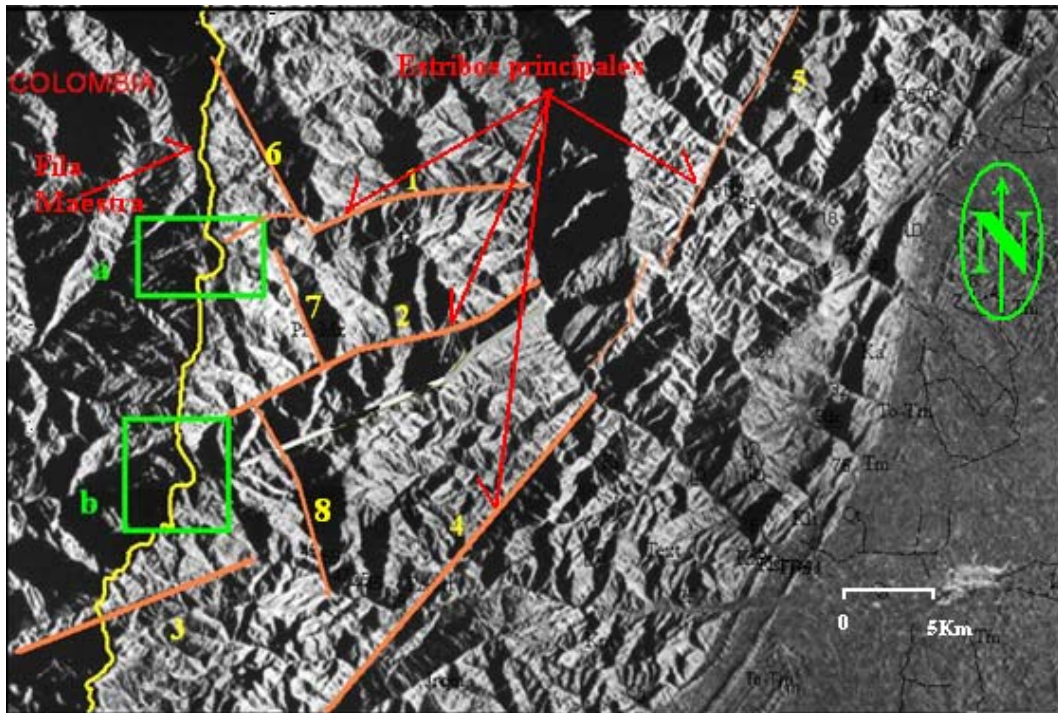


Figura 5-7 Relieve de la Sierra de Perijá donde se muestran líneas de cresta y estribaciones con arreglo ortogonal de la imagen de radar.

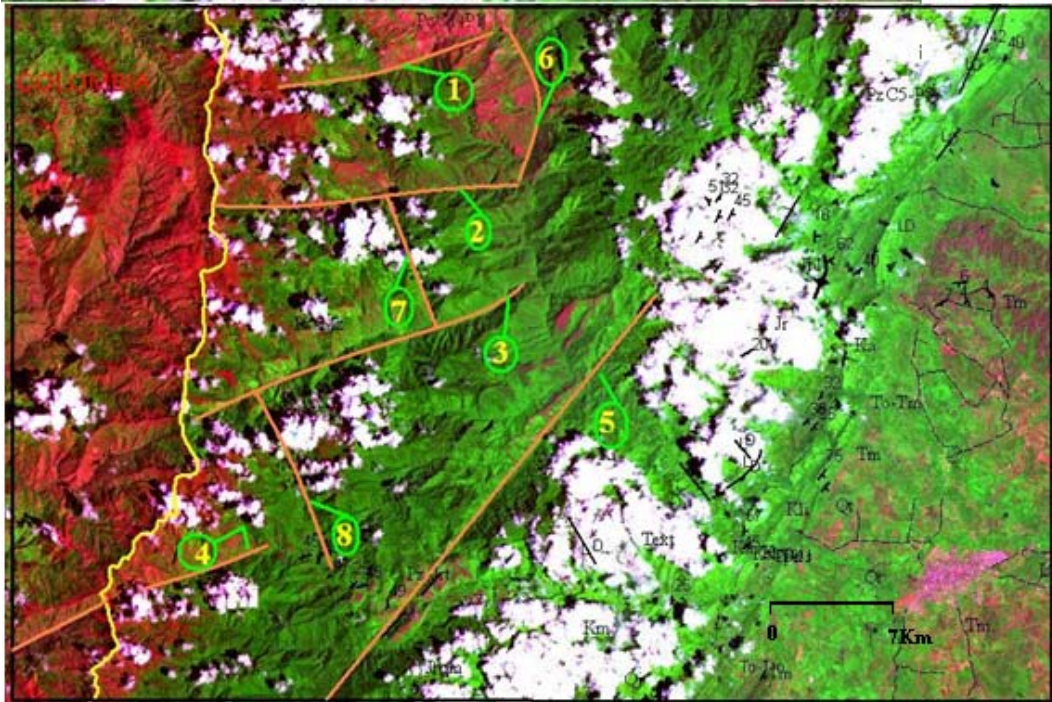


Figura 5-8 Relieve de la Sierra de Perijá donde se muestran líneas de cresta y estribaciones con arreglo rectangular en la imagen satelital *Landsat 7 ETM*.

5.1.2 Red Hidrográfica

La red hidrográfica está compuesta por las cuencas del Río Negro, el río Apón, y la del río Macoita, los cuales drenan en sentido S30°E desde sus cabeceras en la zona de Montaña a la altura de 2000 m, hasta la zona llana. El cauce de estos ríos es marcadamente rectilíneo, con cambios bruscos de rumbo dentro de la Zona B, Esta situación se observa particularmente en el cauce del Río Negro, en el sector nombrado con la letra C. Los tributarios de estos grandes colectores de agua, presentan trayectos rectilíneos y cortos, formando un patrón de drenajes angular, como el caso indicado con la letra T en el Río Apón (Ver figura 5-9).

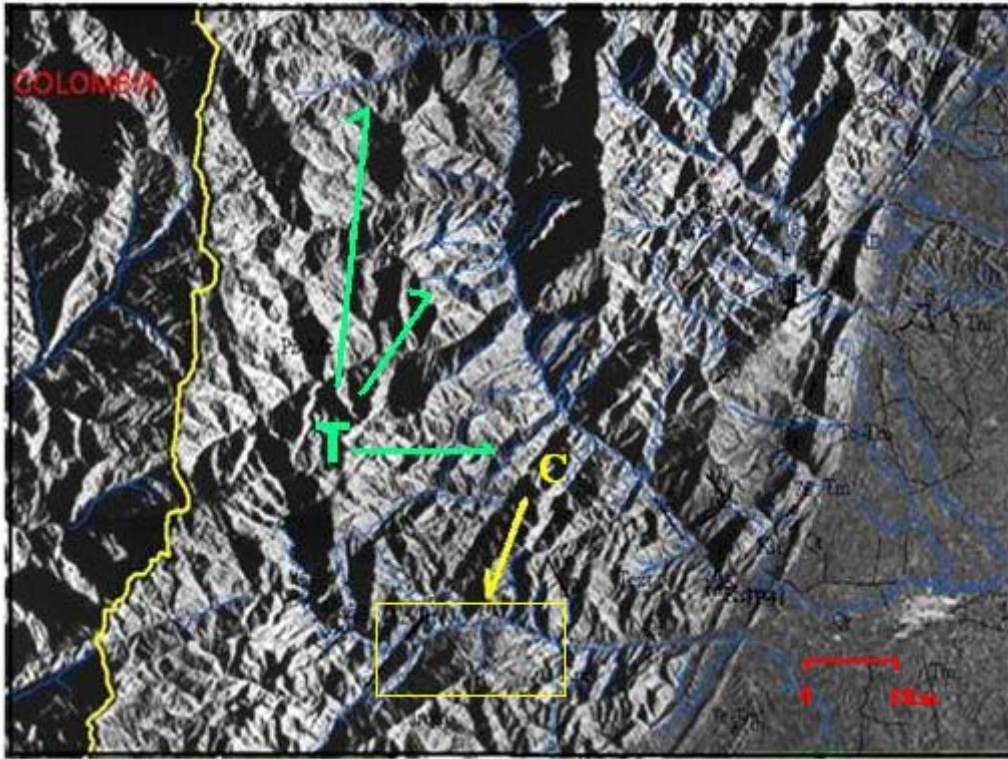


Figura 5-9 Hidrografía de la zona montañosa inferida a través de la imagen de radar.

Con la aplicación de la corrección MNF de la imagen Landsat 7, se resaltó de manera satisfactoria la red hidrográfica de la zona llana (Zona A), destacando los cursos meandricos de los Ríos Negro, Apón y Macoita, en ésta zona. Lo que coincidió con los trabajos realizados por la Creole Petroleum Corporation C.A. (1954) (Ver Figura 5-10, 5-11, 5-12).

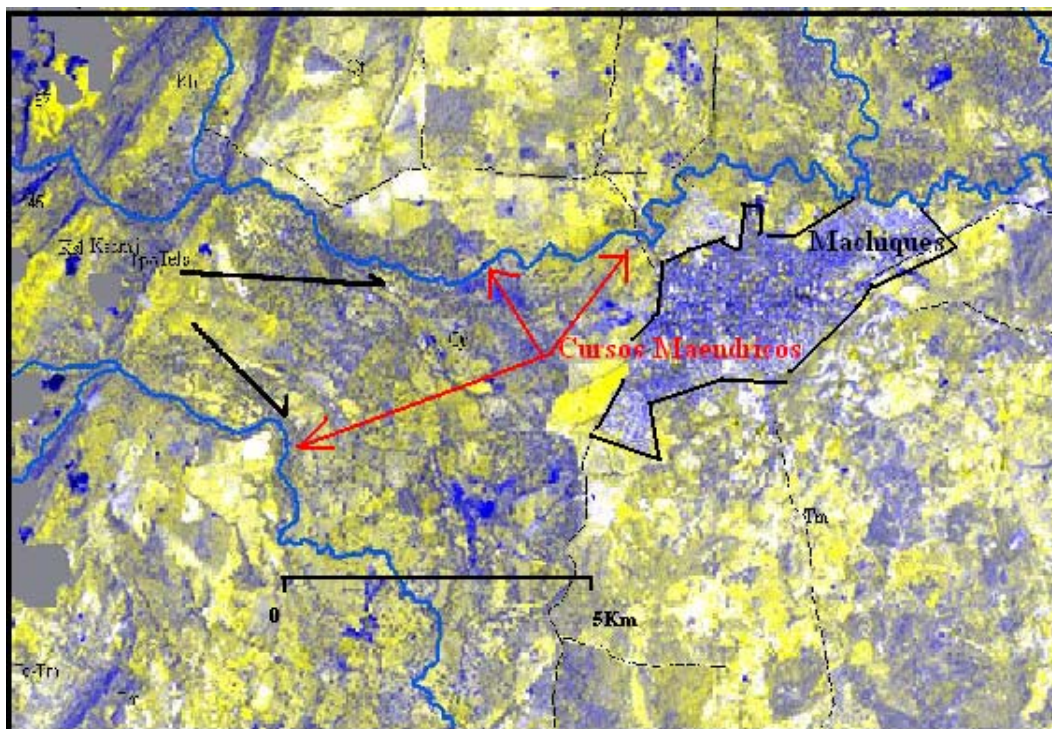
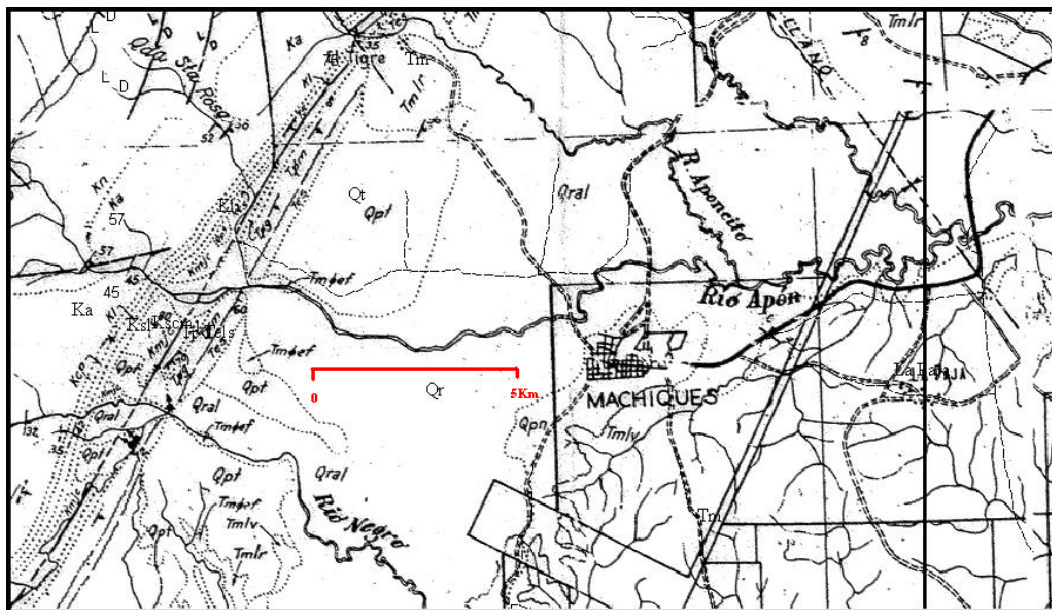


Figura 5-10 Drenajes observados por el realce de los pixeles en la imagen de la corrección MNF.



presencia de fallas en la zona central de la Sierra de Perijá, con los postulados de TESTAMARK *et al* (1994), en cuanto a la existencia de fallas reactivadas del Jurásico y Cretácico, y con los trabajos de De Toni (1998), también sobre fallas reactivadas de edad Jurásico, lo que en correspondencia con el análisis de la imagen *Landsat 7*, y la radargrafía de la zona, determinó la ubicación de la principal estructura del sector, la Falla de Perijá F1 (Ver figura 5-13)

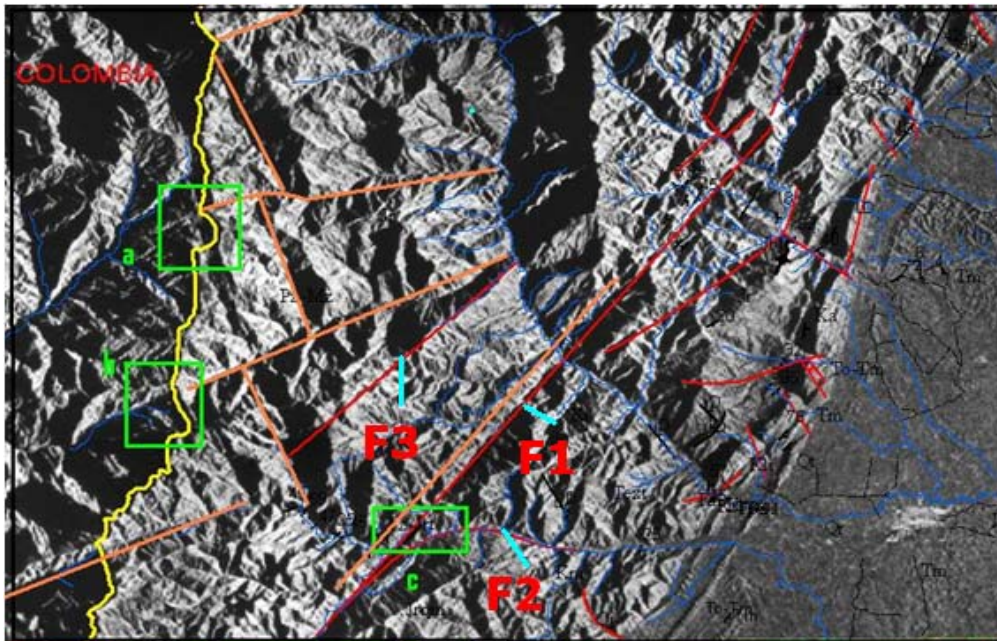


Figura 5-13 Imagen de radar con Fallas hacia el sur F1, F2, F3 interpretadas, y hacia el norte fallas menores inferidas por estudios previos.

Otras estructuras han sido tomadas de estudios previos, como los realizados por la Creole Corporation C.A, (1954) y nombrados por Audemard (1991) como estructuras de semigrabenés (Jurásicos), cartografiadas igualmente en el mapa Mosaico Guaraní (1954) (ver figura 5-14).

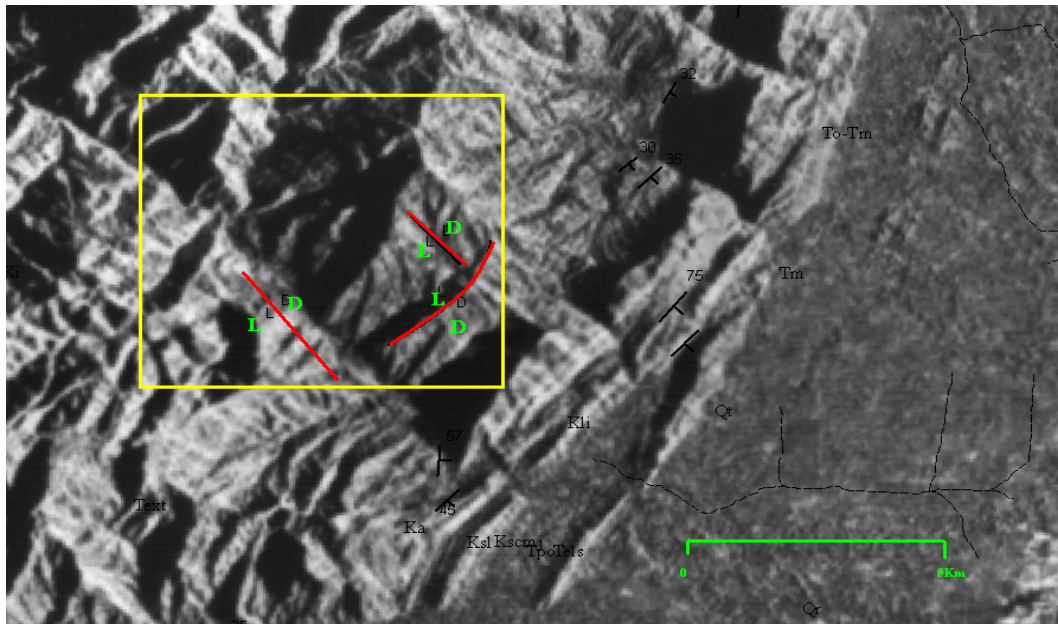


Figura 5-14 Grabenes propuestos por la Creole Petroleum Corporation, en el mapa Mosaico Guaraní (1954)

El corrimiento presente en la zona de estudio se observó por el análisis de la imagen de radar, éste presenta un rumbo promedio de N20°E (Ver figura 5-15), y fue comparado por estudios estructurales previos donde se determinó que existía correspondencia con lo propuesto por E. I. G. LITOS C. A (1997), en el mapa geológico a escala 1:100.000 del flanco sur oriental de la Sierra de Perijá (Ver figura 5-16).

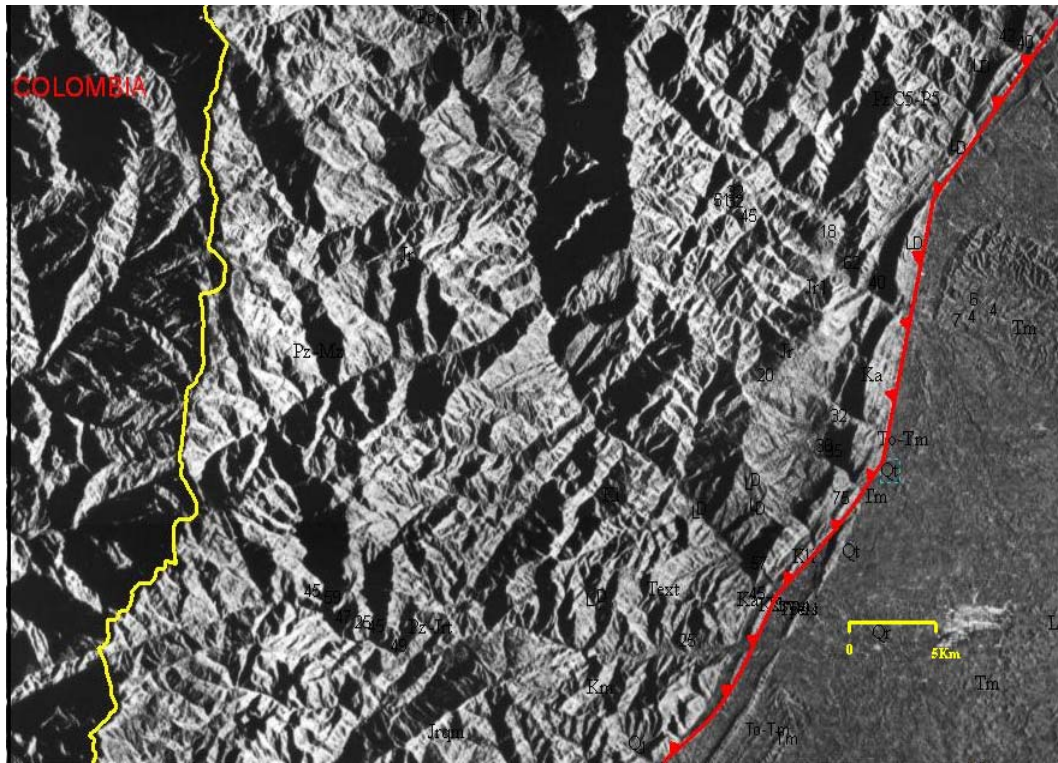


Figura 5-15 Imagen de radar donde se muestra en la línea roja la interpretación de corrimiento con dirección N20°E aproximadamente.

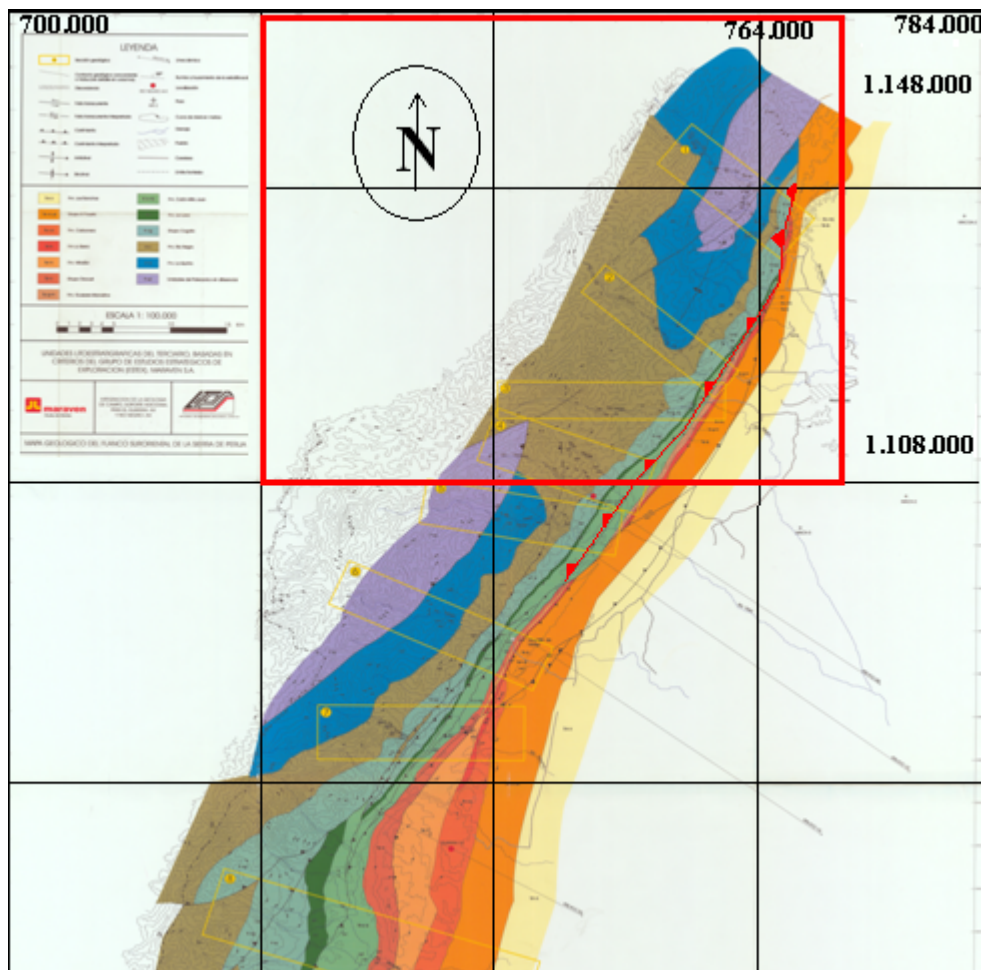


Figura 5-16 Mapa geológico a escala 1:100.000, E. I. G. LITOS C. A. (1997). *Integración de la geología de campo. Soporte adicional para el Guaraní-AX y Río Negro-AX, PDVSA-Maraven.*

5.1.4 Análisis litológico

En términos generales se observan dos dominios litológicos bien diferenciados, uno que corresponden a un material competente expresado por una topografía de relieve abrupto, con rasgos acentuados y con una clara tendencia rectilínea, y otro con litología menos competente, de topografía llana caracterizada por formas y contornos suaves y con tendencia sinuosa (Ver figura 5-17)

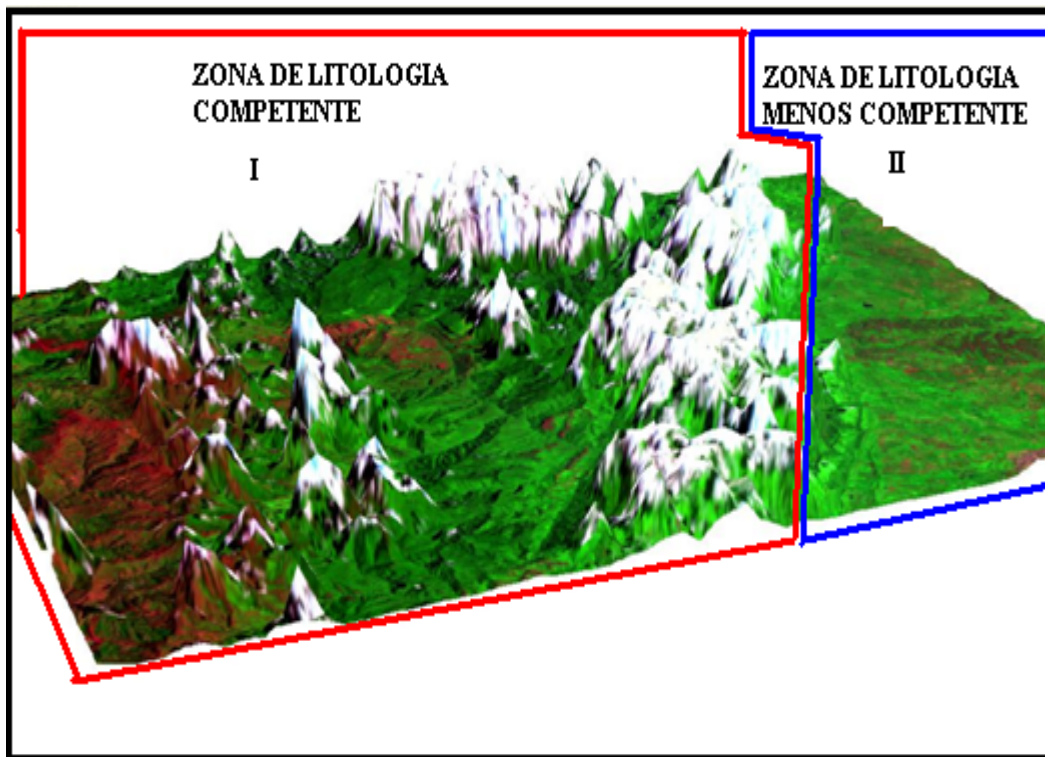


Figura 5-17 Imagen de modelo de elevación 3D donde se muestra el contraste litológico de la zona de estudio.

Una vez definidos los tipos litológicos presentes en la zona, obtenidos de la interpretación tanto de la imagen Landsat 7 ETM+ como de la radargrafía se analizaron las propuestas de varios autores en sus estudios previos de campo para hacer una compilación de dicha información y establecer bajo criterios propios la mas certera.

Para corroborar la existencia, tanto de los cambios litológicos como los contactos entre ellos, se utilizaron varias herramientas y correcciones de las imágenes Landsat 7 ETM+, como es el caso de la clasificación no supervisada realizada en ENVI 4.2, la cual permitió inferir la ubicación de los distintos elementos litológicos presente en la extensión de la imagen. (Ver figura 5-18)

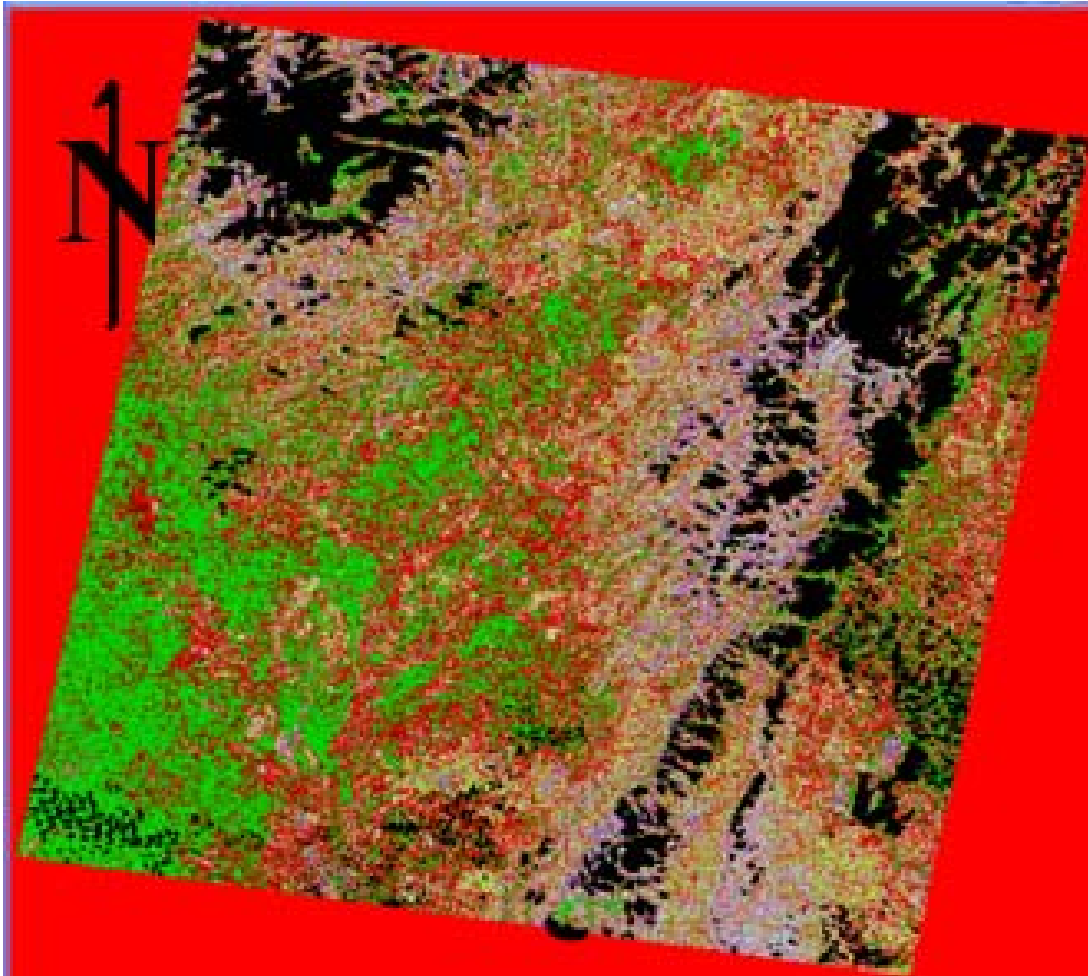


Figura 5-18 Imagen de clasificación no supervisada, donde se muestran las distintas litologías en colores propuestas por el *software*, las nubes en color negro, zonas de rocas poco competentes en verde, color violeta, rocas competentes generalmente metamórficas.

5.1.5 Contactos litológicos

Para establecer los contactos entre las distintas litologías presentes en la zona de estudio se utilizaron firmas espectrales, donde se realizó un barrido por toda la imagen, enumerando clases para cada uno de los píxeles tomados y comparándolos con distintas clases asignadas en la misma imagen, donde se indicaron similitudes litológicas para aquellas firmas espectrales de igual

comportamiento en la gráfica de Reflectividad/Longitud de ondas (μm) (Ver figura 5-19).

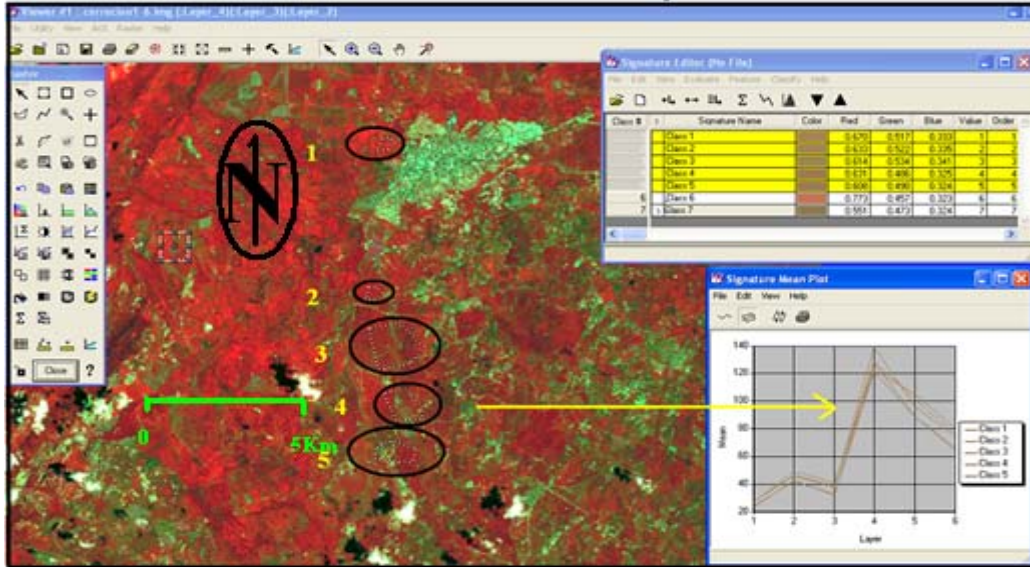


Figura 5-19 Imagen Landsat, muestra la ubicación de distintas clases seleccionadas en pixeles de igual tonalidad (en color negro) para comprobar similitud de la litología. En la parte inferior derecha se muestra un cuadro con las firmas espectrales con el mismo comportamiento.

Uso de la corrección SAM

Esta herramienta fue utilizada para establecer los límites entre litologías de edad más recientes, ubicadas al Este de la zona de estudio, donde se realizaron los contactos entre Mioceno y Pleistoceno (Ver figura 5-21), estos resultados fueron comparados con los estudios realizados por Chaplet (1999) (Ver figura 5-22)

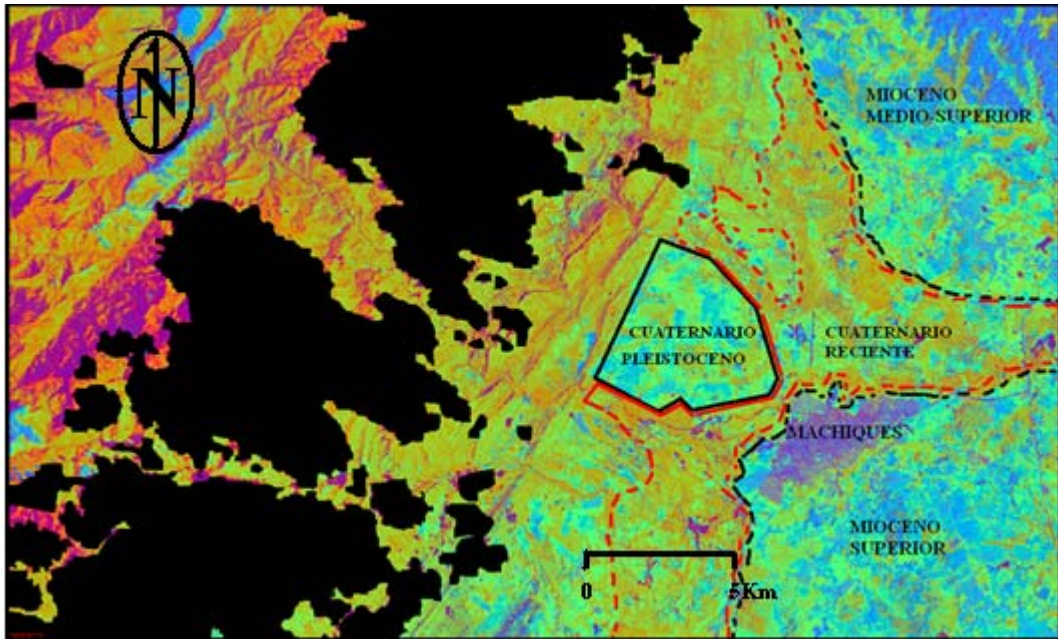


Figura 5-20 Corrección SAM para realce de contactos entre Cenozoico y Cuaternario.

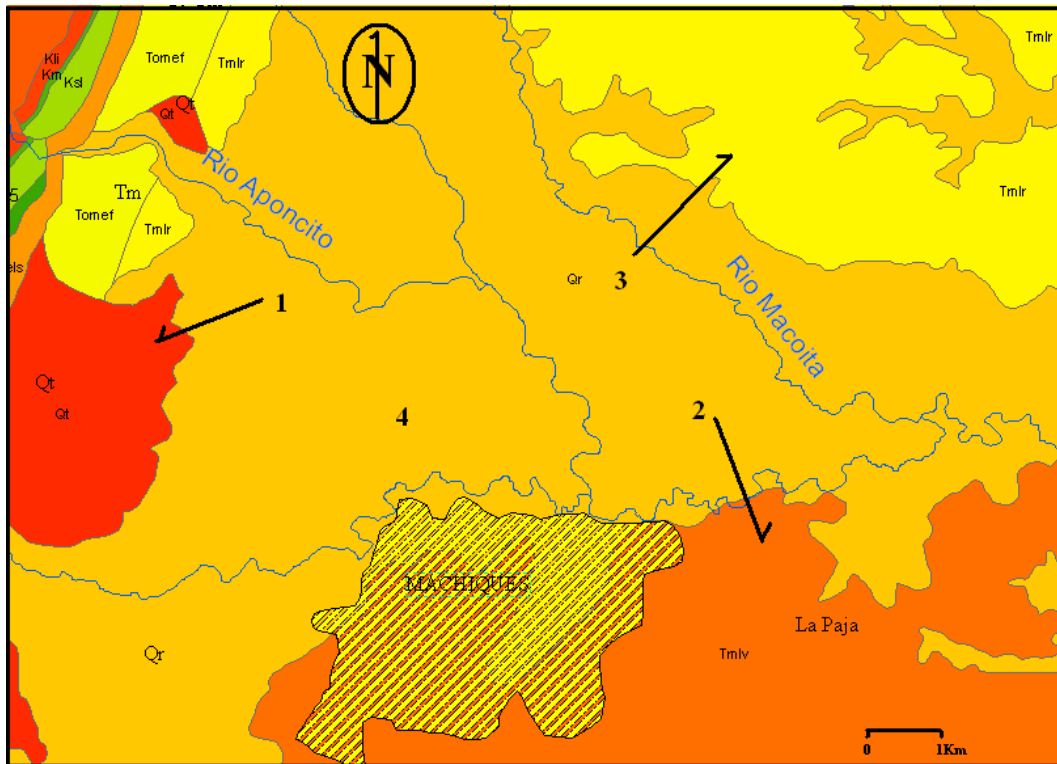


Figura 5-21 Tomado y modificado del mapa geológico de Chaplet (1999), muestra la terrazas cuaternarias Qt (1), La Villa Tmlv (2), Los Ranchos Tmlr (3), y 4 Cuaternario reciente. Muestra correspondencia con lo observado en la imagen Landsat.

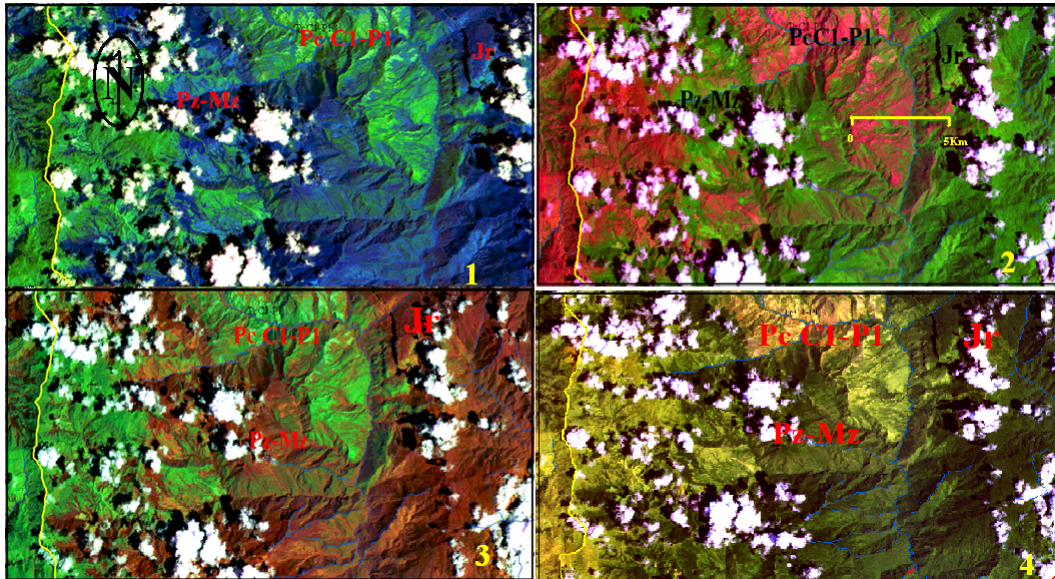


Figura 5-22 Imágenes Landsat con distintas combinaciones de bandas para definir el contacto entre Paleozoico y Mesozoico al noroeste de la zona de estudio. (Imagen 1: 2Red, 4Green, 5Black; imagen 2: 6Red, 4Green, 1Black; imagen 3: 4Red, 5Green, 2Black; imagen 4: 2 Red, 5Green, 3Black)

Una vez observadas las diferencias entre los pixeles de la imagen a través de las combinaciones de banda se comprobó por medio de firmas espectrales los contactos entre las rocas, los puntos clave para asignar dichas clases fueron los cambios notables entre los pixeles de la imagen, de esta manera se estimaban los posibles contactos, lo que permitió reducir el trabajo, un ejemplo claro se puede observar en la figura (5-24), donde se observaron cambios en los colores de rocas

de edad Paleozoicas y Mesozoicas, las cuales fueron corroboradas con los estudios previos realizados en la zona.

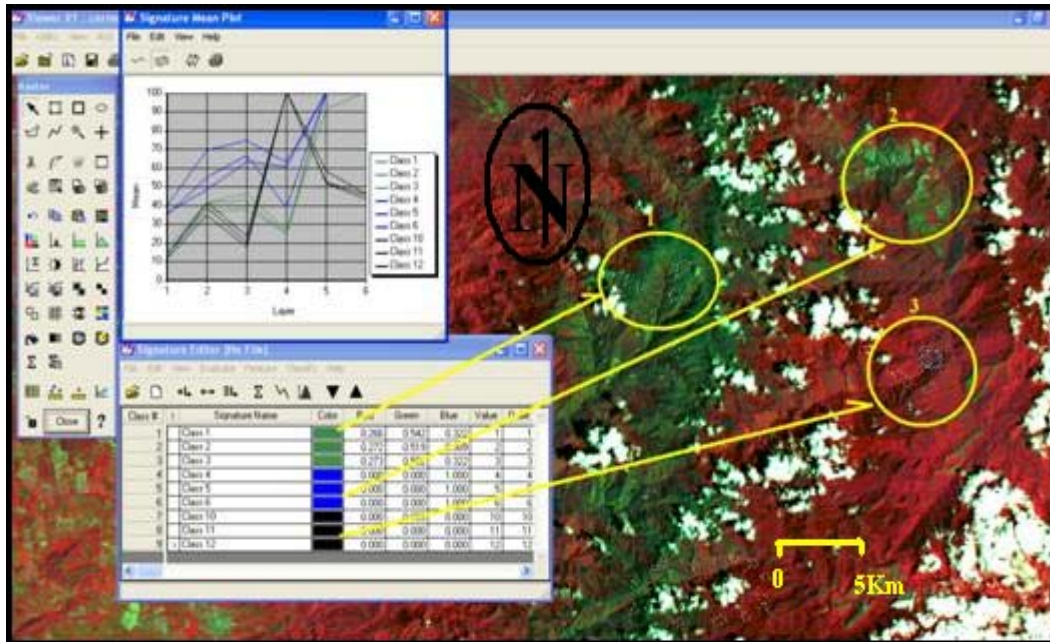


Figura 5-23 Imagen Landsat en ERDAS 8.6, se muestran 3 clases de pixeles que definen tres formaciones distintas.

Las firma espectral fue la herramienta definitiva empleada para establecer en términos generales los contactos entre las distintas litologías presentes en la zona de de estudio, (Ver figuras 5-25, 5-26, 5-27).

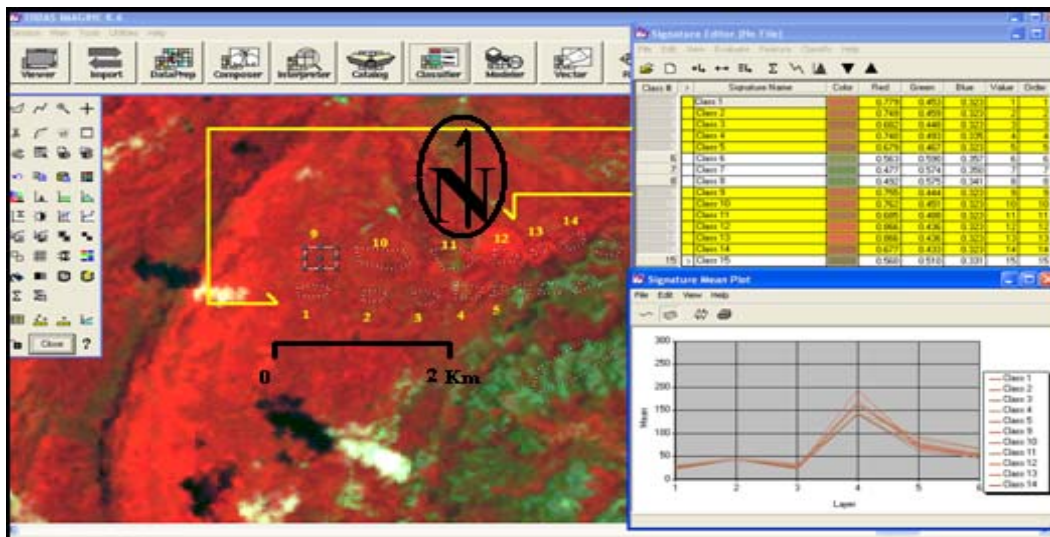


Figura 5-24 Clases definidas para ubicar los límites entre el Grupo el Fausto y Formación Los Ranchos.

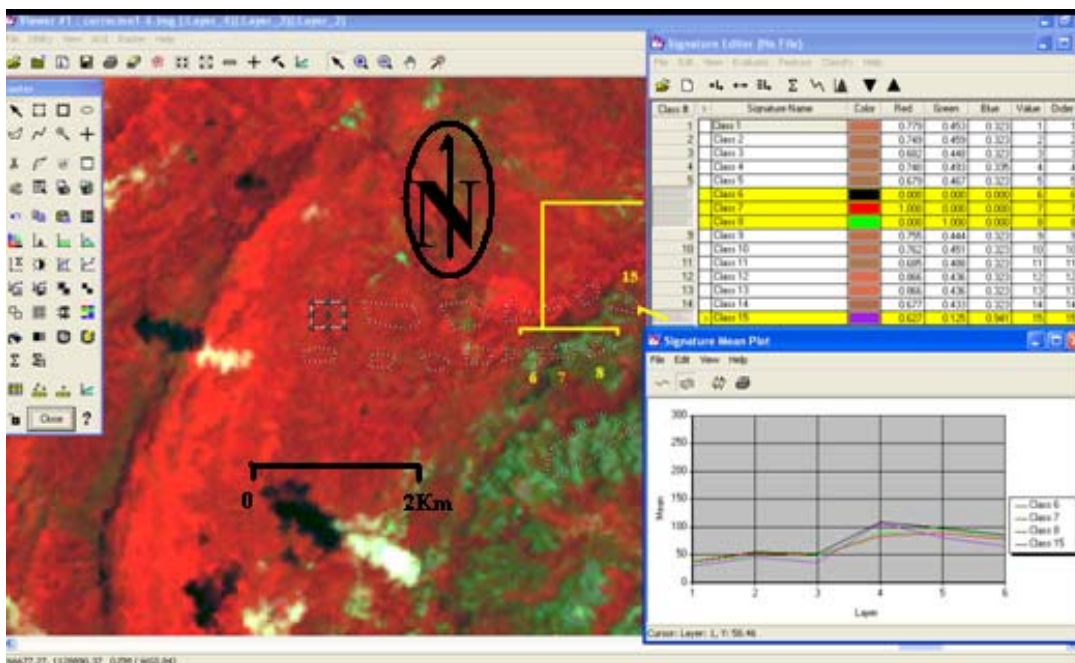


Figura 5-25 Firmas espectrales para ubicar los límites de la formación Los Ranchos.

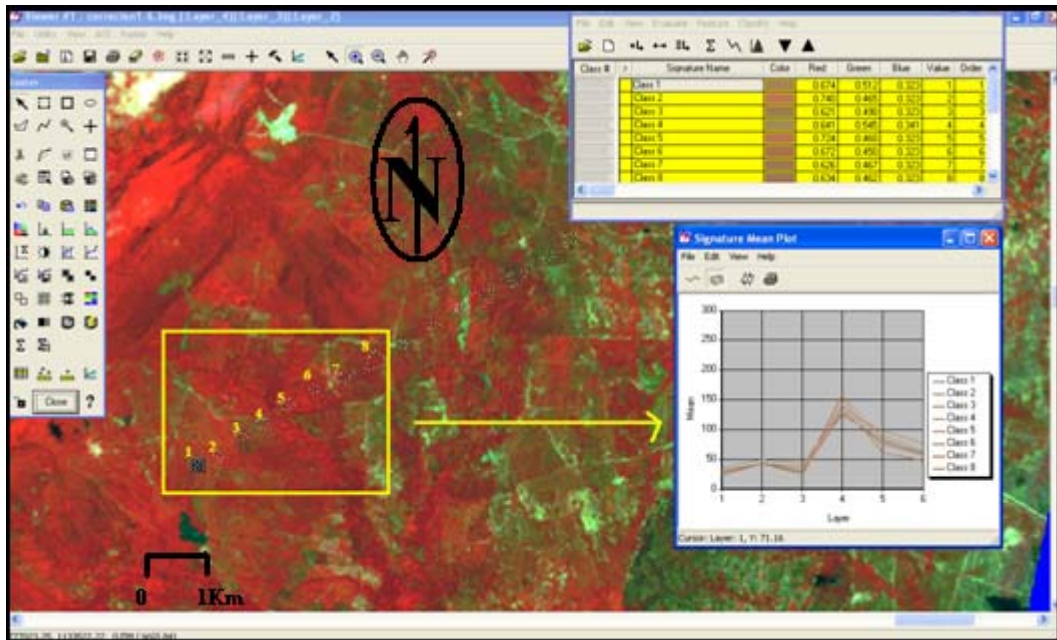


Figura 5-26 Firmas espectrales aplicadas para definir el Cuaternario Reciente.

Las clases de las firmas espectrales fueron realizadas en toda la imagen entre los límites de la zona de estudio, una vez obtenidos los resultados se comparó con los mapas realizados previamente en la Sierra de Perijá, obteniendo una correspondencia entre los estudios previos y los resultados obtenidos a través de la interpretación de las imágenes en más de un 90%, como resultado final se obtuvo el mapa geológico actualizado a escala 1:100.000 (Ver figura 5-28).

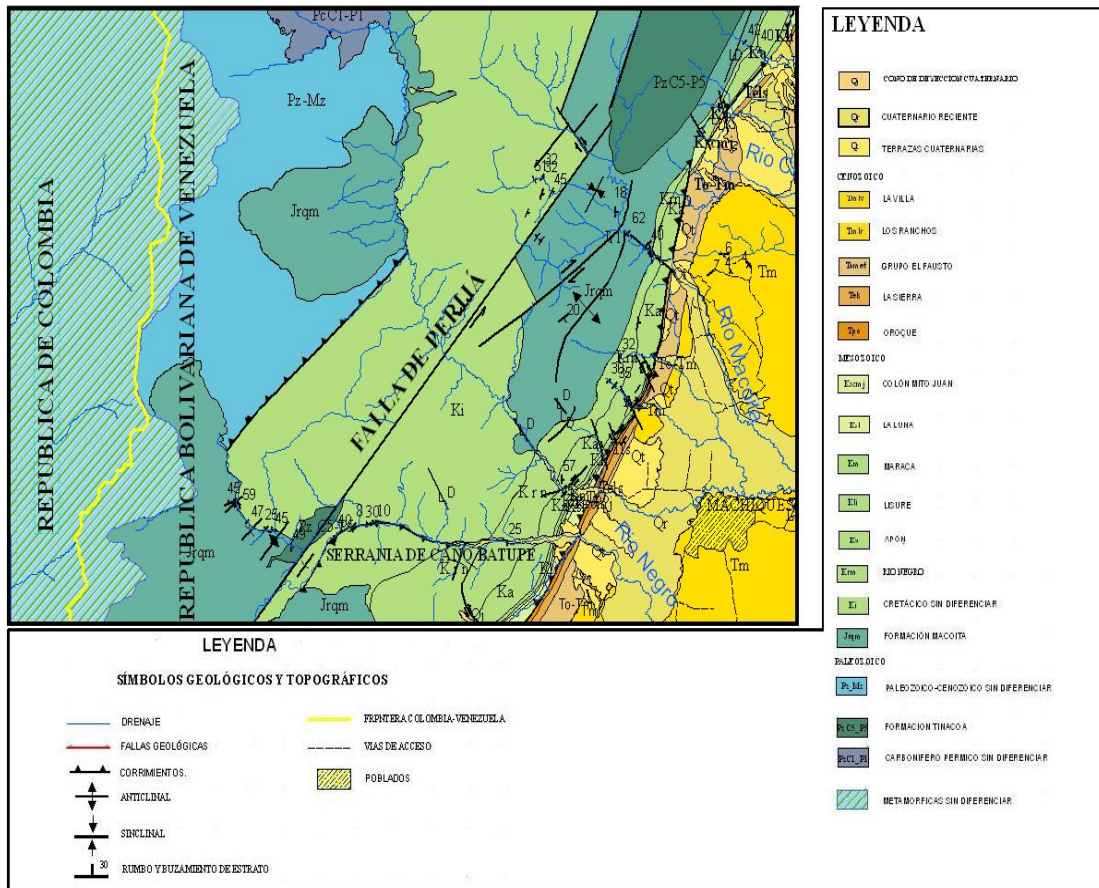


Figura 5-27 Actualización del Mapa geológico Machiques a escala 1:100.000 Guillón D. & Ghersi J. (2008).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Audemard, F. (1991). Tectonic of western Venezuela. Rice University. Houston 245 p. PhD. Tesis Inédita.
- Bally A. (1984). Structural styles and the evolution of sedimentary basins. Houston Rice University. Short course AAPG. 238 p.
- Bellizia, G., Pimentel M, Y Bajo O. (1976). Mapa geológico estructural de Venezuela: compilación. Ministerio de Minas e Hidrocarburo. Caracas Foninves. Escala 1:500000.
- 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.
- Bernal, A. (1997). Migración, adaptación del modelo de velocidades e interpretación de una línea sísmica en el flanco perijanero. Caracas, USB. Escuela de Geofísica. 109 p. Trabajo Especial de Grado. INEDITO.
- Bowen. (1972). Estratigrafía del Pre-cretácico en la parte norte de la Sierra de Perijá. IV Congreso Geológico. Venezolano. Caracas. Memorias T(II) 5 p: 227-238.
- Carrero D., Franklin J., Infante, J. (2004). Clasificación mineralógica del cerro Bolívar y el cuadrilátero San Isidro a través del análisis multiespectral, utilizando imágenes de satélites Landsat 7 ETM+. P: 215.
- Case J.E., Shagan R. Y Giegengack R. (1990). Geology of the northern Andes; an overview. En Dengo G.y Case J. E. (Eds) The Caribbean region. GSA publicación especial (the geology of North America) V: H, (/). P: 177-200.
- CHAPLET M. 1999. Relaciones *tectónicas entre la Sierra de Perijá central y la Sierra de Perijá meridional, intervalo Machiques, al norte - río Lora, la sur, Estado*

Zulia - Venezuela. Aguasuelos para PDVSA E & P, Informe Técnico EP-16551, inédito, 33 p

CHAPLET M. 1999. *Mapa geológico de Guaraní*. PDVSA-EP, escala 1:100.000.

Colleta B., Roure F., DE Toni B., Loureiro D., Passalacqua H. y Gou Y (1997). Tectonic inheritance, cristal architecure, and contrasting structural styles in the Venezuelan Andes. *Tectonics* 16 (5). p: 777-794.

Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (1997) Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. <http://www.intevep.pdv.com/ibc03>.

Cooney P. Y Lorente M^a. A. (1997) Implicaciones Tectónicas De Un Evento Estructural En El Cretácico Superior (Santoniense-Campaniense) De Venezuela Occidental. VIII Congreso Geológico. Venezolano. Margarita. Memorias. TI.p: 195-204.

CONSULTORES EGAL 2007. Certificación y validación del campo Guaraní, pozo GUN-1X, inédito, 260 p.

CREOLE PETROLEUM CORPORATION 1954. *Mapa de geología de superficie, Hoja D-2*, escala 1:100.000

CREOLE PETROLEUM CORPORATION 1961. *Mapa de geología de superficie, Hoja E-2*, escala 1:100.000

CREOLE PETROLEUM CORPORATION 1967. *Mapa de geología de superficie, Hojas E-2-C*, escala 1:50.000

CREOLE PETROLEUM CORPORATION 1961. *Mapas de geología de superficie, Hojas E-2-A*, escala 1:50.000

CREOLE PETROLEUM CORPORATION 1954. *Mapas de geología de superficie, Hojas D-2-C*, escala 1:50.000

- De Toni B., Rivero, C. Y Roure, F (1998) Estilo estructural del flanco Suroriental de Perijá: ejemplo de inversión tectónica. IX Cong. Venezolano. Geof., II Conf. Lat.Ame. Geof., ISimp. Inter. Geof. Min. Caracas. Memorias. P: 3-7.
- Duerto L., Audermard F. Lugo J. Y Ostos M. (1998). Síntesis De Las Principales Zonas Triangulares En Los Frentes De Montañas Del Occidente Venezolano. IX Cong. Vnzlano. Geof., II Conf. Lat.Ame. Geof., I Simp. Inter. Geof. Min. Caracas. Memorias. P: 1-10.
- E. I. G. LITOS C. A. 1997. *Integración de la geología de campo. Soporte adicional para el Guaraní-AX y Río Negro-AX, PDVSA-Maraven*, inédito, EP-30929, 38 p.
- E. I. G. LITOS C. A. 1997. *Mapa geológico del flanco suroriental de la Sierra de Perijá*, PDVSA-Maraven, informe EP-30929, escala 1: 100.000.
- Elliott D. (1982). The Construcción Of Balances Cross-Section. En Foster N.H. y Beaumont E.A. (eds) Structural concepts and techniques I: Basic concept, folding and astructural techiques. AAPG. Publicación especial N° 9. 651p.
- Fischer M.P. Y Woodward N. B. (1992). The Geometric Evolution Of Foreland Thrust Systems. En: McClay K.R. (ed) Thrust tectonic London. Chapman & Hall. p: 181-189.
- Ford A. Y Houbolt J.J. (1963). Microfacies Del Cretáceo De Venezuela Occidental. En Cuvillier J. y Schürman H. (eds) Internacional Sedimentary petrographical series Leiden E.J. Brill publicación especial V: VI. 59 p.
- González De Juana C., Iturralte J. Mª Y Picard X. (1980). Geología De Venezuela Y De Sus Cuencas Petrolífera. Caracas. Foninves, 2 tomos. 1031 p.
- González. R. (1999). Interpretación y Balanceo de una sección regional del flanco Suroriental de Perijá (Sierra de Perijá- Costa occidental del Lago de Maracaibo)'' Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- Graf K. (1969). Estratigrafía cuaternaria del noroeste de Venezuela. Asoc. Ven. Geol. Min. Y Petróleo. 12 (11) p: 393-416.
- 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. Estado Zulia, Venezuela. Boletín Geol. Min. Caracas Memorias T(I) 3 p: 351-376.
- Hedberg H. Y Sass L.(1937). Sinopsis de las formaciones geológicas de las partes occidental de la cuenca de Maracaibo, Venezuela. Bol. Geol. Y Min. Caracas. Memorias TII, p: 77-120.
- Kellogg J. (1980). Cenozoico basament tectonic of the Sierra de Perijá, Venezuela and Colombia. IX Conferencia del Caribe Santo Domingo Memorias. P: 107-117.
- Kellogg J.N. Y Bonini W.E. (1982). Subduction of the Caribbean plate and basament uplifts in the overriding south american plate. Tectonics 1 (3) p: 251-276.
- Kellogg J. (1984). Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela-Colombia, and adjacent basins. En Bonini W.E. et. Al., eds. The Caribbean-South American plate boundary and tectonic: GSA memory 162. p:239-261.
- Key C. (1960). Estratigrafía del subsuelo del Alturitas. III Cong. Geol. Venezolano. Caracas. Memorias. TII. P: 511-545.
- Lugo J Y Mann P. (1995). Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. En Tankard A.J., Suarez S.R., y Welsink H.I. (eds)., *Petroleum basin of South America* AAPG. Memoir 62.p: 699-725.
- MARTÍNEZ J. A. 1999. *Interpretación del Campo Guaraní, Sierra de Perijá, Estado Zulia-Venezuela*. PDVSA-Intevep, Los Teques, inédito en CD-PDD Guaraní, 6 p.

- Maze W. (1984). Jurassic la Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: Geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks. En Bonini W.E. et. Al., (eds) The Caribbean-South American plate boundary and tectonic: GSA memoir 162.p: 263-282.
- Maze W. Y Hargraves R. (1984). Paleomagnetic results from the Jurassic la Quinta Formación in the Perijá range, Vnezuela, and their tectonic significance. En Bonini W.E. et. al. (eds) The Caribbean-South American plate boundary and tectonic: GSA memoir 162.p: 287-293.
- Mcclay K.R. (1990). Glossary of tectonics terms. En McClay K.R. (ed) Thrust tectonic.London. Chapman & Hall. p: 419-433.
- Mcclay K. (1990). Thrust faults in inverted extensional basins. En McClay K.R. (ed) Thrust tectonic.London. Chapman & Hall. p: 93-104.
- Mendoza V. (2005). Geología de Venezuela”. Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar.
- Miller J., Y San Juan J. (1963). Some Tertiary stratigraphy and revision of Tertiary nomenclatura, western Maracaibo Basins, Vnezuela. Asoc. Ven. Geol., Min. Petr., Bol. 6 (3): 63-96.
- Mitra S. (1993). Geometry and kinematic evolution of inversion structures. AAPG 77, (7),p: 1159-1191.
- Morley C. (1986). A classification of thrust fronts. AAPG 70 (1) p: 12-25.
- Mount V., Suppe J. Y Hook S. (1990). A forward modeling strategy for balancing cross sections. AAGP 74, (5) p: 521-531.
- Ostos R. M. (1990) Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe. GEO (30) p:1-294.

Parnaud, E., Gou Y Pascual J.C., Capello M.A., Truskowky I., And Passalacqua H. (1995). Stratigraphic síntesis of western Venezuela en Tankard A. J., Suarez S. R., y Welsink H. I., Petroleum basin of South America AAPG. Memoir 62. p: 699-725.

Price R. (1986). The southeastern Canadian cordillera: thrust faulting. Tectonic wedging and delamination of the lithosphere. JSG 8 (3/4). P: 239-254.

Steinitz G. Y Maze W. (1984). K-Ar ages on horblende-andesite from the Sierra de Perijá, western Venezuela. En Bonini W.E. et. Al., (eds) The Caribbean-South American plate boundary and tectonic: GSA memoir 162. p: 283-285.

Sutton F.A. (1946) Geology of Maracaibo Basin, Venezuela. AAPG 30 (10)p: 1621-1742.

Vans M. Suppe J. Y Hook S. (1990). A forward modeling strategy for balancing cross sections. AAPG 74 (5) p: 521-531.

Woodward N., Boyer S. Y Suppe John. (1989) balanced geological cross sections: An essential technique in geological research and exploration. En Crawford M^a. L. Y Padovani E. Short course in geology Washington, D. C. AGU. (6) 132p.

Wiao H. Y Suppe J. (1992) Origin of rollover. AAPG 76 (4). P: 509-529.

http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S000448222005000100011&script=sci_arttext&tlng=es/rs1.pdf.

ANEXOS

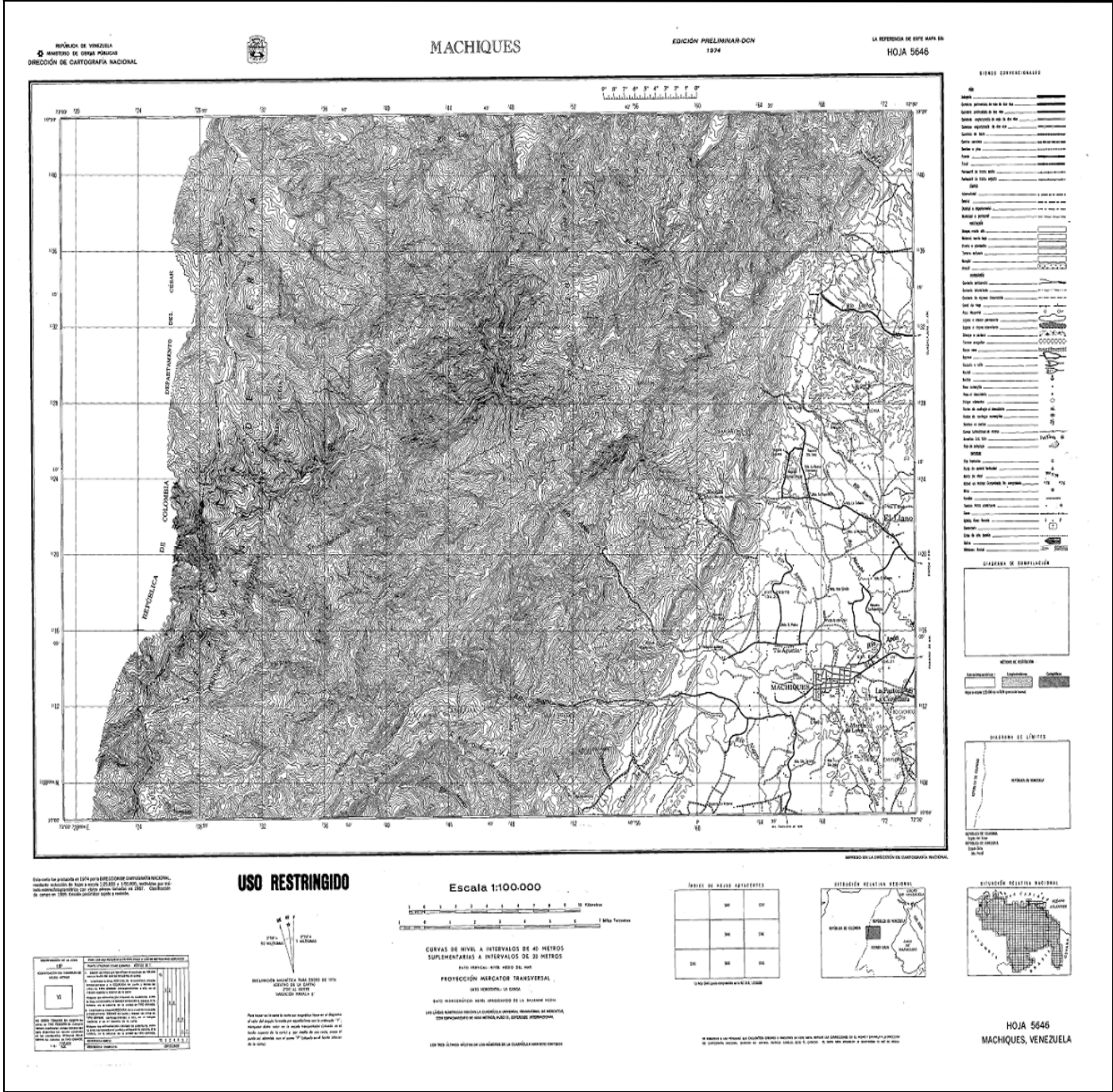


Figura A1 Mapa topográfico de la región de Machiques a escala 1:100.000, hoja 5646.

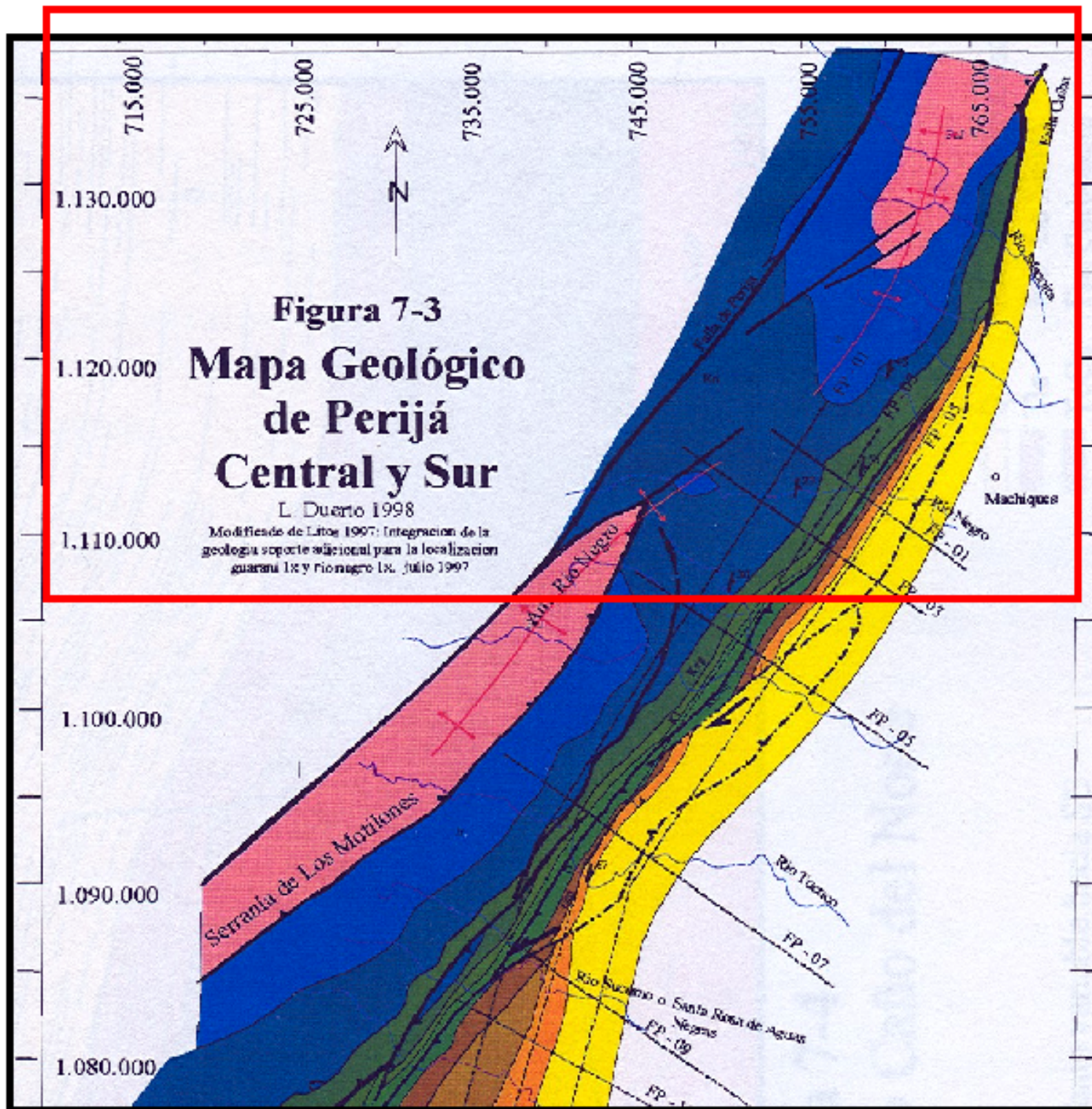


Figura A2 Mapa Geologico de Perijá Central y Sur, DUERTO L. (1998). A escala 1:750.000. Limites de la zona de estudio definida por el cuadro de color rojo.

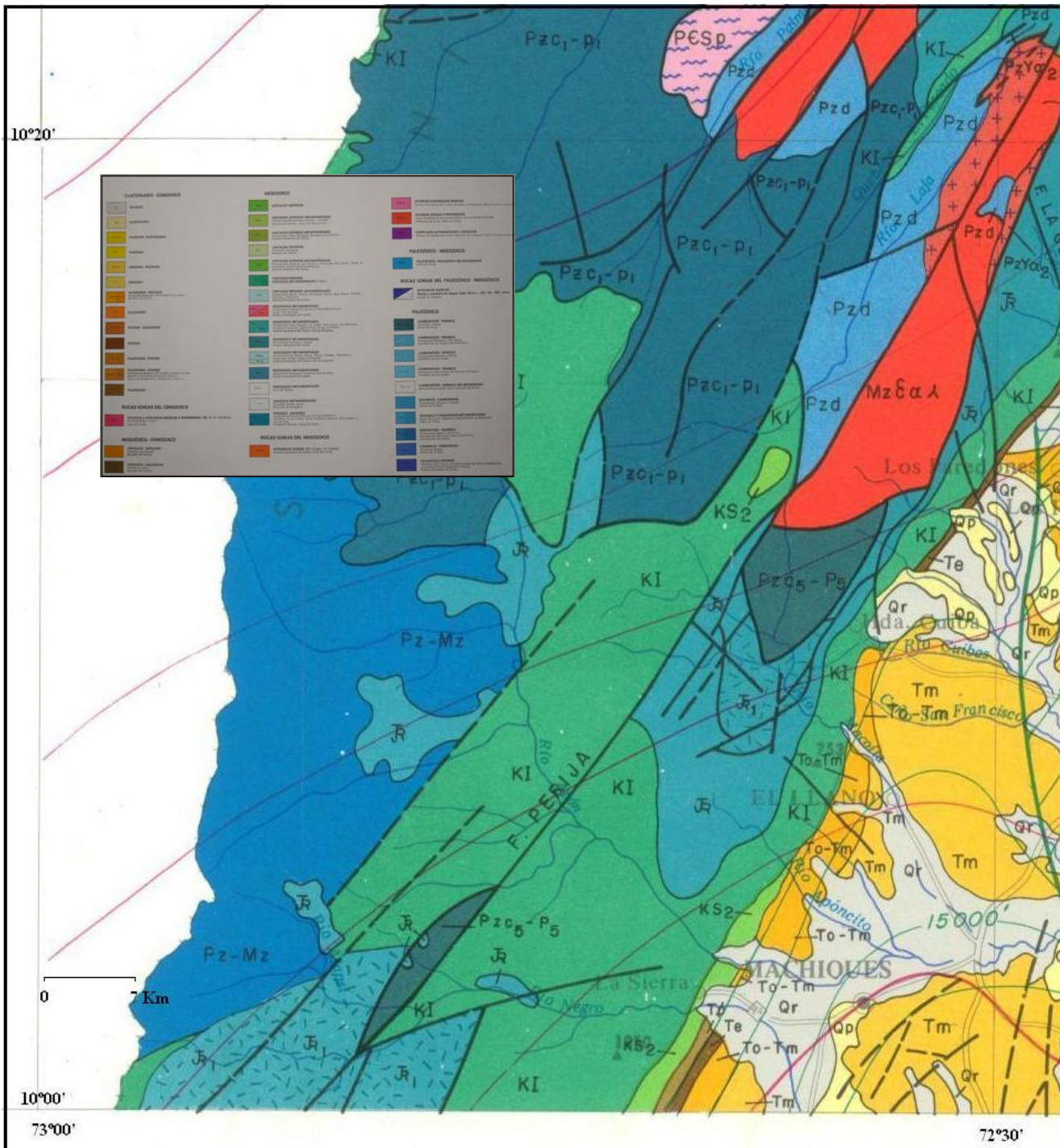


Figura A4 Mapa geológico de la Sierra de Perijá a escala 1:500.000, BELLIZZIA, G. (1976).

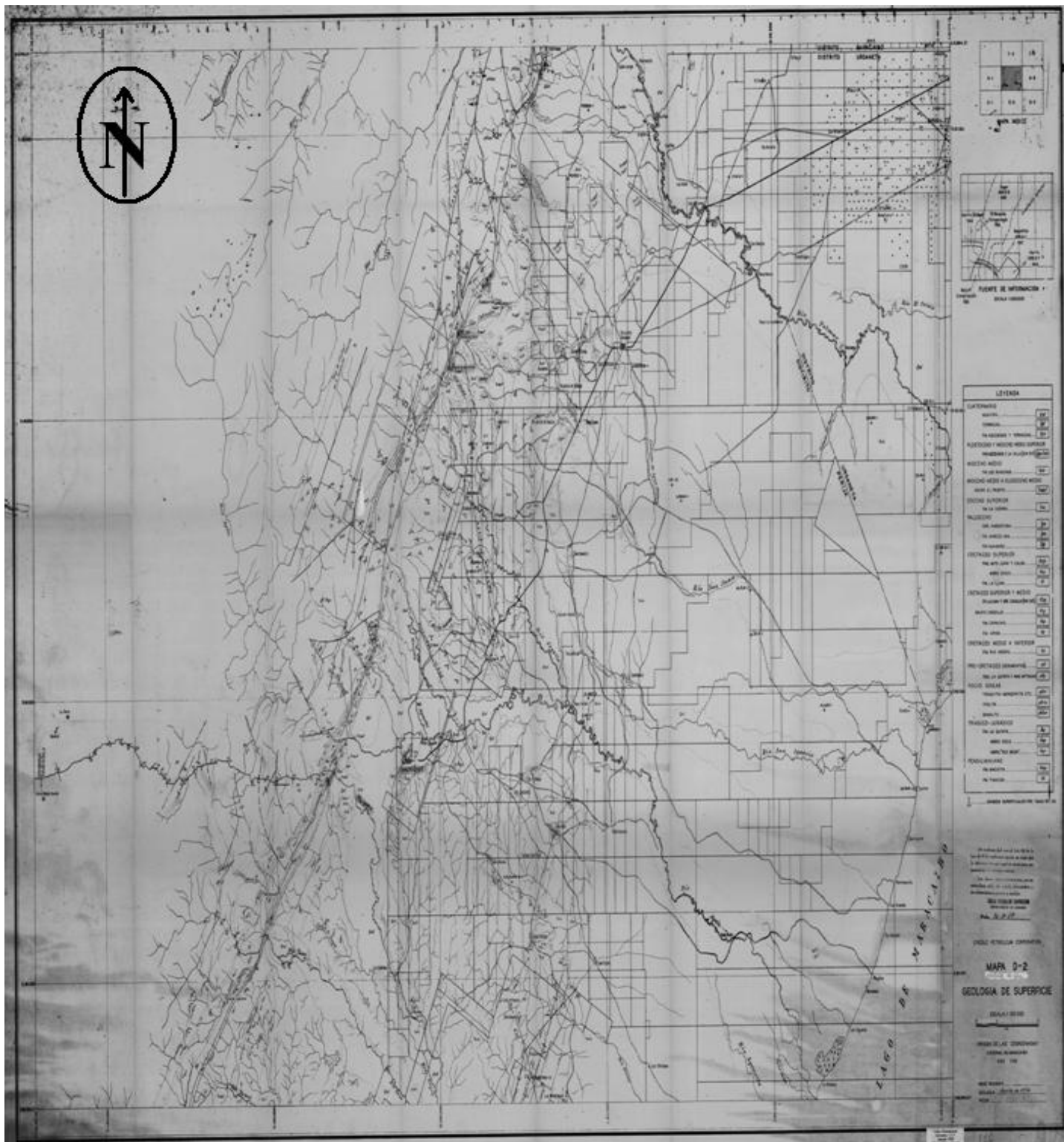


Figura A6 CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1954). *Mapa de geología de superficie, Hoja D-2 a escala 1:100.000.*

