TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA ORIENTAL DE FALCÓN, AL SUR DEL ALTO DE ESPERANZA-GUACHARACA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por Guzmán D.,Yenilit S.
Morillo B., Zoraida A.
Para optar al Título de Ingeniera Geóloga

Caracas, Noviembre 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA ORIENTAL DE FALCÓN, AL SUR DEL ALTO DE ESPERANZA-GUACHARACA

TUTOR ACADÉMICO: Dra. Olga Rey
COTUTOR ACADÉMICO: Ing. Mauricio Hernández

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por Guzmán D., Yenilit S.
Morillo B., Zoraida A.
Para optar al Título de Ingeniera Geóloga

Caracas, Noviembre 2009

Caracas, noviembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleras Yenilit Guzmán y Zoraida Morillo, titulado:

"ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DE LA ZONA ORIENTAL DE FALCÓN, AL SUR DEL ALTO DE ESPERANZA-GUACHARACA"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Titulo de Ingenieras Geólogas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el (los) autor (es), lo declaran APROBADO

Prof. Orlando Cabrera	Prof. Lenin González
Dra. Olga Rey	Prof. Mauricio Hernández

AGRADECIMIENTOS

Yenilit S. Guzmán D.

Agradezco a la persona que decidió enviarme a conocer este mundo, el que me regalo la vida, el que siempre me escucha, me comprende, me apoya, me da salud, fortaleza, sabiduría, alegría y mil cosas más que me ayudan a caminar, crecer y lograr sueños, todo a cambio de recibir AMOR de mi parte. Gracias mi diosito por estar siempre a mi lado, lo ADORO.

Le doy las gracias a todas las personas que cuando más los necesité me brindaron su apoyo, colaboración y me regalaron palabras que me ayudaron a nunca decaer en los momentos difíciles, mis Tíos (Oneida, Ledys, Pedro, Toña, Irene, Piedad), mis amigos (Betssymar, Zaditza, Vanessa, Zora, Sinaí, José, William), mi novio (Jesús Mejías), mis hermanos (Jesús M., Angie), mis primos (Edrain, Marión, Rosmelys, Soleidys, Delys), Marioxi Liendo y flia, Wencesla Medina. Gracias a los Profesores Olga Rey, Ricardo Alezones, Paúl Romero, y Ruthman Hurtado.

Por último (pero no las menos importantes), agradezco a las personas que me trajeron a este mundo:

Madre: gracias por su lucha para darme una vida mejor, gracias por su sacrificio, esfuerzo, compresión, apoyo, paciencia, colaboración y amor. Le regalo este triunfo, la quiero mucho…

Padre: gracias por su ayuda, sacrificio, apoyo, colaboración, comprensión y amor. Lo quiero mucho…

Abuela: gracias por TODO, gracias por EXISTIR. La ADORO…

Los quiero a TODOS

Atentamente

Yenilit S. Guzmán D.

Zoraida A. Morillo B.

Agradezco...

Ante todo gracias a DIOS, por permitirme realizar mis metas.

A mis padres (Víctor y Esperanza) por traerme al mundo, enseñarme los valores de la vida darme todo su apoyo amor, comprensión, dedicación y por estar siempre allí juntos cuando los he necesitado…..Los AMO!!!

A mis hermanos (Vitico, Keili, Moi y Ana), mis sobrinos (Víctor Simón, Viky, Valen y Cami), los adoro pedacitos de cielo.

A mi novio (Franco), por su apoyo y comprensión, a mis cuñadas en especial (Clari y Rossy)

A mis amichis GRACIAS POR SOPORTARME y por estar siempre a mi lado cuando los he necesitado (Suje, Sinaí, Zaditza, José, William, Angélica, Xiomara, Katherine, Patricia, Yoxe y Gusi).

A la profesora Olga Rey, mil gracias por su apoyo, sus concejos y dedicación en los momentos más importantes. MIL GRACIAS PROF!!!!!.

Al profe Mauricio Hernandez, gracias por su apoyo y comprensión.

A los profesores (Ricardo Alezones, Ruthman Hurtado) por sus concejos y apoyo incondicional

Mil gracias a todos por ser gran parte de mi vida….

´´Cuando quieres realmente una cosa, todo el Universo conspira para ayudarte a conseguirla´´.

Paulo Coelho

YENILIT GUZMÁN Y ZORAIDA MORILLO

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA EN LA PARTE ORIENTAL DE FALCÓN AL SUR DEL ALTO LA ESPERANZA–GUACHARACA

Tutor académico: Olga Rey
Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería
Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2009, 143p.

Palabras claves: Cartografía, Falcón, Cuenca de Falcón, Subcuenca del Hueque, Imágenes de radar, Imágenes Landsat 7 ETM, Terciario.

Resumen

El presente trabajo se realizó en la parte suroriental del estado Falcón, al sur de Alto La Esperanza–Guacharaca; en un área de aproximadamente 65 Km². El propósito de la presente investigación consistió en la actualización geológica de la zona mediante la elaboración de un mapa geológico a escala 1:50.000. Para ello fue necesario complementar la información de la cartografía geológica y unificar los criterios de los diferentes autores, mediante la interpretación de imágenes de radar, la clasificación supervisada y no supervisada de las imágenes *Landsat* 7 ETM, que ayudaron a realzar características geológicas en la zona, y finalmente, a generar el mapa geológico digitalizado a escala 1:50.000, bajo la plataforma ArcGIS. Por medio de los resultados obtenidos en el trabajo de campo, compilación bibliografía, trabajos previos e imágenes satelitales (*Landsat* 7 ETM), se interpretaron en la zona siete formaciones, que desde la más antigua a la más joven son las siguientes: Cerro Misión, Guacharaca, San Lorenzo, Pozón, Casupal, Agua Linda, Capadare y Ojo de Agua; abarcando un período de sedimentación desde el Eoceno Tardío al Mioceno Tardío. Además, al sur de la zona de estudio se encontraron cuatro macizos ígneos-metamórficos (cerros Tarana, La Zurda, San Quintín y Salsipuedes) y unas intrusiones ígneas en la zona de Sanare - Buena Vista. Las unidades litológicas arrojaron distintos resultados ante las imágenes satelitales donde influyó la composición litológica de cada una de estas unidades, obteniendo que las formaciones Casupal y Capadare son las unidades más competentes y distintivas (por la concentración de pixeles y uniformidad de colores), al igual que las litologías de menor competencia (formaciones Agua Linda y Ojo de Agua) que presentaron una coloración permanente. A diferencia de las litologías poco competentes (Formación Cerro Misión, Grupo Agua Salada), no proporcionaron información alguna para delimitar sus contactos formacionales. Estructuralmente, se obtuvo que la interpretación de la radargrafía resulta ser de mayor precisión para la identificación de pliegues y fallas, ya que en la imagen satelital las nubes pueden significar un aspecto engorroso en la interpretación. Todos estos parámetros aportaron información de gran relevancia para aclarar las discrepancias entre los autores con las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1956, 1970, 1997) en cuanto a la documentación de formaciones, demostrando que la formaciones Cueparo y Riecito corresponden con la Formación Capadare, la Formación Guaidima corresponde a la Formación Ojo de Agua y la Formación Bachacal corresponde a la Formación Casupal.

INDICE GENERAL

Pág.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.....1

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.....2

1.2.2 Objetivos específicos.....2

1.3 Localización de la zona de estudio.....2

1.4 Trabajos previos.....5

1.4.1 Trabajos de actualización geológica cartográfica en el estado Falcón.....5

1.4.2 Estudios Geológicos Realizados en Falcón.....5

1.5 Metodología

1.5.1 Etapa Preliminar.....7

1.5.2 Etapa de Campo.....8

1.5.3 Etapa de Oficina.....8

CAPÍTULO II

GEOGRAFÍA FÍSICA

2.1 Fisiografía y relieve.....10

2.2 Drenaje.....11

2.3 Clima.....12

2.4 Erosión.....13

2.5 Vegetación.....13

2.6 Suelos.....14

2.7 Fauna.....14

2.8 Geomorfología.....15

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

3.1 Generalidades……..…….…….……..…..17

3.2 Evolución tectónica de la cuenca de falcón.....17

3.3 Estratigrafía regional.....24

3.3.1 Macizo Ígneo – Metamórfico…….……..…....….32

3.3.2 Rocas Volcánicas de la Zona de Sanare…….…….…….....…34

3.4 Relación tectónica y sedimentación en la cuenca de falcón……36

3.4.1 Ciclo D (Eoceno Tardío)…….... …….……36

3.4.2 Ciclo C (Oligoceno – Mioceno Temprano)…….…..……37

3.4.3 Ciclo B (Mioceno Medio – Tardío)……...…… ….……39

3.4.4 Ciclo A (Plioceno)…… ……...39

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Sistema de información geográfica (SIG)……..41

4.1.1. Técnicas utilizadas en los Sistemas de Información Geográfica…….....…...44

4.1.1.1 Creación de datos……..44

4.1.1.2 Representación de los datos……..44

4.1.1.3 Raster…….44

4.1.1.4 Vectorial…….……45

4.2 Sensores y Satélites……...……..……...46

4.2.1. Características de las imágenes satelitales y percepción remota…….....47

4.2.2 Procesamiento y análisis de imágenes……...……...…53

4.2.3 Satélite *Landsat* 7 ETM……...…….……...….56

4.2.4. *Software* empleados para el procesamiento de imágenes satelitales……...…58

4.2.4.1. *ENVI*…….....58

4.2.4.2 *ArcVIEW GIS* 9.2…….....60

4.2.4.3 *Erdas Imagine*……...……..…...…….....….61

CAPITULO V

ANÁLISIS TOPOGRAFICO

5.1 Generalidades……..…...62

5.2 Interpretación hidrogeológica…….62

5.2.1 Cuenca del río Tocuyo……..……....62

5.2.2. Cuenca del río Aroa……...……..64

5. 3 Interpretación de las unidades topográficas……..……65

5.3.1 Unidad I: Unidad de elevaciones medias……66

5.3.1.1 Tipo 1: Filas elongadas……..…66

5.3.1.2. Tipo II: Colinas incipientes……..67

5.3.1.3. Tipo III: Mesetas degradadas disectadas…….68

5.3.2 Unidad II: Unidad de elevaciones bajas……..69

5.3.2.1. Tipo I: Lomas bajas alargadas……..70

5.3.2.2 Tipo 1I: Colinas lobulares e irregulares…….71

5.3.2.3. Tipo III: Planicie aluvial……...72

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

6.1 Generalidades……...…….74

6.2 Interpretación litológica……..75

6.2.1 Formación Cerro Misión……...75

6.2.2 Formación Guacharaca (Grupo Agua Salada)……..79

6.2.3 Formación San Lorenzo (Grupo Agua Salada)…….82

6.2.4 Formación Pozón (Grupo Agua Salada)……...84

6.2.5 Formación Casupal……86

6.2.6 Formación Agua Linda……...……..90

6.2.7 Formación Capadare……..…93

6.2.8 Formación Ojo de Agua…….…….……104

6.2.9 Depósitos Cuaternarios……...109

6.2.10 Rocas ígneas–metamórficas.....113

6.3 Incongruencias litológicas……117

6.4 Interpretación estructural……..121

6.4.1 Estructuras principales……....122
6.4.1.1. Pliegues……122
6.4.1.2. Fallas……125
CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……..……..130
BIBLIOGRAFÍA……134
ANEXOS……..…143

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio ……3
Figura 1.2 Ubicación de hojas topográficas correspondientes a la zona de estudio……..4
Figura 2.1 Ubicación de las formas del relieve en la zona de estudio ……11
Figura 2.2 Rio Tocuyo sector colonia de Araurima, estado Falcón…….12
Figura 2.3. Bosques perennifolios primarios de montaña al oeste representado por las colinas y lomas amesetadas. Sector La Guacharaca, estado Falcón……..14
Figura 3.1. Cuencas *pull-apart* episuturadas……....18
Figura 3.2 Modelo del orógeno flotacional para la cuenca de Falcón-Bonaire ……...19
Figura 3.3. Elementos tectono-sedimentarios de la Cuenca de Falcón……....20
Figura 3.4. Mapa de la Cuenca de Agua Salada en Falcón Oriental……21
Figura 3.5. Tabla de Correlación de la Cuenca de Falcón……...22
Figura 3.6 Tabla de correlación de Falcón oriental…….….23
Figura 3.7 Mapa geológico de la zona de Yumare……...33
Figura 3.8. Lutitas de la Formación Cerro Misión en la zona de Sanare, estado Falcón….35
Fig. 3.9. Cuerpos de rocas volcánicas en la zona de Sanare, estado Falcón……35
Figura 3.10. Mapa isópaco del Eoceno. Ciclo D……..……37
Figura 3.11. Paleogeografía de Oligoceno. Ciclo C…….…38
Figura 3.12. Paleogeografía de Oligoceno. Subciclo C1…….38
Figura 3.13 Paleogeografía de la Cuenca de Falcón durante el Mioceno Medio-Tardío……...39
Figura 4.1 Datos que integran un SIG…….…….42
Figura 4.2a Funciones de los componentes de un SIG, Figura 4.2b Características de los componentes de SIG…….……..43
Figura 4.3 Estructura de datos *raster*……...45
Figura 4.4 Características de los sensores pasivos y activos……..46
Figura 4.5 Radiaciones emitidas por sensores activos…….47
Figura 4.6 Comparación del mapa de interpretación lito-estructural con la imagen de Landsat correspondiente…….49

Figura 4.7. Resolución espacial……..……..50
Figura 4.8. Resolución espectral……..……....51
Figura 4.9. Resolución radiométrica…….……...52
Figura 4.10 Resolución temporal…….…….……...52
Figura 4.11 Índices de vegetación…….……..54
Figura 4.12 Clasificación supervisada…….55
Figura 4.13. Comparación entre la imagen original y la imagen con clasificación no supervisada…….……56
Figura 4.14 Órbita Landsat 7……...58
Figura 4.15. Simulación de vuelo con ENVI……..59
Figura 4.16. Análisis espacial en ArcVIEW GIS 9.2……..60
Figura 4.17 Cuadro de herramientas para la entrada y manipulación de imágenes en Erdas Imagine 9.2……..61
Figura 5.1 Colector Principal 1. Geometría anastomosada del río Tocuyo……..63
Figura 5.2 Colector Principal 2. Patrón de drenaje meandriforme del río Aroa……..65
Figura 5.3 Unidades topográficas identificadas en la zona de estudio……65
Figura 5.4 Estribaciones de las filas elongadas al sur de la zona de estudio, cercano al sector Buena Vista……..……67
Figura 5.5 Colinas incipientes representadas por los macizos ígneos-metamórficos, ubicados al norte del valle de Aroa……..…68
Figura 5.6 Mesetas degradadas disectadas, representadas principalmente por el cerro Riecito y la loma Araurima, ubicadas al noroeste de la zona de estudio……69
Figura 5.7 Lomas bajas alargadas ubicadas al noreste de la zona, representada principalmente por el "cerro Grande" de cresta sinuosa y laderas asimétricas……...71
Figura 5.8 Colinas lobulares e irregulares representados por los cerros Mamoncito, Yuca y Domo La Esperanza, ubicados al norte de la zona de estudio……72
Figura 5.9 Planicie aluvial generada por las estribaciones de las lomas del interior y formaciones aisladas constituida por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa…….72

Figura 6.1 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observa el contacto de la Formación Cerro Misión con la Formación Guacharaca ……76
Figura 6.2 Unidad de elevaciones bajas (Colinas lobulares irregulares) formada por litologías poco competentes como son las lutitas de la Formación Cerro Misión y las lutitas de la Formación Guacharaca…….77
Figura 6.3 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50). Se señalan las formaciones Cerro Misión y Guacharaca cartografiadas en los mapas geológicos empleados (H.G.K. modificado por J.A.G. (1967) y el mapa de la Creole Petroleum Corporation (1962)……..77
Figura 6.4 Clasificación supervisada de la imagen satelital donde se aprecia una ligera coloración en los pixeles de rojo……..…78
Figura 6.5 Mapa geológico actualizado de la zona, donde resalta el contacto entre las formaciones Cerro Misión, Guacharaca y San Lorenzo según los mapas empleados (H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G. (1967) y el mapa de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962)), ubicado en las proximidades del domo la Esperanza. Parte norcentral del área de estudio…….80
Figura 6.6 Unidad de elevaciones bajas (colinas lobulares irregulares) formada por litologías poco competentes pertenecientes a la Formación Cerro Misión y al Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón)…….81
Figura 6.7 Imagen clasificada al sur del domo la Esperanza, donde se representa la Formación Cerro Misión y el Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón), observando que no existe discrepancias o característica alguna que ayude a distinguir entre dichas formaciones……...82
Figura 6.8 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representan los contactos de la Formación San Lorenzo con las formaciones Pozón y Guacharaca……..83
Figura 6.9 Imagen supervisada al noreste de la zona, donde existe uniformidad en los colores de las bandas de todo el Grupo Agua Salada, sin poder diferenciar los contactos litológicos de las formaciones Guacharaca, Pozón y San Lorenzo…….84

Figura 6.10 Imagen Satelital Landsat 7 ETM, 2001, bandas (R70, G50, B30), donde se muestra un ligero contraste en las tonalidades de las formaciones San Lorenzo y Pozón……...85
Figura 6.11a Intervalo caracterizado por la presencia de clastos de cuarzo subredondeados en una matriz carbonática, hacia la parte inferior. Formación Casupal, sector Sanare – Cerro Misión, Falcón. Figura 6.11b Mapa geológico actualizado de la zona, indicando la ubicación de la Formación Casupal…….87
Figura 6.12 Imagen de clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa la variación de pixeles concentrados en el centro de la imagen, que corresponde al cerro Riecito y a su vez muestra claramente el contacto de la Formación Casupal con la Formación Capadare……....88
Figura 6.13 Unidad de elevaciones medias (mesetas degradas disectadas) formadas por litologías relativamente competentes pertenecientes a las formaciones Casupal y Capadare, Cerro Riecito……..89
Figura 6.14 Clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se aprecia que no existe uniformidad en los colores que ayuden a delimitar los contactos litológicos de la Formación Casupal con otras formaciones……..…90
Figura 6.15 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representan los contactos de la Formación Agua Linda con las formaciones Casupal y Capadare, en las cercanías del cerro Misión…….....91
Figura 6.16 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa los contactos de las formaciones Agua Linda y Capadare……..92
Figura 6.17 Imagen Satelital, con supervisión no clasificada, bandas (R10, G20, B30), donde se muestra claramente el contacto de la Formación Agua Linda con la Formación Capadare……..93
Figura 6.18 Columna litoestratigráfica de la Formación Capadare, en Sanare, Falcón Oriental. (Tomado de GONZÁLEZ DE JUANA, *et al*, 1980)……...95
Figura 6.19 Afloramiento de intercalaciones de calizas delgadas de 20-30 cm y areniscas calcáreas con un espesor de 70 cm. Sector El Puñal, Sanare, estado Falcón……..96
Figura 6.20 Disposición de las calizas delgadas intercaladas con areniscas calcáreas. Sector El Puñal, Sanare, estado Falcón……..…….96

Figura 6.21 Disposición de los bloques de caliza en el sector Buena Vista, estado Falcón……..97
Figura 6.22 Afloramiento de calizas pobremente estratificadas Sector Buena Vista, Sanare, estado Falcón……..97
Figura 6.23 Exposición de la Formación Capadare en el cerro Sanare……...98
Figura 6.24 Costras superficiales de caliche. Sector Buena Vista, Sanare estado Falcón……...98
Figura 6.25 Imagen de radar de la zona, donde se aprecia el cerro Riecito correspondiente a las mesetas degradas disectadas de la unidad topográfica I (Unidad de elevaciones medias), constituido por litologías competentes como las Formaciones Capadare y Casupal……99
Figura 6.26 Imagen satelital donde se muestra el contacto de las dos unidades topográficas: unidad de elevaciones medias (litología competente) y unidad de elevaciones bajas (litología menos competente). Combinación de bandas: R70, G50, B40…….100
Figura 6.27a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig. 6.27b Imagen de clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa la variación de pixeles concentrados en el centro de la imagen, cerro Riecito, igualmente se muestra claramente el contacto de la Formación Capadare con las formaciones Casupal y Ojo de Agua……..101
Figura 6.28 Imagen de clasificación supervisada, donde puede observarse la Formación Capadare en contacto con las formaciones Casupal y Ojo de Agua…….102
Figura 6.29a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig.6.29b Clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se muestra el contacto de la Formación Capadare con las formaciones Ojo de Agua (al norte), Agua Linda y Casupal (al sur). Cerros Misión y Sanare……...103
Figura 6.30 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los contactos de la Formación Ojo de Agua con y Capadare, al suroeste de las laderas del cerro Riecito……..105
Figura 6.31 Afloramiento de la Formación Ojo de Agua, al norte de la colonia Araurima……106

Figura 6.32 Afloramiento de la Formación Ojo de Agua, donde se observan los niveles conglomeráticos al norte de la Colonia Araurima……..106

Figura 6.33 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa el contacto de las formaciones Capadare y Ojo de Agua, además de apreciarse el cambio de tonalidad en los colores correspondientes a cada una de las unidades litológicas…….…...107

Figura 6.34 Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa el contacto entre las formaciones Capadare y Ojo de Agua……..108

Figura 6.35 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los contactos de la Formación Ojo de Agua con los depósitos cuaternarios, al norte de cerro Misión…....109

Figura 6.36 Contactos entre los depósitos cuaternarios y la Formación Ojo de Agua. Sector Araurima, estado Falcón…….……110

Figura 6.37a Sedimentos de aluvión y encajamiento de la terraza en las adyacencias del río Tocuyo. Figura 6.37b Grietas de desecación en limos depositados por el río Tocuyo en épocas de inundación. Alto Tocuyo, Falcón……..111

Figura 6.38 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa muy levemente el contacto de los depósitos cuaternarios (planicie aluvial) y la Formación Ojo de Agua (unidad de elevaciones medias)…….….112

Figura 6.39 Imagen satelital con clasificación supervisada, donde se observa que no existe algún cambio en la coloración de los pixeles para determinar la extensión de los depósitos cuaternarios…….....113

Figura 6.40a Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los macizos ígneos – metamórficos. Figura 6.40b Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observan los cuatro cerros donde afloran las rocas ígneo-metamórficas, al sur del área en estudio…….....115

Figura. 6.41 Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa que no existe distinción entre los contactos formacionales adyacentes a los macizos ígneo-metamórficos……116

Figuras 6.42a y 6.42b Representación de las formaciones Cueparo y Guaidima cartografiadas en los mapas geológicos consultados. Figura 6.42c Mapa geológico

actualizado de la zona, donde se observa finalmente las equivalencias litológicas de las formaciones Cueparo y Guaidima……..119

Figuras 6.43a y 6.43b Representación de las formaciones Cueparo, Riecito, Bachacal, Capadare y Ojo de Agua cartografiadas en los mapas geológicos consultados. Figura 6.43c Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observa finalmente las equivalencias litológicas de las formaciones Cueparo, Riecito y Bachacal……..…..120

Figura 6.44 Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa una falla en dirección sureste-noroeste de 6 Km aproximadamente. Sector Sanare-Buena Vista……121

Figura 6.45 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observan los pliegues apretados al norte de la zona en estudio……122

Figura 6.46 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observan los pliegues suaves al sur de la zona en estudio……123

Figura 6.47 Imagen de radar, representada por las lomas bajas alargadas de la unidad topográfica II, al norte de la zona, donde se observa la correspondencia de los bajos y altos topográficos con los sinclinales y anticlinales, respectivamente…….....124

Figura 6.48 Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa el Anticlinal de Buena Vista y el sinclinal de Sanare. Sector Sanare-Buena Vista.....124

Figura 6.49 Pliegues dentro del Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón)…….125

Figura 6.50a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig. 6.50b Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa el cerro Riecito afectado por un sistema de fallas en dirección noroeste, la componente horizontal de las fallas es sinestral, con una extensión de 6 Km. aproximadamente……127

Figura.6.51. Mapa geológico actualizado de la zona en estudio, donde se observa la disposición de los cerros ígneos metamórficos, afectados por un sistema de fallas con dirección N18ºO…….128

Figura 6.52 Imagen de radar, donde se observa el fallamiento de los macizos ígneos-metamórficos, al sur de la zona en estudio……129

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 3.1 Estratigrafía Regional de Falcón Oriental……...24

Tabla 3.2 Unidades ígneo-metamórficas presentes en la zona de estudio……...32

Tabla 4.1. Características del Satélite *Landsat* 7 ETM……57

Tabla 6.1 Incongruencias litológicas en la zona de estudio……...117

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El aspecto cambiante del territorio por actuaciones de la naturaleza y del ser humano, obligan a la continua actualización de la cartografía mediante levantamientos de campo, compilaciones bibliográficas, interpretaciones de fotografías aéreas e imágenes satelitales principalmente, sobre todo en aquellos ambientes que presentan rasgos geológicos relevantes, como es el caso de la cuenca de Falcón, la cual ha sido de gran interés para la realización de estudios bioestratigráficos, geoquímicos, estructurales, entre otros.

Desde hace muchas décadas se han desarrollado gran cantidad de trabajos en el estado Falcón, donde se ha descrito la complejidad estructural y estratigráfica característica de esta cuenca, debido al marco tectónico en que se desarrolló la misma, tales como: mapas geológicos de la Creole Petroleum Corporation (1962) y el realizado por H.G.K. Modified by J.A.G. (1967), DIAZ DE GAMERO (1982), AUDEMARD et al (1992). Por tal motivo, se han reportado discrepancias entre los distintos mapas geológicos generados en esta región, y resulta necesario presentar una información geológica unificada y actualizada, a los fines que sirva de base a estudios que se desarrollen en el futuro. En la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, se han realizado actualizaciones cartográficas de distintas zonas, inclusive de zonas de difícil acceso como es el caso de la Sierra de Perijá, donde resulta necesario la utilización de imágenes multiespectrales, demostrando que las mismas representan una herramienta de gran provecho que pueden lograr una amplia resolución, lo que permite un buen acercamiento y mejor detalle geológico. Las actualizaciones cartográficas permiten pues, obtener mapas interactivos con información geológica (litología, estructuras, drenajes) de una zona de interés, siendo estos muy didácticos y productivos para estudios posteriores. La realización de este trabajo permitirá contar con información geológica actualizada, de la zona oriental de Falcón, al sur del Alto la Esperanza-Guacharaca representada por medio de un mapa geológico a escala 1:50.000, el cual reunirá toda la información recopilada, analizada y unificada previamente. Así mismo, se abrirá campo para que se inicien futuros estudios geológicos detallados de diferente índole.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Generar un mapa geológico actualizado y digitalizado a escala 1:50.000 de la zona sur-oriental del estado Falcón, mediante la unificación de la información geológica obtenida en campo, compilación bibliografía, trabajos previos e imágenes satelitales (*Landsat* 7 ETM).

1.2.2. Objetivos específicos

- Revisar los mapas geológicos existentes de la zona, para comparar con la información interpretada en la imagen *Landsat* 7 ETM empleada.
- Interpretar imágenes de radar.
- Realizar la clasificación supervisada y no supervisada a la imagen *Landsat* 7 ETM empleada, para realzar características geológicas en la zona.
- Complementar la información cartográfica y unificar los criterios de los diferentes autores para realizar una actualización geológica crítica y completa de la zona.
- Generar un mapa geológico digitalizado a escala 1:50.000, bajo la plataforma *ArcGIS*.

1.3 Localización de la zona de estudio

La zona de estudio está ubicada en la parte suroriental del estado Falcón, en los distritos Acosta, Monseñor Iturriza y Silva, entre los ríos Tucurere y Aroa, limitando al sur con el estado Yaracuy, con una extensión de 65 Km ^{2} aproximadamente (Fig. 1.1). El área se encuentra entre las coordenadas:

LATITUD	LONGITUD
69°0'0,51"E	11°4'47,64"N
68°22'11,64"E	10°40'10,95"N

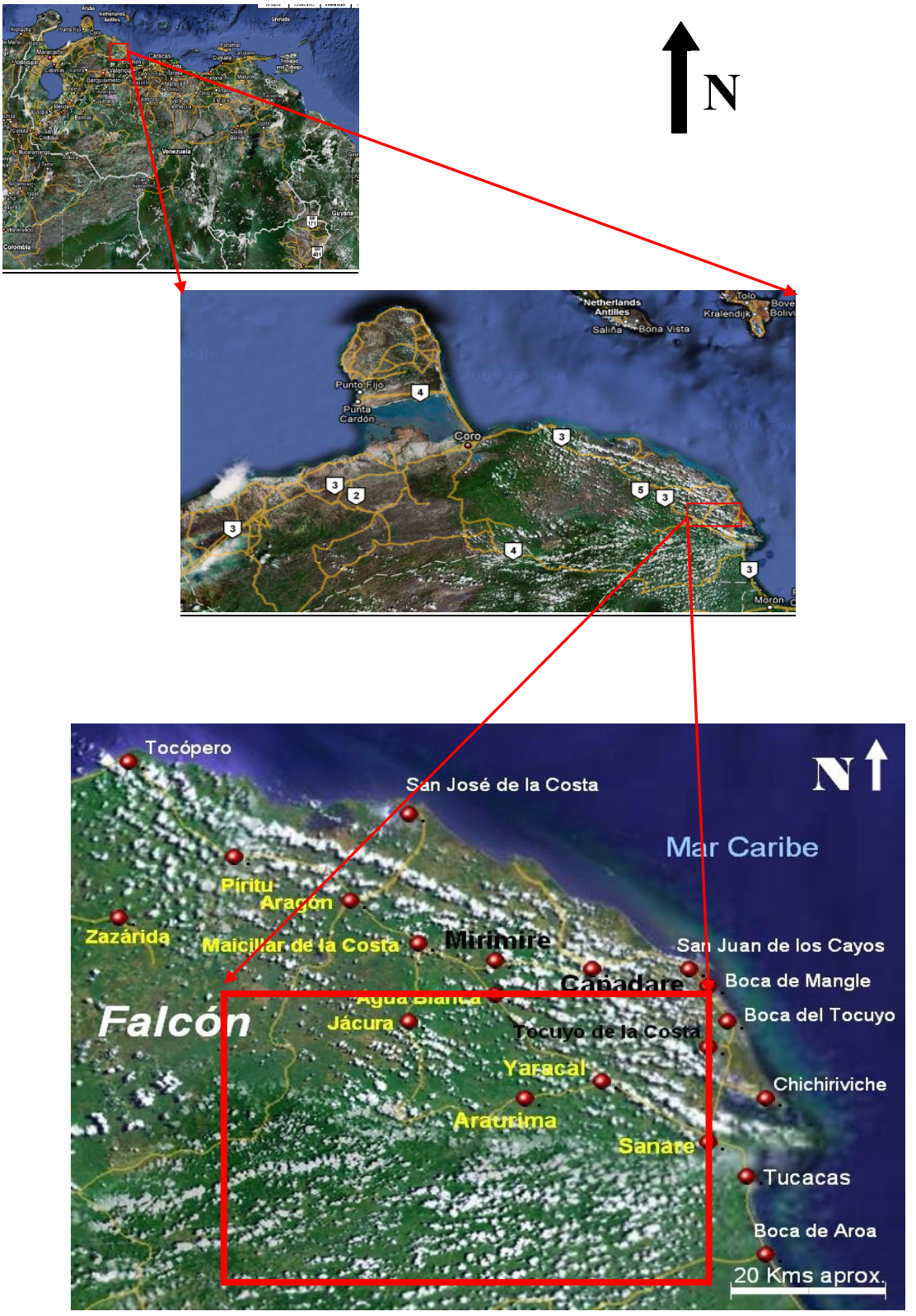


Figura 1.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio (Tomado de GOOGLE EARTH, 2009).

Los mapas utilizados fueron las hojas topográficas a escala 1:100.000: 6548 (Tucacas), 6549 (Tocuyo de la Costa), 6449 (Mirimire), 6448 (Araurima), de las cuales fueron utilizadas veinticinco (25) hojas a escala 1:25.000 obtenidas en el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (Fig. 1.2).

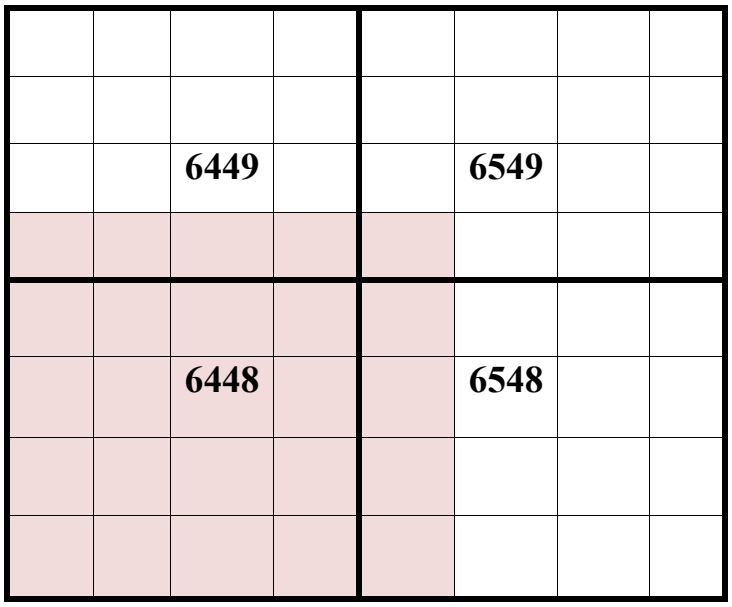


Figura 1.2 Ubicación de hojas topográficas correspondientes a la zona de estudio.

1.4 Trabajos previos

El presente subcapítulo se encuentra dividido en dos partes, una donde se enumeran los trabajos de actualización de cartografía geológica realizados en el estado Falcón, y en una segunda parte se indicarán los estudios geológicos realizados en Falcón oriental:

1.4.1 Trabajos de actualización geológica cartográfica en el estado Falcón

LÓPEZ (2005), mediante una integración y actualización geológico cartográfica de una zona ubicada al noreste del estado Falcón, entre los distritos: Zamora, Acosta, Miranda y Colina, elaboró dos hojas geológicas a escala 1:50.000, así como 21 hojas geológicas a escala 1:25.000, que permiten establecer zonas en las que se necesite ampliar, verificar u obtener información geológica, disponiéndose así de un documento único del norte de Falcón.

PENIN & VILLARROEL (2005), realizaron una integración y actualización geológica del área de Jacura y Capadare, estado Falcón, obteniendo dieciséis (16) hojas geológicas a escala 1:25.000, digitalizadas, compiladas y reinterpretadas; y un mapa final geológico-cartográfico a escala 1:50.000.

1.4.2 Estudios geológicos realizados en Falcón

BONILLA (1980), realizó un plan de explotación del yacimiento de la dolomía Sanare-Tucacas, Falcón suroriental, considerando los diversos motivos que mueven a la realización de estudios dentro del campo de la minería en nuestro país, este trabajo dio origen de acuerdo a la importancia que revista el desarrollo minero en su correcta forma, así como entre otros factores de peso dentro del campo de la construcción, como es la producción de piedra picada, para las diversas actividades de desarrollo vial, industrial, minero, etc., que se llevan a cabo específicamente en la zona centro norte costera.

DIAZ DE GAMERO (1982), estudió la estratigrafía y micropaleontología de la parte norte de la subcuenca de Agua Salada, Falcón oriental, donde las unidades litoestratigráficas definidas al sur de la subcuenca, no pueden reconocerse en la región septentrional. Reconoció solamente en la región al Grupo Agua Salada sin diferenciar, con la excepción de la Arenisca de El Salto que, por ser tan distintiva, propone que pase a la categoría de formación.

LAMUS & LA CRUZ (1986), realizaron un estudio geológico y de ubicación de depósitos de fosfatos al norte de Tucacas, distrito Silva, estado Falcón, indicando que se trata de un área donde aflora una secuencia carbonática de unos 144 metros de espesor, compuesta por calizas, dolomías y calizas fosfáticas, perteneciente a la Formación Capadare, asignándosele una edad Mioceno sin diferenciar. La secuencia descrita parece constituir un bloque aislado limitado en el tiempo geológico por dos interrupciones sedimentarias pre y post-depositacionales. La presencia de calizas fosfáticas intercaladas en la secuencia indica una gran importancia geo-económica en la zona estudiada.

CAMACHO & MIJARES (1989), estudiaron la geología de la zona de Sanare - Buena Vista, sector Agua Linda, distrito Silva, estado Falcón, mediante el cual contribuyeron con el esclarecimiento de las relaciones estratigráficas que existen, edad y evaluación de posibles yacimientos fosfáticos de las rocas aflorantes en la zona.

LA CRUZ (2000), estableció las relaciones estratigráficas entre las secuencias sedimentarias aflorantes en los cerros Chichiriviche y Sanare-Buena Vista del distrito Silva, estado Falcón, determinando que el bloque Sanare-Buena Vista/Chichiriviche, está conformado por los *horst* correspondientes a los dos cerros y un "graben" delimitado por dos fallas de dirección sureste-noroeste. Probablemente dichos cerros constituían una faja orientada este-oeste y debido a una compresión noreste-suroeste (asociada al tectonismo de la Placa Caribe), fue fallado, produciéndose el movimiento relativo de los bloques en dirección sureste-noroeste.

LORENTE (1978), estudió las relaciones que existen entre las rocas carbonáticas aflorantes entre las poblaciones de Mirimire y Capadare, y la parte norte de la Cuenca de Agua Salada, Estado Falcón, proponiendo designar formalmente a la caliza de Capadare como Formación Capadare, habiendo comprobado que corresponde a una facies carbonática dentro del Grupo Agua Salada, la cual se desarrollo en forma de bancos aislado (que alcanzaron los 190m de espesor) sobre plataformas poco profundas (aproximadamente 30m) dentro de una cuenca de profundidad batial.

RODRÍGUEZ (2003) realizó un proyecto de evaluación geológica y geotécnica de la zona Morón-Mirimire, estado Falcón, determinando que la zona se ve influenciada directamente por las estructuras de mayor relevancia en el ámbito regional, dichas estructuras están representadas por la cuenca de Yaracuy y el Anticlinorio de Falcón, las cuales generan

estructuras menores como fallas y sistemas de anticlinales y sinclinales de menor relevancia, en el ámbito local.

ESPARIS & HERNÁNDEZ (2005), mediante una integración y actualización geológica del área comprendida entre las poblaciones de Churuguara y Piedra Grande, estados Falcón y Lara respectivamente, establecieron que en la zona existen grandes pliegues que van desde la región de Arauca hasta Piedra Grande, con una orientación preferencial N70E y están concentrados hacia la parte septentrional de la misma, envueltos por las unidades de El Paraíso y Pecaya. Igualmente determinaron que el sistema de fallas principal posee orientación noroeste y están concentradas en su mayoría, hacia el sur dentro de la Formación Churuguara.

LOZANO & MUSSARI (2007), estudiaron la geología de los macizos ígneo-metamórficos del norte de Yumare, estados Yaracuy y Falcón, donde afloran rocas ígneo-metamórficas pertenecientes a las unidades litológicas que denominaron según BELLIZZA & RODRIGUEZ (1976) como Esquisto de Aroa, Serpentinitas (sin nombre formal), Metavolcánicas de San Quintín (Formación San Quitín) y Metagabro anortosítico de Yumare. Los afloramientos de estas rocas se reducen a cuatro macizos dispuestos en dirección este-oeste de la siguiente manera: Tarana, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes.

1.5. Metodología

La metodología empleada en este trabajo de investigación consiste en tres etapas (preliminar, campo y oficina), a continuación se describe cada una de ellas:

1.5.1. Etapa preliminar

- Recopilación bibliográfica: consistió en la búsqueda y recopilación de información relacionada a la zona de estudio, tomando en cuenta toda la documentación publicada que contenía información geológica de interés para el estudio (trabajos especiales de grado, publicaciones, trabajos inéditos, entre otros).
- Adquisición de los datos: la adquisición de los datos fue recabada en las instalaciones de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV y en el Instituto Geográfico Simón Bolívar (mapas geológicos, imágenes satelitales y veinticinco (25) mapas topográficos).

- Interpretación de los mapas geológicos, mapas topográficos e imágenes de radar, correspondientes a la zona de estudio, donde se realizó el reconocimiento de quebradas, vías de acceso, rasgos geomorfológicos y estructuras geológicas
- Procesamiento e interpretación de imágenes satelitales *Landsat* 7 ETM. El análisis o interpretación de los datos provenientes de imágenes de satélites, se realizó a través de técnicas automáticas de análisis digital y de patrones visuales identificados en las imágenes (estructuras, contactos litológicos, drenajes).

1.5.2. Etapa de campo

Consistió en el reconocimiento geológico de la zona:

- Ubicación de los afloramientos mediante un GPS: en esta fase se determinaron, previo al trabajo de campo *sensu stricto*, todos los afloramientos pertenecientes al estudio deseado, teniendo en cuenta la mayor continuidad estratigráfica.
- Corroborar y discutir las discrepancias geológicas (estratigráficas o estructurales) que se presentan entre los distintos mapas geológicos y topográficos correspondientes a la zona de estudio.

1.5.3 Etapa de oficina

Consistió en la realización de las siguientes actividades:

- Digitalización de los mapas topográficos y geológicos mediante el programa "ArcGis 9.2", para colocar los nuevos datos geológicos e interpretar junto con las imágenes satelitales y de radar la zona a cartografiar.
- Elaboración de correcciones de las imágenes satelitales *Landsat* 7 ETM, a través de los siguientes procesos:

.- Corrección atmosférica en FLAASH.

.- Máscara para eliminar nubosidad y sus sombras.

.- Transformación de la Fracción Mínima del Ruido (MNF).

.- Índice de Pureza del Píxel (PPI).

.- *Spectral Angle Mapper* (SAM).

.- Clasificación no supervisada y supervisada de las características geológicas de las imágenes.

.- Firmas Espectrales (para mayor detalles ver apéndice 1).

- Elaboración de un mapa geológico a escala 1:50.000 de la zona de estudio en ArcGis 9.2 y presentación de un informe con datos actualizados topográficos, litológicos, estructurales y geomorfológicos que se obtuvieron mediante la integración de datos bibliográficos, de campo e imágenes satelitales.

CAPÍTULO II

GEOGRAFÍA FÍSICA

2.1 Fisiografía y relieve

La zona en estudio se encuentra ubicada en la parte suroriental de Falcón, representada por la "Cuenca Agua Salada", de gran importancia geológica y fisiográfica.

BELLIZZIA & RODRIGUEZ (1976) indicó que debido a que el origen y estructuras de la cuenca Agua Salada son el resultado del encuentro de dos grandes sistemas montañosos muy diferentes: la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes de Mérida. Esto hace, que en su conjunto, esta sea una región con características propias y diferentes a las demás unidades geológicas y fisiográficas, correspondiendo entre las clasificaciones de provincias fisiográficas a la de *precordilleras y piedemontes* en un 95% al norte de la zona y a la *Cordillera de la Costa* en un 5%, hacia sureste de la zona de estudio (Fig. 2.1).

La costa oriental está conformada al este por una planicie aluvial generada por las estribaciones de las lomas del interior de la zona y formaciones aisladas constituida por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa.

Fisiográficamente, al norte de la cuenca del río Tocuyo, se encuentran pequeñas filas bajas asimétricas, compuestas por los cerros Grande, Yuca, Mamoncito y Domo la Esperanza, con elevaciones no mayores a los 200 m.s.n.m. Al noroeste de la cuenca del río Tocuyo, se encuentran la loma de Araurima y el cerro Riecito, los cuales representan una meseta degradada disectada, con elevaciones de 400 a 650 m.s.n.m y una orientación este-oeste, interrumpida en su sección central donde se comunica con el valle del río Tocuyo (tramo del valle de la quebrada El Charral y el río Guaidima a unos 80 m.s.n.m), entre la cuenca del río Tocuyo y la cuenca del río Aroa, tiene un quiebre que continua en dirección este con filas elongadas (cerro Misión) cuya altura máxima sólo alcanza 500 m.s.n.m.

Al noroeste del estado Yaracuy, entre las cuencas del río Tocuyo y el río Aroa, se encuentra la Serranía de Agua Fría, cuya orientación es noreste, continua en dirección este con colinas y cerros (Tarana, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes), su altura

máxima sólo alcanza 537 m.s.n.m, donde afloran rocas ígneo-metamórficas (Esquisto de Aroa, Metagabro anortosítico de Yumare, Metavolcanosedimentarias de San Quintín) y sedimentarias del Terciario (LOZANO & MUSSARI, 2007).

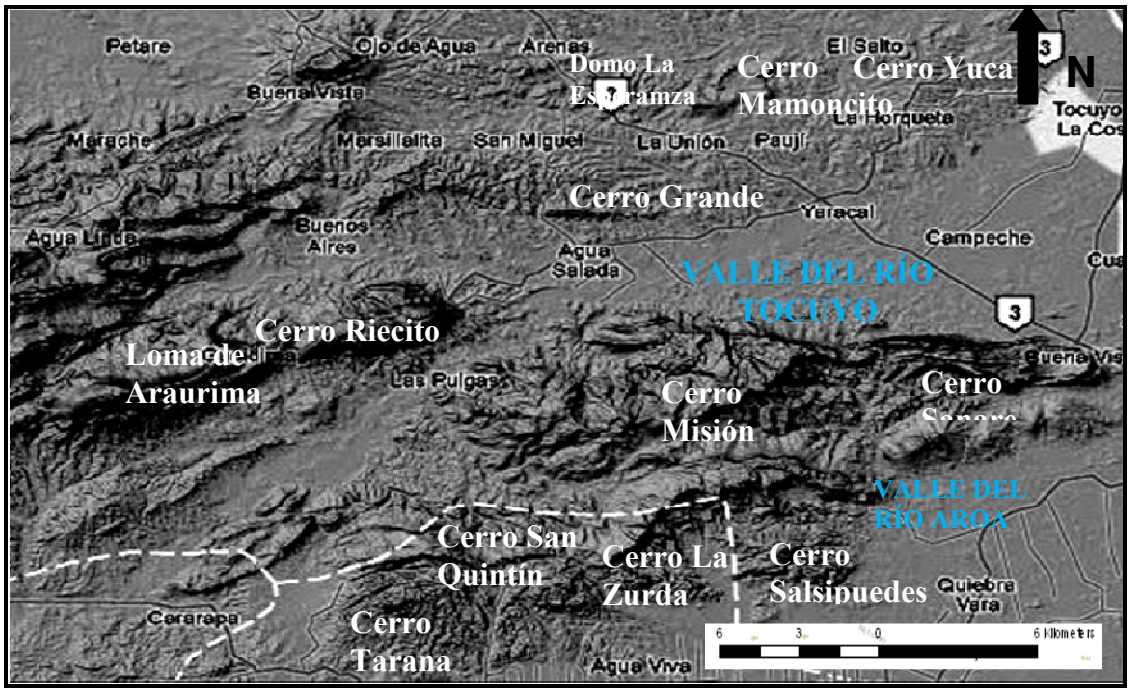


Figura 2.1 Ubicación de las formas del relieve en la zona de estudio
(Modificado de GOOGLE EARTH, 2009)

2.2 Drenaje

Los tributarios y quebradas se distribuyen en las cuencas de los ríos Tocuyo y Aroa.

La cuenca del río Tocuyo (Fig.2.2), es la principal, ocupa un 90% de toda la zona de estudio e incluye, en su mayoría, los drenajes tanto al norte como al sur, mostrando un comportamiento de drenaje dendrítico a subparalelo, algunos ríos tales como: Guaidima, Araurima, Guaca y Agua Clara, desembocan en ella. Vierte sus aguas en el mar Caribe, cerca de las poblaciones del Tocuyo de la Costa y Boca del Tocuyo (estado Falcón) donde forma un amplio valle aluvial.

Figura 2.2 Rio Tocuyo sector colonia de Araurima, estado Falcón.

La cuenca del río Aroa, ocupa un 10% del área total. Hacia ella drenan algunos tributarios tales como, las quebradas Manuelito, La Zurda y San Antonio, las cuales se encuentran separando los macizos ígneo-metamórficos.

2.3 Clima

Según la clasificación de ((THORNTHWAIT, 1949) FREILE, 1968) desde el punto de vista climático, el área estudiada se halla ubicada dentro de la "zona costera-árida y semi-árida".

El clima de la entidad es semiárido, bastante seco, excepto en la zona que se despliega entre Tucacas y Boca del Tocuyo, las precipitaciones son escasas hacia la costa, con medias anuales de 800 a 1.200 mm en las áreas de mayor altura. La época de lluvias es bastante corta, de octubre a diciembre (FREILE, 1968)

La temperatura promedio de la zona en las llanuras costeras es de 28,7ºC y desciende en las zonas de elevaciones medias a 21,2ºC. Los vientos alisios actúan constantemente sobre el litoral, modificando las condiciones climáticas (FREILE, 1968).

2.4 Erosión

En general hay varios factores interrelacionados que actúan en los procesos de erosión, pero fundamentalmente son debidos al relieve, litología y actividad humana.

La erosión afecta de manera distinta en los tipos de litología presentes. Las calizas están afectadas por los deslizamientos de roca según planos de debilidad. Los bloques aislados situados en la zona de topografía más baja se notan aun más erosionados, quizás por el fuerte régimen climático existente. En general se observan paisajes típicos con abundantes cárcavas de erosión sobre todo hacia la zona de Araurima y Yaracal.

Otro agente causante de erosión lo constituye la actividad humana, en lo referente al mal uso de las tierras (pastoreo, sembradíos en hileras en dirección de las pendientes, talas indiscriminadas, entre otros).

2.5 Vegetación

Falcón es uno de los estados de Venezuela donde existen diferentes formaciones vegetales que resultan de la combinación de las distintas variables ambientales en un espacio tropical. Se observan sabanas con predominancia de gramíneas en la planicie aluvial al norte y noreste de la zona; y vegetación de tipo litoral en la costa, en la desembocadura del rio Tocuyo; igualmente, se encuentran los bosques perennifolios primarios de montaña al oeste representado por las colinas y lomas amesetadas (Fig. 2.3), pero una parte de la superficie está cubierta por rastrojos, sabanas piroformadas, cultivos y pastos en las estribaciones al oeste, arbustales y matorrales principalmente espinosos en lomas del sur de la zona (HOLDRIDGE, 1982).

Figura 2.3. Bosques perennifolios primarios de montaña al oeste representado por las colinas y lomas amesetadas. Sector La Guacharaca, estado Falcón.

2.6. Suelos

Los suelos correspondientes al área de estudio son de textura arcillosa debido a que los materiales parentales son derivados de rocas arcillosas y generalmente salinos en mayor o menor proporción. (COPLANARH, 1974).

Existe la presencia de diferentes tipos de suelo en la zona de estudio: al noreste (línea costera) son calcáreos y entre las serranías entre Yaracuy-Falcón, al sureste, suroeste y noroeste del cerro Riecito y loma de Araurima son fanco-arcillosos.

Varían en calidad, pero en general la disponibilidad de tierras para la agricultura tradicional puede clasificarse de escasa, con 89% de muy bajo potencial, 3% de bajo potencial y 6% de moderado potencial. Solamente un 2% de ella, ubicadas en valles del sureste y áreas aluviales, cuenta con muy alto potencial. Las limitaciones de los suelos áridos y semiáridos provienen de la salinidad, el déficit hídrico provocado por la poca precipitación, la baja concentración de materia orgánica y la influencia de agentes climáticos como el viento.

2.7 Fauna

La fauna es relativamente variada y en general los animales han logrado buena adaptación a su medio, reconociéndose:

Mamíferos: chivos, vacas, báquiros, venados, cunaguaros, cachicamos y rabipelados. Con respecto a las aves, esta clase está bien representada, entre los ejemplares más característicos: la garza blanca, gavilán, perdiz, tórtola, cristofué y zamuros.

2.8 Geomorfología

Con una visión regional, se puede establecer que la zona de estudio y sus alrededores corresponden a la región occidental de la Cordillera de La Costa, emergido desde el final del Cretácico, pero con paroxismo orogenético durante el Eoceno Tardío. Está representada por las estribaciones montañosas de las sierras de Aroa y Agua Fría, y por los valles del río Tocuyo y Aroa. (BELLIZZIA, 1985)

Los horst y grábenes originados a finales del Eoceno, en el área de estudio y zonas aledañas, dan los bajos y altos topográficos observados en campo.

Los horst se encuentran representados por las elevaciones medias, esta unidad abarca el 60% de la zona, distribuida hacia el suroeste, sureste y noroeste de la zona, con alturas que oscilan entre los 150-600 m.s.n.m. Las formas topográficas presentes son pseudoparalelas, con una orientación preferencial N70ºE.

El valle del río Tocuyo y Aroa se interpreta como una fosa tectónica (grabens). Se originaron a finales del Eoceno, como consecuencia del fallamiento longitudinal ocurrido durante la orogénesis de la Cordillera de La Costa, (Bellizzia, 1985) creándose un sitio propicio para la acumulación de los sedimentos detríticos arrastrados desde las sierras de Aroa y Agua Fría. Está caracterizado por un paisaje de glacís y terrazas aluviales escalonadas sobre las vegas del río Tocuyo. Las pendientes generales oscilan entre 1 y 6º. En cuanto a el valle del río Aroa está formado por el fallamiento en graben de la zona axial de un extenso pliegue, hoy cubierto por sedimentos cuaternarios.

Los valles del río Tocuyo y Aroa, representan una llanura costera que abarca el 40% de la zona. La costa oriental está conformada por valles marinos generados por las estribaciones de los sistemas montañosos del interior y formaciones aisladas. Representa una región aluvial muy fértil generada principalmente por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa.

El flanco norte del valle del río Aroa está representado por la parte oriental de la serranía de Agua Fría. Está formado por cerros de relieve moderado cuyas alturas van disminuyendo hacia el este.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

3.1 Generalidades

La cuenca de Falcón se originó durante el Eoceno Tardío–Oligoceno. Ocupa un área de unos 36.000 km^2, limita al norte con las islas de las Antillas Holandesas y las islas venezolanas de Las Aves, Los Roques y La Orchila; y al sur con las regiones elevadas de la Cordillera de La Costa y con la Plataforma de La Guaira. Hacia el este, un alto del basamento que parece ser la prolongación sur de La Orchila la separa de la cuenca de La Blanquilla.

Durante una fase de compresión de edad Paleoceno–Eoceno Temprano, posterior a la fase de sobrecorrimiento del alóctono Caribe, se instalaron sobre éste la parte oriental y central de la cuenca de Falcón, esto como consecuencia de un colapso post-orogénico asociado con la desaceleración de la placa Caribe debido a los niveles de colisión oblicua alcanzados en el margen meridional de la misma (AUDEMARD, 1995). Por el contrario, su parte más occidental está en contacto con la plataforma carbonática de Maracaibo. El neoautóctono falconiano es esencialmente de edad Oligoceno–Mioceno.

3.2 Evolución Tectónica de la Cuenca de Falcón

La cuenca de Falcón se divide en dos provincias tectónicas distintas: la Provincia Occidental, que corresponde con la cuenca de Falcón tectónicamente invertida a partir del Mioceno Medio al Mioceno Tardío, con el desarrollo del Anticlinorio de Falcón, y la Provincia Oriental, que ocupa actualmente el área de costa afuera de Falcón oriental y la fosa de Bonaire (MENDOZA, 2005).

Existen diferentes autores que explican el origen de esta cuenca, entre ellos están:

MUESSING (1984), postuló que la cuenca de Falcón se originó por efectos transtensionales relacionados con fallas transcurrentes como las fallas de Oca y San Sebastián.

MACELLARI (1995), propuso que esta cuenca evolucionó a partir de desplazamientos o disrupciones que se iniciaron en el Eoceno Tardío que originaron una serie de cuencas *pull-apart* episuturadas (Fig.3.1).

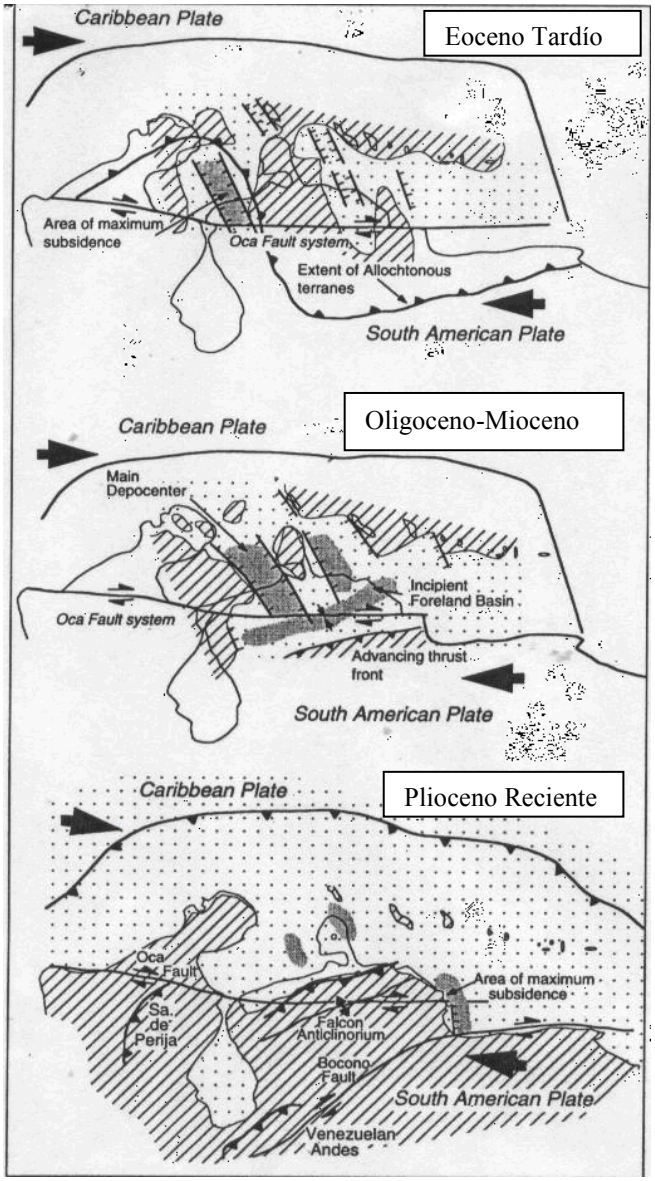
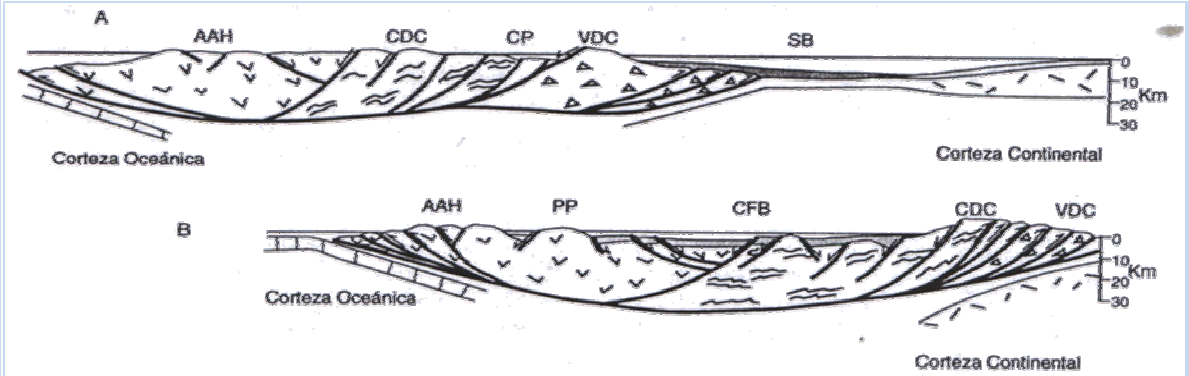


Figura 3.1. Cuencas *pull-apart* episuturadas (Tomado de MACELLARI, 1995).

PINDELL ET AL (1998), también clasificaron la cuenca de Falcón como cuenca del tipo *pull -apart*, originada en el límite de las placas Caribe y norte de Sur América.

PORRAS (2000), postula que la cuenca de Falcón-Bonaire se originó por colapsos extensionales internos en una cuenca detrás del arco, en un orógeno en flotación que colisionó oblicuamente con el borde noroccidental de la placa de Sur América, suturándose diacrónicamente de oeste a este desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano (Fig. 3.2).



Modelo del orógeno flotacional para la cuenca de Falcón Bonaire. A, configuración tectonica para el Paleoceno – Eoceno Medio. B, configuración tectónica para el Eoceno Tardío. SB, Surco de Barquisimeto, cuenca antepaís donde se depositan el "flysch" de Matatere y la Formación Guárico; CP, cuenca detrás de arco de Paracotos; VDC, arco de islas de Villa de Cura; CDC, terrenos de la Cordillera de la Costa; AAH, alto de las Antillas Holandesas; PP, alto de la Peninsula de Paraguaná. CFB, cuenca de Falcón-Bonaire. Esta configuración se mantiene por lo menos hasta el Mioceno Temprano, con aumento en la tasa de subsidencia de CFB, sedimentación marina en el centro de la cuena y continental a somera en los márgenes.

Figura 3.2 Modelo del orógeno flotacional para la cuenca de Falcón-Bonaire (Tomado de PORRAS, 2000).

MENDOZA (2005), indica que el movimiento transcurrente de la falla de Oca y fases de *rifting* en la cuenca de Falcón originan dos depocentros importantes: El **Canal Falconiano** durante el Oligo-Mioceno y el **Surco de Urumaco** durante el Mio-Plioceno (Fig. 3.3). Las facies evolucionaron desde ambientes batiales hasta marino somero/costero a deltaico/fluvial. El cambio de facies lateral de areniscas a lutitas, o de sedimentos siliciclásticos a carbonáticos es notorio en la cuenca y probablemente esté relacionado con la tectónica, fallamiento normal y distribución de *horsts* y *grabens*.

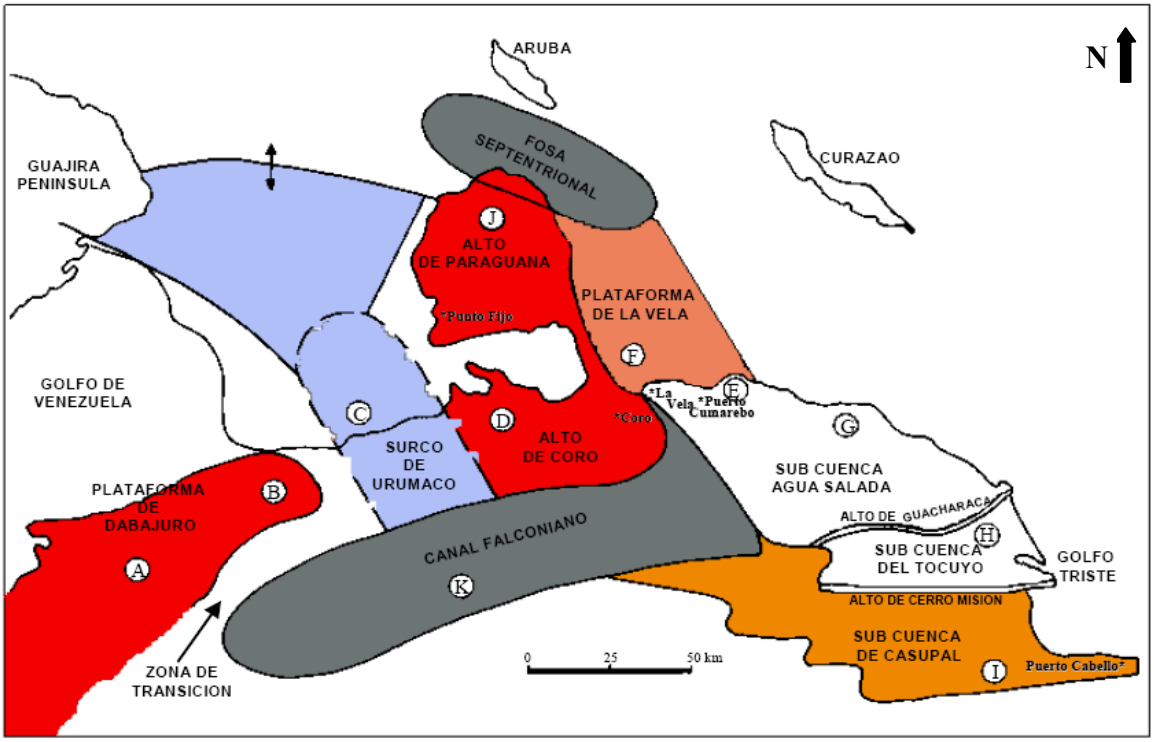


Figura 3.3 Elementos tectono-sedimentarios de la cuenca de Falcón
(Tomado de GHOSH *et al*, 1977)

La inversión de la cuenca fue el resultado, en el Mioceno Medio a Tardío, de la compresión NNO-SSE a N-S de la orogenésis andina, resultado de la colisión de Centro América (Costa Rica-Panamá) contra la Cordillera Occidental de Colombia, que dio origen entre otras muchas estructuras a las siguientes: la sutura de Atracto en Colombia, el levantamiento de Los Andes de Mérida, el desarrollo o reactivación de la falla de Boconó y en Falcón el Anticlinorio de Falcón. Sin embargo, los efectos más pronunciados asociados a la falla de Boconó se registran en la región sur de Golfo Triste y ocurrieron a partir del Plioceno Temprano (MENDOZA, 2005).

En la región de Falcón oriental y sur oriental, entre el Oligoceno y el Mioceno Tardío, se desarrolló una cuenca abierta hacia el noreste con mares profundos, probablemente comunicada con la cuenca de Falcón central, donde se sedimentó un gran volumen de arcillitas calcáreas. RENZ (1948) denominó Cuenca de Agua Salada a esta cuenca arcillosa del Oligo-Mioceno, posteriormente ampliada en dos subprovincias: la subcuenca del Hueque donde se depositaron arcillitas y la subcuenca de Casupal donde se desarrollaron

facies marginales de mares poco profundos, costeros y continentales. Estas subcuencas están separadas por el Alto de Cerro Misión (GONZÁLEZ DE JUANA *et al*., 1980) (Figs.3.4; 3.5;3.6)

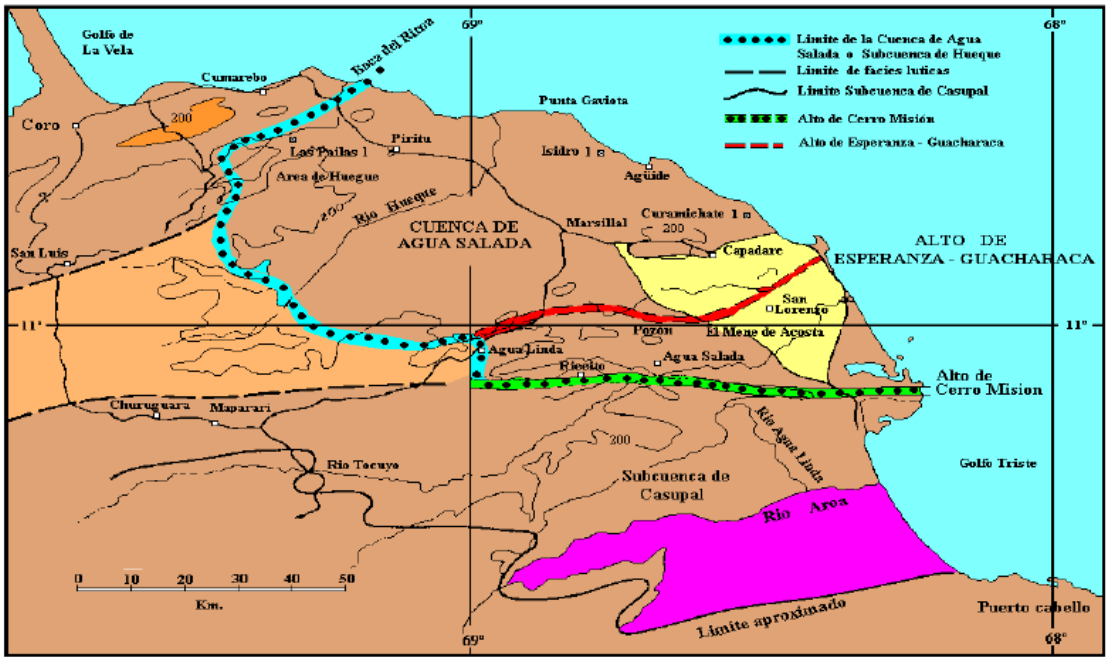


Figura 3.4 Mapa de la cuenca de Agua Salada en Falcón oriental
(Tomado y modificado de GONZÁLEZ DE JUANA *et al*., 1980).

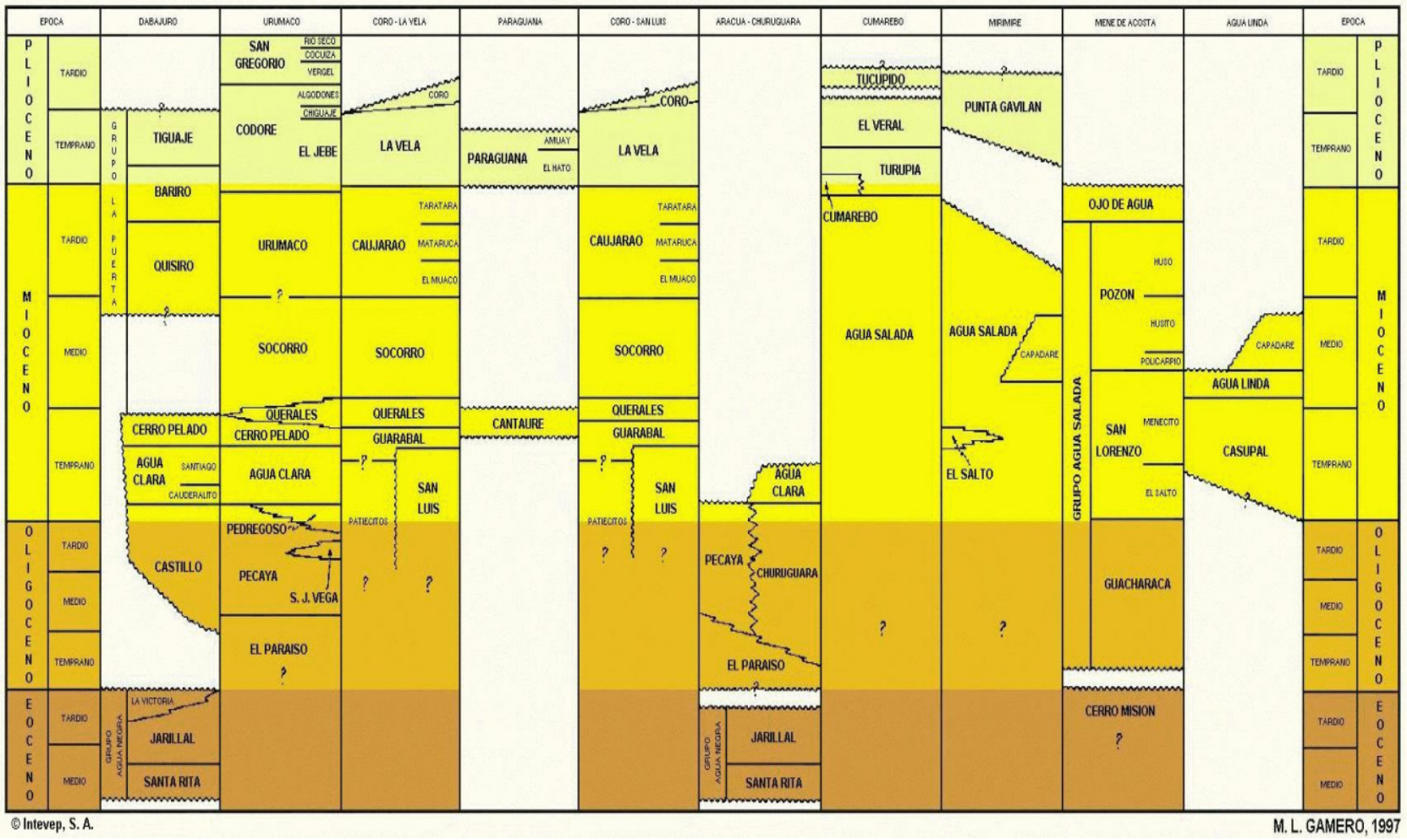


Figura 3.5 Tabla de correlación de la cuenca de Falcón

(Modificado de www.pdvsa.com/lexico/correlac/falcon1.jpg).

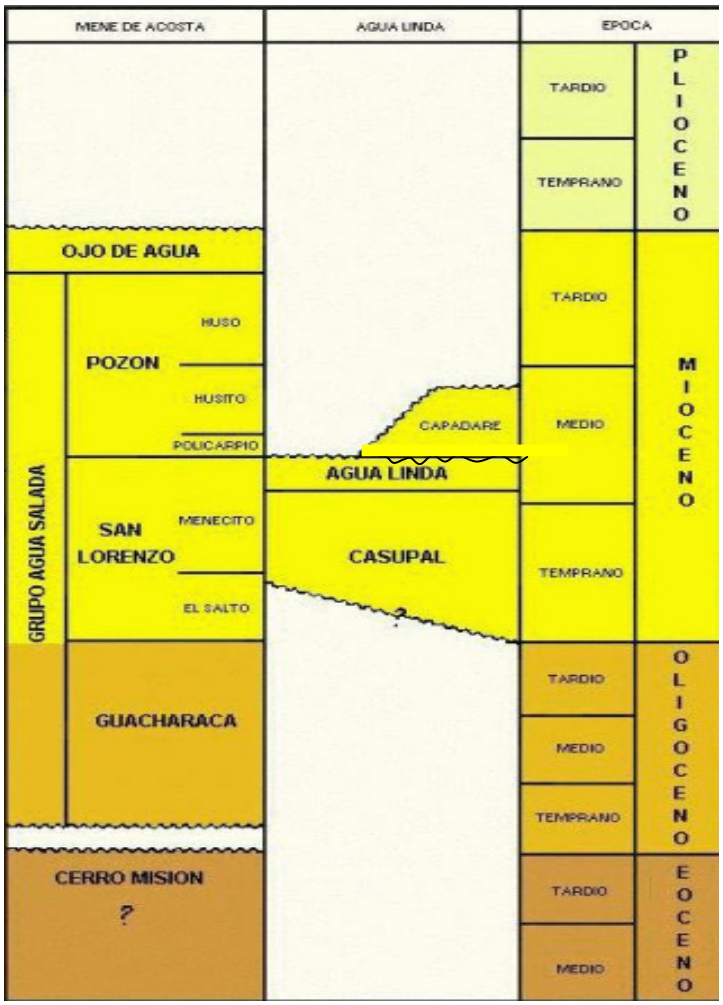


Figura 3.6 Tabla de correlación de Falcón oriental, zona de estudio.

(Modificado de www.pdvsa.com/lexico/correlac/falcon1.jpg)

3.3 Estratigrafía regional de la cuenca de Falcón

Con respecto a la estratigrafía regional de la cuenca de Falcón, la tabla 3.1, contiene las características de las unidades litoestratigráficas definidas en la zona de Falcón oriental, específicamente de la cuenca Agua Salada:

Tabla 3.1

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
EOCENO	CERRO MISIÓN	Según RENZ (1948), la Formación Cerro Misión consiste de lutitas calcáreas, de color gris oscuro. Según HUNTER (1972), es una lutita marina de color gris oscuro, calcárea, ricamente microfosilífera. Según RENZ (1948), el espesor debe ser superior a 400 m. CAMACHO *et al.* (1989) midieron una sección incompleta de 130 m en la región de Sanare-Buena Vista.	Según HUNTER (1972) la Formación Cerro Misión es una lutita marina. La microfauna béntica reportada por CAMACHO *et al.* (1989) es indicativa de profundidades batiales.	Cerro Misión, distrito Silva, estado Falcón.	WHEELER (1960, 1963) correlaciona esta unidad, con la Formación Jarillal del grupo Agua Negra de Falcón surcentral. Según RENZ (1948), la sección sedimentaria del Terciario en Falcón oriental comienza con la Formación Cerro Misión (u otras formaciones equivalentes), que parece suprayacer transgresivamente sobre formaciones más antiguas de edad desconocida. El mismo autor (RENZ, 1956) en el L.E.V. I, dice que la base de Cerro Misión no está expuesta y que dicha formación, grada concordantemente hacia arriba a la Formación Guacharaca.
OLIGOCENO-MIOCENO	FORMACIÓN GUACHARACA	SUTER (1947), la Formación Guacharaca se compone de una zona superior de areniscas glauconíticas de 1,5 m. a 6 m. de espesor conocidas como Arenas de Guayabal-La Danta y de una zona inferior de lutitas grises. Su espesor varía entre 235 m. a 250 m.	RENZ (1948). Ambientes relativamente profundos con esporádicos aportes de clásticos.	RENZ (1948). Alto de Guacharaca, flanco sur, distrito Acosta, Falcón Oriental.	WHEELER (1963). Contacto inferior transicional con la Formación Cerro Misión y el contacto superior es transicional por debajo de las areniscas del Miembro El Salto de la Formación San Lorenzo.

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
OLIGOCENO-MIOCENO	GRUPO AGUA SALADA	FORMACIÓN SAN LORENZO MIEMBRO MENECITO MIEMBRO EL SALTO	RENZ (1948). El Miembro El Salto está formado por capas lenticulares de areniscas, localmente glauconiticas, de hasta 10 m de espesor intercalados con arcillitas limosas y limolitas de color gris azulado. Tiene un espesor de 262 m. RENZ (1948). El Miembro Menecito está constituido por una secuencia de arcillitas grises, arcillitas glauconiticas verdosas y margosas con yeso selenita distribuido en toda la secuencia. Su espesor es de 138 m.	Díaz de Gamero (1985) interpreta las areniscas del Miembro El Salto como relacionadas con el rápido avance de un delta digitado, en un área de aguas relativamente profundas. El ambiente del Miembro Menecito varía de marino abierto plataformal a evaporítico. (MENDOZA, 2005)	RENZ (1948). Tiene su localidad y sección tipo en el pozo El Mene N 47.	BLOW (1959). La Formación San Lorenzo es concordante y transicional sobre la Formación Guacharaca e infrayace a la Formación Pozón. El contaco entre los dos miembros El Salto y Menecito es concordante.

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO	GRUPO AGUA SALADA	FORMACIÓN POZÓN MIEMBRO HUSO MIEMBRO HUSITO MIEMBRO POLICARPIO	El Miembro Huso está formado por margas de color blanco a crema, glauconiticas, concreciones diversas y un espesor de 536 m. (MENDOZA, 2005) El Miembro Husito está constituido de arcillas margosas grises intercaladas con margas ricas en foraminíferos de la Zona de *Robulus wallacei*. Su espesor es de 496 m. (MENDOZA, 2005). El Miembro Policarpio está representado por una capa, de unos 10 m. de espesor, de arcillas margosas y areniscas glauconiticas basales (MENDOZA, 2005).	En el Miembro Huso los primeros 160 m de la sección corresponde a la Zona de *Rubulus senni* de ambiente litoral-nerítico de unos 100 m. de profundidad; sigue la disminución de la profundidad del mar con la Zona de *Textularia panamensis* que se desarrolla en aguas marinas de menos de 50 metros de profundidad. Y los 50 m. superiores se acumularon en aguas muy poco profundas, cercanas a la costa, de condiciones marinas a lagunares (MENDOZA, 2005). El Miembro Husito fue depositado en condiciones marinas abiertas plataformales (MENDOZA, 2005). El Miembro Policarpio es de ambientes marinos plataformales, ligeramente profundos (MENDOZA, 2005).	Tiene su localidad tipo en el flanco sur del anticlinal de Pozón, entre Pozón y Ojo de Agua, distrito Acosta del estado Falcón (SUTER, 1947; DÍAZ DE GAMERO, 1985).	La Formación Pozón es concordante con la suprayacente Formación Ojo de Agua y con la infrayacente Formación San Lorenzo (MENDOZA, 2005).

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
OLIGOCENO-MIOCENO	FORMACIÓN CASUPAL	WHEELER (1960, 1963) indica que la Formación Casupal en su área tipo se divide en dos miembros: el inferior se caracteriza por la predominancia de areniscas de grano fino y arcillas, la presencia de material carbonoso y por la estratificación en capas delgadas a medias. El miembro superior contiene areniscas de grano grueso y conglomerados, menos material carbonoso, ausencia de carbones y estratificación en capas masivas. En términos generales, la formación se hace de grano más grueso hacia el tope.	Los sedimentos de la Formación Casupal representan una facies de sedimentación piemontina-costera con influencia marina litoral restringida (GONZÁLEZ DE JUANA, *et. al.*, 1980).	Región al norte del rancho Casupal, en la confluencia de los ríos Guachipano y Los Cumarebos, al sur del cerro Misión, distrito Silva del estado Falcón, MÉNDEZ (1967).	WHEELER (1960, 1963) detalla extensamente la equivalencia de la Formación Casupal con la parte inferior de las formaciones Churuguara y El Paraíso al noroeste del área tipo de la formación, pero esto no parece concordar con la determinación de edad de MÉNDEZ (1967). WHEELER (1960, 1963) anota que el contacto inferior se desconoce en la localidad tipo, pero que más al sur la Formación Casupal yace discordantemente sobre rocas eocenas.

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO	FORMACIÓN AGUA LINDA	La Formación Agua Linda consiste en una intercalación de arcillas, lutitas y calizas con menor proporción de conglomerados calcáreos, areniscas calcáreas y limolitas. Las lutitas y arcillas que constituyen la mayor parte de la formación, son calcáreas, limosas o arenosas, de color gris verdoso a gris azulado, micáceas y/o yesíferas, incluyendo concreciones, restos de plantas y conchas pequeñas; frecuentemente tienen olor a petróleo. Calizas grises a pardo amarillentas, duras, en lentes o en capas de unos 20 a 40 cm de espesor y limolitas grises, duras, se encuentran frecuentemente entre las arcillas y lutitas. MÉNDEZ (1967) indica un espesor de 1295 m, valor estimado ya que en la sección tipo no aflora la base ni el tope. Mas al este, la formación parece aumentar de espesor. CAMACHO *et al.* (1989) midieron un espesor parcial de 950 m en la región de Sanare-Buena Vista.	La Formación Agua Linda representa ambientes marinos similares a los de la Formación Pozón, pero menos profundos y más cercanos a la costa. En tanto el ambiente de la Formación Casupal infrayacente, es de carácter más continental e indica una transgresión marina durante el Mioceno Medio, hacia el borde sur de la subcuenca de Casupal (GONZÁLEZ DE JUANA *et al.*, 1980).	MÉNDEZ (1967) propuso como sección tipo, la que aflora en la quebrada El Silencio, tributaria del río Guachípano, a 2 km al este de la confluencia de dicho río con el río Los Cumarebos, donde se origina el río Agua Linda, al sur de cerro Misión, distrito Silva, estado Falcón. Hoja 6448, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional.	MÉNDEZ (1967) correlaciona la Formación Agua Linda con el Miembro Husito de la Formación Pozón de la cuenca de Agua Salada. La Formación Agua Linda yace concordantemente sobre la Formación Casupal, aunque el contacto no es visible en la sección tipo, sino en las tributarias del lado sur de la quebrada Casupal, al este de dicha sección. En el tope, la formación está cubierta discordantemente por la Formación Capadare.

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO	FORMACIÓN CAPADARE	DÍAZ DE GAMERO (1985) describe la caliza de Capadare en los cerros Capadera, Mirimire y Jacura como de color claro, compuesta mayormente por algas, con foraminíferos y fragmentos bioclásticos diversos. Localmente hay horizontes con abundantes equinoides irregulares del tipo *Clypeaster*. Forma masas aproximadamente tabulares, que se elevan sobre la topografía baja y ondulante de las lutitas de la Formación Agua Salada. WIEDENMAYER (1924) la describe originalmente como una caliza arrecifal compuesta de *Lithothamnium*, de colores claros, formando farallones abruptos blanquecinos. DÍAZ DE GAMERO (1985) reporta espesores variables entre 150 y 300 m. Se ha medido un espesor de 144 m en el cerro Chichiriviche (LAMUS *et al.*, 1989). Más hacia el oeste en los cerros Agua Linda, Riecito y Misión se reportan 135 m (SENN, 1935).	RENZ (1948), basado en consideraciones geológicas regionales de la cuenca de Falcón, indicó un paleoambiente de mar somero para las facies calcáreas de la Formación Capadare. DÍAZ DE GAMERO (1985) en un estudio detallado de la secuencia estratigráfica en los tres cerros al este del río Hueque i.e. Capadare, Mirimire y Jacura deduce que las calizas son el resultado de desarrollos carbonáticos aislados, sin influencia de la costa y del continente, en condiciones de mar completamente abierto, de aguas claras y energía moderada, bien oxigenadas, en un clima tropical. Dentro de este marco general, la caliza de Jacura muestra un nivel de energía sistemáticamente más bajo que en los cerros septentrionales y una influencia mayor de condiciones pelágicas. En el cerro de Píritu se observó un mayor porcentaje de foraminíferos planctónicos en la parte oriental, con respecto a las laderas occidentales, probable indicación de condiciones de mar abierto en esa dirección.	La formación tiene su holoestratotipo (localidad tipo) en el cerro Capadare, distrito Acosta del estado Falcón, (WIEDENMAYER, 1924, p. 510-512), Hoja N° 6449, esc. 1:100.000, Cartografía Nacional.	La Formación Capadare correlaciona cronoestratigráficamente con el Miembro de Arcillas de Huso de la Formación Pozón, (RENZ, 1948). DÍAZ DE GAMERO (1985) la correlaciona con la Formación Socorro de Falcón norcentral. El contacto inferior es discordante con las formaciones Casupal y Agua Linda (MÉNDEZ, 1967) y con las rocas metamórficas en el valle del río Aroa (BELLIZZIA Y RODRÍGUEZ, 1967). DÍAZ DE GAMERO (1985) reporta contacto transicional de lutitas moderadamente calcáreas a muy calcáreas y calizas en varias localidades al este del río Hueque. GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) mencionan que el contacto superior, con la Formación Ojo de Agua es concordante y transicional diacrónico.

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
MIOCENO	FORMACIÓN OJO DE AGUA	RENZ (1956, LEV I). La formación consiste predominantemente de areniscas micáceas interestratificadas con arcillas, conglomerados, calizas arenosas y nodulares, con ostras y otros moluscos. El espesor de la formación varía entre 0 y 200 m (LEV I, 1956).	La formación se depositó en aguas salobres a marinas muy someras, no lejos de la costa (RENZ, LEV I, 1956).	La localidad tipo se encuentra en el cerro Ojo de Agua de Pozón, distrito Acosta, estado Falcón y la sección tipo se encuentra en la continuación hacia el sur de Loma Luca, sección tipo de la Formación Pozón (RENZ, LEV I, 1956). Hoja de Cartografía Nacional No. 6448, escala 1:100.000.	RENZ (1948) la correlaciona con la Formación La Vela de Falcón central pero, por su edad, parece más bien corresponder a la parte superior de la Formación Caujarao. La Formación Ojo de Agua se encuentra en contacto concordante con la Formación Pozón infrayacente, estando el contacto entre las dos formaciones a nivel de la base de la primera arena masiva. Hacia el oeste del anticlinal de Pozón-El Mene de Acosta, la formación se interdigita con las arcillas del Miembro Huso (Formación Pozón), hasta reemplazarlas totalmente. Hacia el este ocurre al contrario, pues las arcillas del Miembro Huso se interdigitan con la Formación Ojo de Agua, hasta reemplazarla (RENZ, 1948 y 1956).

Tabla 3.1, continuación

EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	LITOLOGÍA Y ESPESOR	AMBIENTES SEDIMENTARIOS	LOCALIDAD TIPO	CORRELACIÓN Y CONTACTOS
PLIOCENO	FORMACIÓN PUNTA GAVILÁN	Consiste, esencialmente de una intercalación de calizas margosas limolíticas, con margas y lutitas calcáreas colores grises y ocasionales areniscas calcáreas delgadas. La litología más típica de la formación la constituyen las calizas margosas de color amarillo ocre, con material terrígeno y cantidad variable de glauconita, generalmente macrofosilíferas,conteniendo ocasionalmente una riquísima fauna de moluscos y equinoides. El espesor es de 55 m en la sección tipo, la más completa de la unidad. En Sabanas Altas tiene unos 30 m (DÍAZ DE GAMERO, 1970), mientras que en Boca Ricoa no llega a 20 m (DÍAZ DE GAMERO, 1985).	DÍAZ DE GAMERO (1970, 1985) interpreta que la Formación Punta Gavilán inicia su sedimentación en el sector oriental, en un ambiente marino, a profundidades superiores a los 100 m dentro de la zona sublitoral externa.	La localidad tipo designada por RUTSCH (1934) se encuentra en las acantilados de Punta Gavilán, distrito Zamora, estado Falcón. DÍAZ DE GAMERO (1970) designó como tipo la sección expuesta entre Punta Gavilán y Punta Zamuro.	La formación se correlaciona con la parte superior de las formaciones Turupia, El Veral y Tucupido, de Falcón norte central (DÍAZ DE GAMERO ET AL., 1977). El contacto inferior es discordante sobre la Formación Agua Salada en forma diacrónica, ya que este contacto es más joven en el oeste que en el este. La parte superior de la formación está expuesta a la erosión.

Adicionalmente a las unidades litoestratigráficas anteriormente descritas, se han identificado cuerpos de rocas ígneas y metamórficas, los cuales se indican a continuación:

3.3.1 Macizos Ígneos-Metamórficos

Los macizos ígneos - metamórficos se encuentran hacia el sureste de la zona de estudio en el límite entre los estados Falcón y Yaracuy. Según LOZANO & MUSSARI (2007), las rocas ígneo-metamórficas aflorantes en la zona pertenecen al complejo orográfico de la región norte costera del país, que esta formado por una superposición de napas. BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1976), indican que en el macizo Tarana se encuentra la unidad Esquisto de Aroa, correspondiente a la Napa Caracas debido a la similitud del Esquisto de Aroa con el Esquisto de Las Mercedes de la Asociación Metasedimentaria Caracas, en el macizo San Quintín se encuentran las unidades Meta-gabro anortosítico de Yumare y Metavolcánicas de San Quintín, en los macizos La Zurda y Salsipuedes se encuentra la unidad Metagabro anortosítico de Yumare, estos tres últimos cerros fueron interpretados como correspondientes a la Napa Caucagua-El Tinaco-Yumare-Siquisique, llamado así por BELLIZZIA & RODRÍGUEZ (1976) (Tabla 3.2; Fig. 3.7).

Tabla 3.2 Unidades ígneo-metamórficas presentes en la zona de estudio

Edad	Unidad
Cretácico?	Metavolcanosedimentarias de San Quintín
	Serpentinita
Jurásico Tardío-Cretácico	Esquisto de Aroa
Precámbrico (Proterozoico tardío?)	Meta-gabro anortosítico de Yumare

Unidades ígneo-metamórficas presentes en la zona de estudio

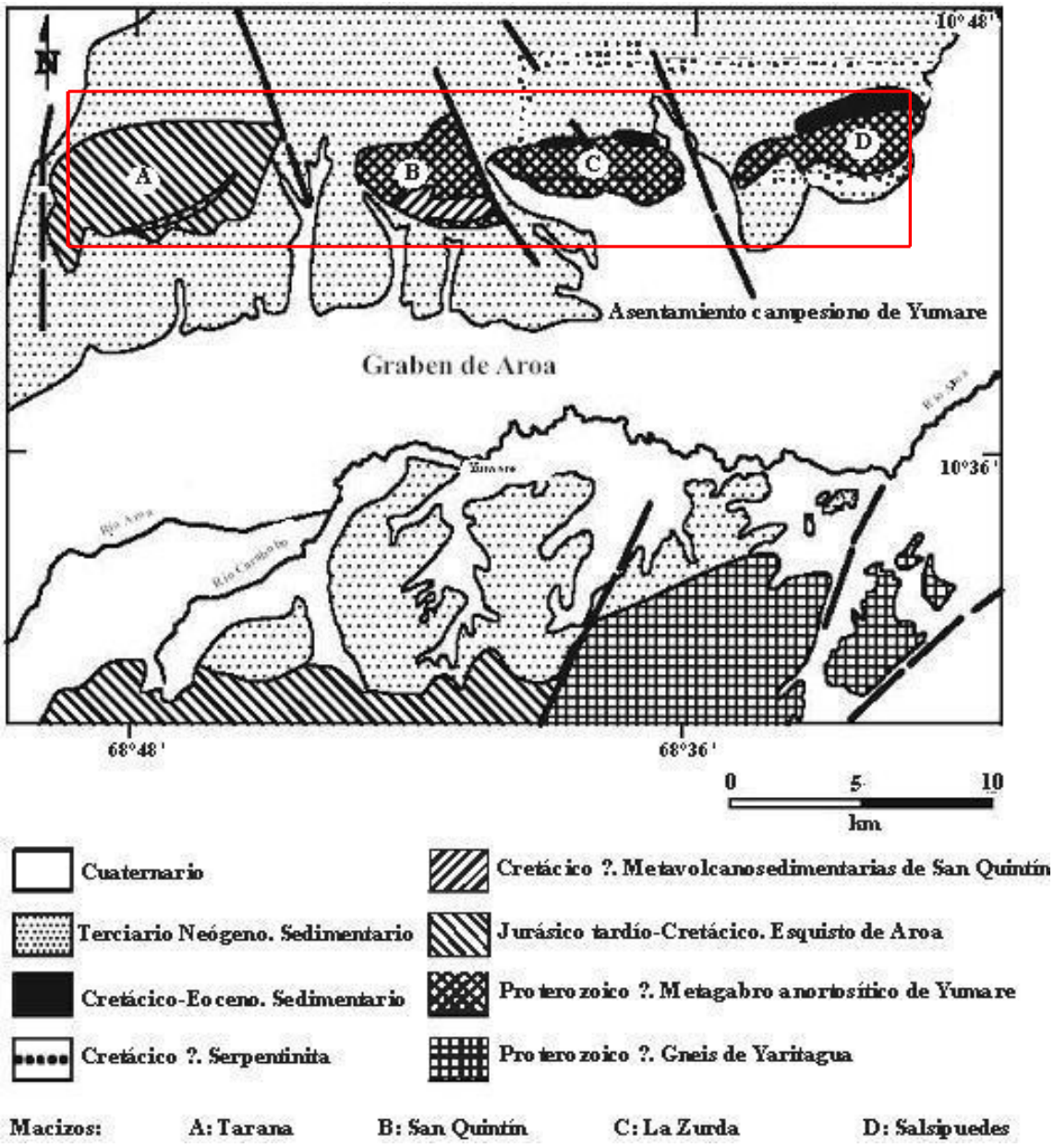


Figura 3.7 Mapa geológico de la zona de Yumare (Tomado de AUDEMARD ET AL., 1995)

3.3.2 Rocas Volcánicas de la zona de Sanare

NATERA (1957), fue el primer autor en notar la presencia de cuerpos de rocas volcánicas en la zona de Sanare, estado Falcón, posteriormente son mencionadas por GONZÁLEZ (1979). CAMACHO & MIJARES (1989), cartografían geológicamente la zona de Sanare y reportan en la quebrada Yaracuibare una serie de cuerpos ígneos de "andesita" sin mayores descripciones, ubicándose dichos cuerpos en dos afloramientos separados en una extensión de aproximadamente 210 m (FOURNIER *et al.,* 2003). Se encontraron varios diques (o mantos) de basalto, intrusionando las lutitas de la Formación Cerro Misión (Eoceno Tardío) (Fig.3.8).

Debido a la concordancia geométrica entre la roca caja (arenisca y lutita) y las rocas ígneas, se pudiera pensar en un *sill* como estructura intrusiva, concordante con la roca caja, sin embargo no se puede asegurar en todos los casos debido a la erosión y remoción del material de aspecto cocinado adosado a los diques. De cualquier modo son tabulares por lo tanto se descarta sean apófisis, que son por naturaleza irregulares (FOURNIER *et al.* 2003). (Fig. 3.9)

Los resultados petrográficos indican que las rocas ígneas han sido alteradas por un proceso de hidratación y de carbonatización, ya que algunos granos conservan los hábitos de minerales máficos, tales como olivino y piroxeno, que han sido reemplazados por antigorita y calcita, presentándose ahora seudomorfos. Es muy probable que el calcio de los carbonatos haya sido aportado por la matriz plagioclásica (FOURNIER *et al.,* 2003).

Figura 3.8. Lutitas de la Formación Cerro Misión en la zona de Sanare, estado Falcón (Tomada de FOURNIER *et al.,* 2003).

Figura. 3.9. Cuerpos de rocas volcánicas en la zona de Sanare, estado Falcón (Tomada de FOURNIER *et al.* 2003).

3.4. Relación Tectónica y Sedimentación en la cuenca de Falcón

De acuerdo con MACELLARI (1995), el complejo contacto de las placas del Caribe y Sudamérica registra una fase cretácica tardía a eocena de colisión de terrenos, que fue seguida por desplazamientos laterales durante el Eoceno Tardío hasta el Eoceno Temprano. En este estudio se analizó la estratigrafía depositada durante esta última etapa en una serie de cuencas *pull-apart* episuturales.

Basado en el estudio de sísmica regional, pozos, trabajo de campo y análisis de la literatura, este autor indica que esta sucesión se puede dividir en cuatro secuencias depositacionales delimitadas por discordancias. Estos ciclos son: Eoceno Tardío - Oligoceno Temprano (Fig. 3.10), Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Figs. 3.11 y 3.12), Mioceno Medio-Tardío y Plioceno tempano (Fig. 3.13).

Las características estratigráficas de la región permiten inferir que la sedimentación en la cuenca se generó en varios ciclos que se muestran a continuación, según MACELLARI (1995):

3.4.1. Ciclo D (Eoceno Tardío)

Los remanentes de depositación del Eoceno Tardío y del Oligoceno Temprano están mayormente restringidos a depocentros angostos orientados noreste-sureste, que fueron controlados por fallas (Fig. 3.10).

Al oriente de Falcón, las rocas del Eoceno tienen algo más de 400 m de espesor y están incluidas en la Formación Cerro Misión que está constituida por lutitas negras calcáreas. Estas lutitas contienen microfósiles de *Globigerinatheka semiinvoluta* que datan del Eoceno Tardío. Esta formación reposa discordantemente sobre rocas del Eoceno Medio.

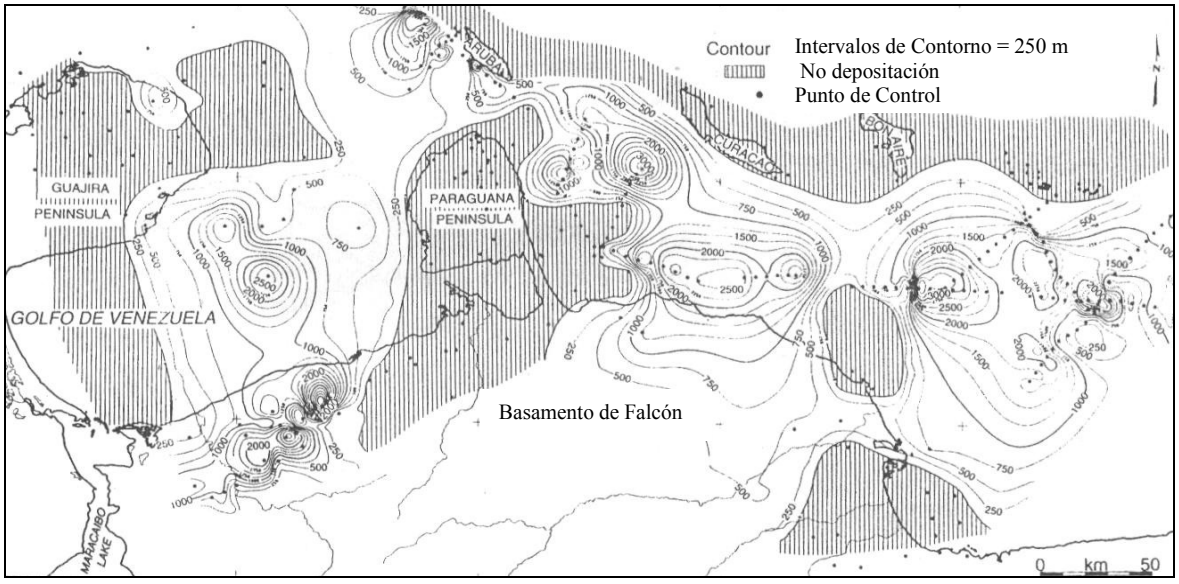


Figura 3.10 Mapa isópaco del Eoceno. Secuencia D (Tomado de MACELLARI, 1995)

3.4.2. Ciclo C (Oligoceno-Mioceno Temprano)

Durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Tardío, la sedimentación estuvo aún controlada por fallas, pero fue más distribuida arealmente. Los ritmos de sedimentación de estas fallas de crecimiento fueron extremadamente altos (hasta 350 m/ m.a) pero decrecieron en general a través del tiempo (Fig. 3.11).

De acuerdo con MACELLARI, (1995), durante el Mioceno Temprano se depositó el subciclo C1. En el centro de la cuenca, comienza la sedimentación con lutitas de la Formación Agua Clara, una secuencia de lutitas oscuras ferruginosas con intercalaciones de areniscas lodosas y calcáreas con presencia de glauconita, con espesores de 1320 m a 1600 m. Hacia el margen sur y suroeste de la sierra de San Luis, el ciclo C1 se inicializa con la Formación Pedregoso, que tiene un espesor que va desde los 120 m hasta los 940. Litológicamente se trata de lutitas con areniscas intercaladas y limos bioclásticos que han sido interpretados como depósitos turbidíticos proximales (Fig. 3.12).

Durante el Oligoceno-Mioceno Tardío, en la región de Falcón oriental, se desarrolló una cuenca abierta hacia el noreste, probablemente comunicada con la cuenca de Falcón central donde se sedimentó un gran volumen de arcillitas calcáreas conocida como la Cuenca de Agua Salada, posteriormente ampliada en dos subprovincias: la subcuenca del Hueque donde se depositaron arcillitas y la subcuenca de Casupal donde se desarrollaron facies

marginales de mares poco profundos, costeros y continentales. Estas subcuencas están separadas por el Alto de Cerro Misión (GONZÁLEZ DE JUANA *et al*, 1980).

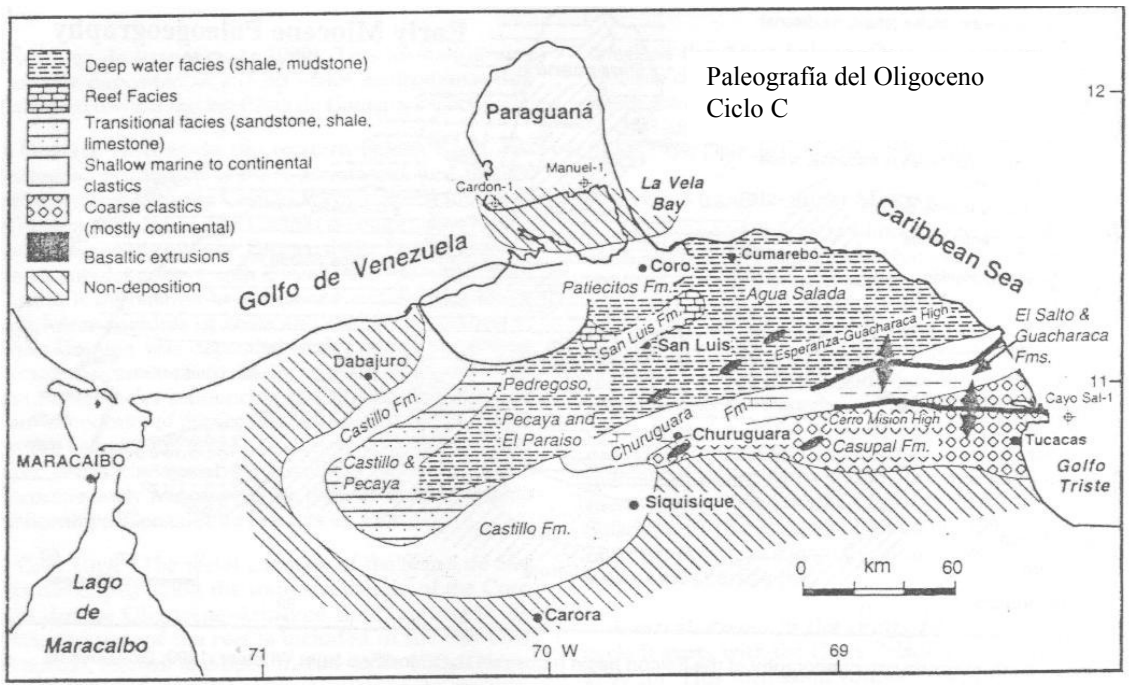


Figura 3.11 Paleogeografía de Oligoceno. Ciclo C (Tomado de MACELLARI, 1995).

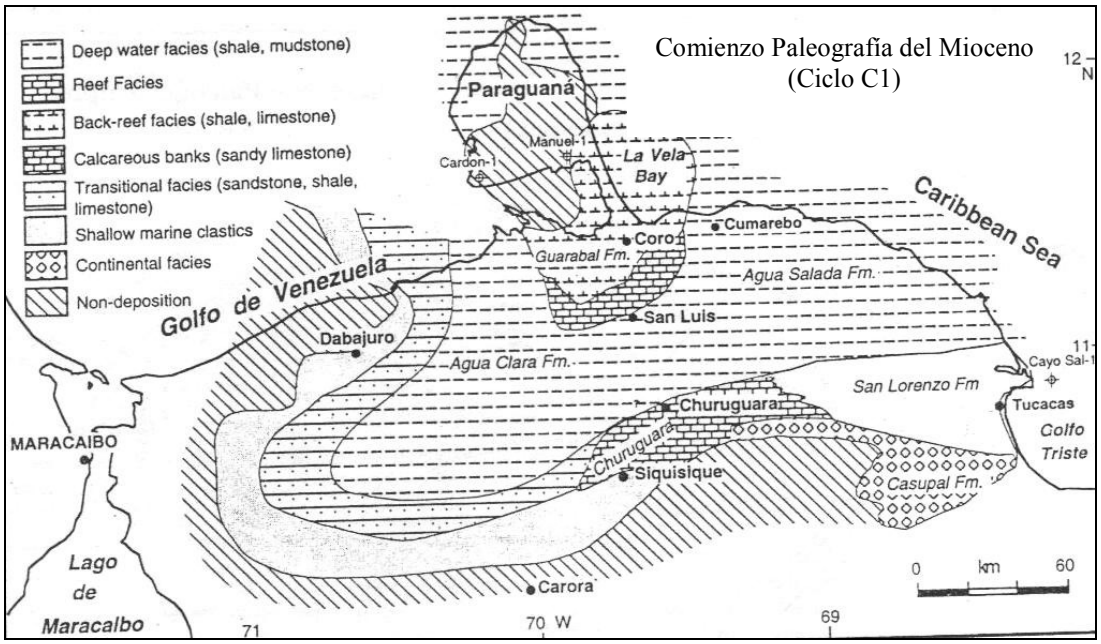


Figura 3.12 Paleogeografía de Oligoceno. Subciclo C.1. (Tomado de MACELLARI, 1995).

3.4.3. Ciclo B (Mioceno Medio-Tardío)

Durante el ciclo B (Fig.3.13), a finales del Mioceno Temprano, los patrones sedimentarios cambiaron significativamente debido a la caída del nivel del mar o el rápido levantamiento asociado con los primeros estadios de deformación. Después de este evento, se inició otro período de subsidencia y un nuevo ciclo de sedimentación se extiende en toda la cuenca e incluye a su vez terrenos que eran positivos como la plataforma de Dabajuro y la Península de Paraguaná. Nuevamente se levantan áreas al sur las cuales actúan como considerables fuentes de sedimentos, la sedimentación se desarrolla en ambientes plataformales someros restringidos, exceptuando la parte noreste de la cuenca y la parte mas norte de la península de Paraguaná donde persisten las facies profundas.

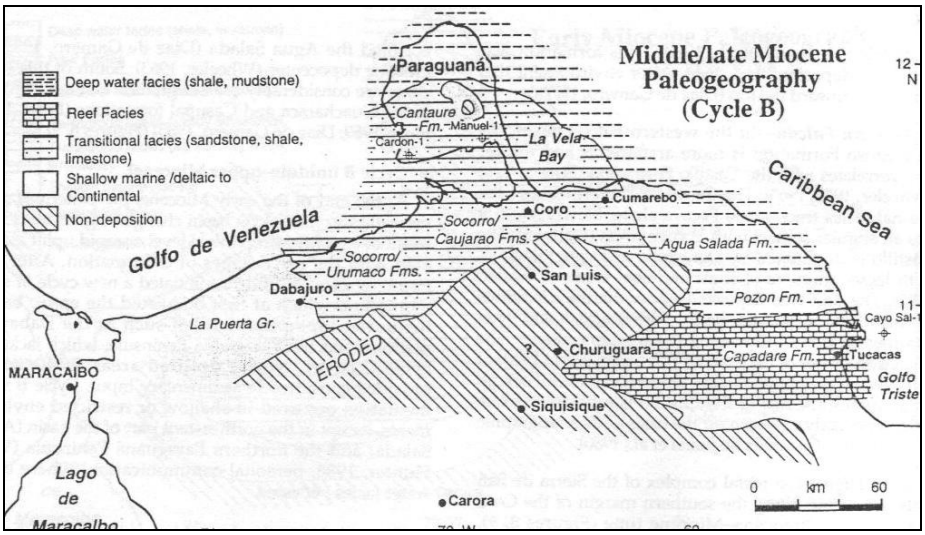


Figura 3.13 Paleogeografía de la cuenca de Falcón durante el Mioceno Medio-Tardío (Tomado de MACELLARI, 1995).

3.4.4. Ciclo A (Plioceno)

La distribución original del ciclo A, ha sido interrumpida por la erosión. Hubo sedimentación en los depocentros de Urumaco (1400 m), en el depocentro al norte de la Península de Paraguaná (1200 m) y en el depocentro del Golfo Triste (1800 m). En tierra, las secuencias aflorantes muestran sedimentación marino somera y fluvio-deltaica durante

el Plioceno. En este periodo la deformación tectónica se tradujo en la inversión de la cuenca y en el levantamiento del Anticlinorio de Falcón.

Facies clásticas gruesas se depositaron al norte del levantamiento del Anticlinorio de Falcón. Al noreste las rocas se componen de sedimentos calcáreos, margas fosilíferas y limos argiláceos de las formaciones Paraguaná y las calizas limolíticas impuras de la Forrmación Punta Gavilán, discordantes sobre el Grupo Agua salada en la parte oriental.

Finalmente, se tiene que el desplazamiento en dirección E-O entre la placa del Caribe y la placa Suramericana, resultó en la formación de zonas *pull-apart* extensivas a lo largo del margen norte de Suramérica, entre el *ridge* de Curazao y el sistema de fallas San Sebastián-Oca. Este desplazamiento lateral causó zonas de subsidencia controlada por un conjunto de fallas normales por el desarrollo de depocentros alargados.

Magmas alcalinos basálticos fueron inyectados en la corteza como consecuencia del adelgazamiento cortical durante el Oligoceno-Mioceno, en este mismo periodo el eje de máxima subsidencia migra al este ubicándose en el surco de Urumaco y al noreste de La Vela de Coro. Continúa el desplazamiento a través de la falla de Oca resultando en la deformación transpresiva de estratos antiguos hasta que en el Plioceno la cuenca comienza a invertirse por los esfuerzos tectónicos que levantan la cuenca resultando la configuración actual de la misma.

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica manejan información territorial de diversos tipos, en función de los modelos de datos y de la naturaleza de las variables. Los SIG comenzaron traduciendo la información preexistente, reflejada en su mayor parte en forma de mapas temáticos de naturaleza intrínsecamente nominal. La traducción de este tipo de información se realizó en su momento de forma bastante directa y poco traumática, a pesar del cambio de métodos de trabajo. Sin embargo, este enfoque inicial se reveló pronto como insuficiente, por lo que comenzaron las adaptaciones y la introducción de conceptos nuevos, inexistentes en la cartografía convencional como, por ejemplo, los relativos a vinculación con bases de datos o a la consideración de las propiedades topológicas de los elementos gráficos. Actualmente el cambio sigue y las tendencias van aparentemente a remolque de las tecnologías orientadas a objetos y de los sistemas distribuidos, conceptos ambos nacidos en el ámbito de la informática, con lo que la separación entre el mapa convencional y el mapa virtual de los SIG se hace más profunda (INSTITUTO GEOGRÁFICO SIMÓN BOLÍVAR IGVSB, 2008).

La captura de la información se ha hecho tradicionalmente de forma vectorial, categorías delimitadas mediante líneas con un trazado, en principio, exacto. El manejo de información cuantitativa y con valores no limitados a un cierto número de categorías, sólo se ha hecho posible con la generalización de los medios informáticos (Fig. 4.1).

Figura 4.1 Datos que integran un SIG (Tomado de IGVSB, 2008).

Los SIG permiten gestionar y analizar la información espacial, por lo que han venido a constituirse en la alta tecnología de los geógrafos y otros profesionales que trabajan sobre el territorio. Se trata de sofisticadas herramientas multipropósito con aplicaciones en campos tan dispares como la planificación urbana, la gestión catastral, la ordenación del territorio, el medio ambiente, la planificación del transporte, el mantenimiento y la gestión de redes públicas, el análisis de mercados, etc. (BURROUGH & MCDONNELL, 1986).

Un Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de *hardware, software,* datos geográficos y personal; diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas, la información geográficamente refinanciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. Esta información debe encontrarse geo-referenciada, lo que significa que debe poseer coordenadas geográficas (latitud-longitud) y reticulares, que permitan graficarla en mapas (Figs. 4.2a, 4.2b).

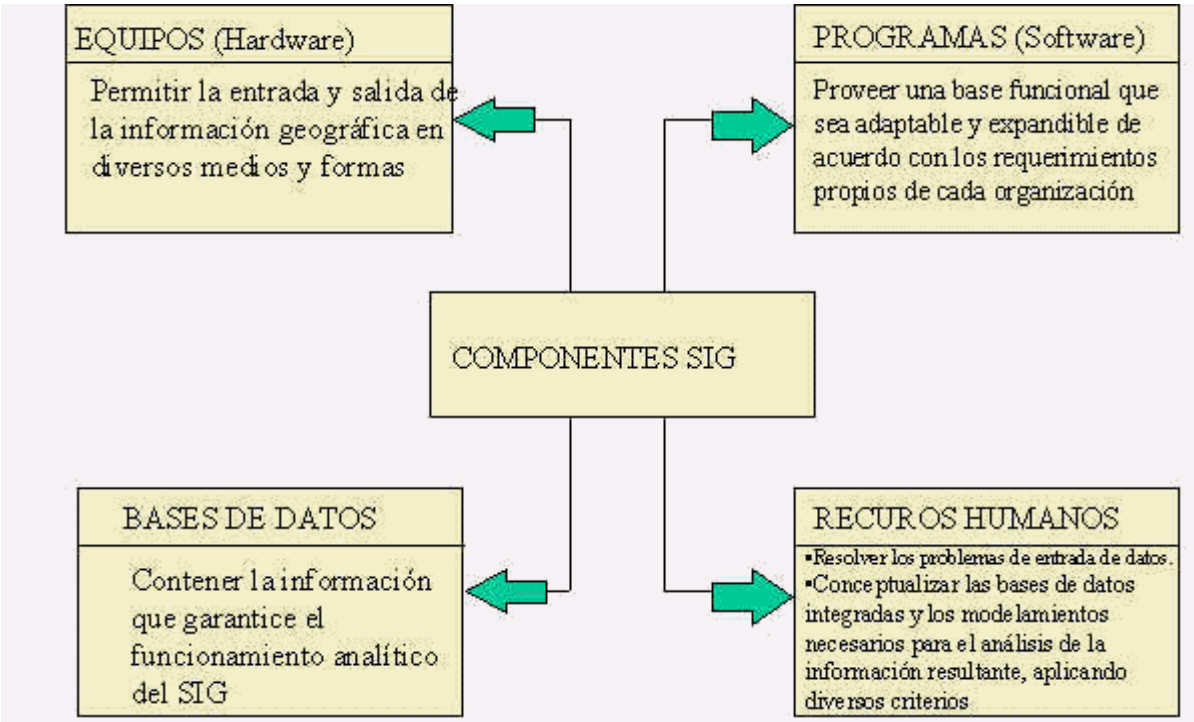


Figura 4.2a Funciones de los componentes de un SIG (Tomado de COULMAN, 2001).

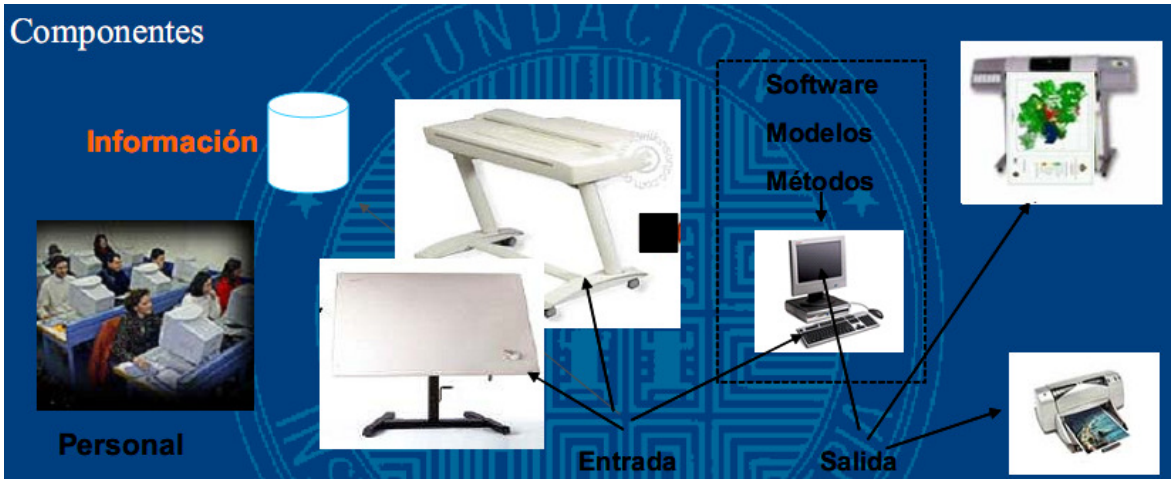


Figura 4.2b Características de los componentes de SIG (Tomado de IGVSB, 2008).

Según ALZATE (2001), los SIG manejan la información digital del terreno en capas o niveles, es decir, descomponen la realidad en distintos temas, como por ejemplo, relieve, hidrografía, vías de comunicación y otros. Por medio del uso de estos sistemas, el usuario puede combinar la información para crear mapas de síntesis o análisis, según su uso y requerimiento. Para un estudio del territorio, los SIG pueden entregar información de

fenómenos geográficos diciendo qué existe, dónde se localiza, qué y cómo ha evolucionado y cómo se distribuye.

Existe una gran variedad de *software* diseñado para este fin. Entre algunos de los más versátiles se encuentran: ENVI® 4.2, ArcGIS® 9.1, ERDAS IMAGINE® 8.5, los cuales fueron los seleccionados para la realización de este trabajo de investigación debido a su disponibilidad.

4.1.1. Técnicas Utilizadas en los Sistemas de Información Geográfica

4.1.1.1 La Creación de Datos

Las modernas tecnologías SIG trabajan con información digital, para la cual existen varios métodos utilizados en la creación de datos digitales. El método más utilizado es la digitalización, donde a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo se transfiere a un medio digital por el empleo de un programa de Diseño Asistido por computadora (DAO o CAD) con capacidades de geo-referenciación (IGVSB, 2008).

4.1.1.2. La Representación de los Datos

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: *raster* y vectorial (IGVSB, 2008).

4.1.1.3. Raster

Los datos *raster* son, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. El modelo de SIG *raster* o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor (IGVSB, 2008; Fig. 4.3).

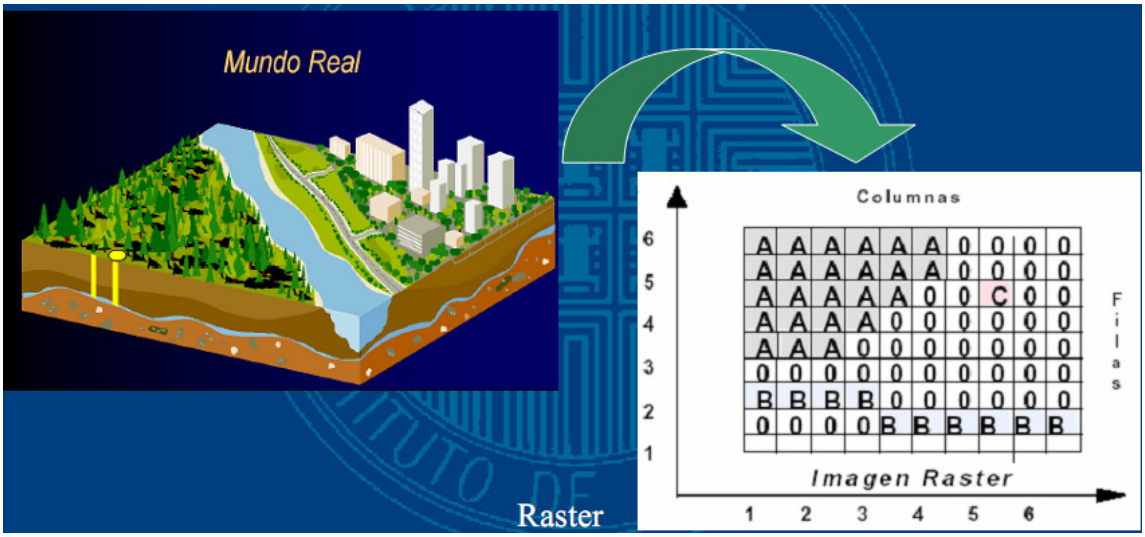


Figura 4.3 Estructura de datos *raster*, donde se observa el número de celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor (Tomado de IGVSB, 2008).

4.1.1.4. Vectorial

En un SIG, las características geográficas se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras.

En los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Por ejemplo, una base de datos que describe los lagos puede contener datos sobre la batimetría de estos, la calidad del agua o el nivel de contaminación. Esta información puede ser utilizada para crear un mapa que describa un atributo particular contenido en la base de datos. Los lagos pueden tener un rango de colores en función del nivel de contaminación. Además, las diferentes geometrías de los elementos también pueden ser comparados. Así, por ejemplo, el SIG puede ser usado para identificar aquellos pozos (geometría de puntos) que están en torno a 2 kilómetros de un lago (geometría de polígonos) y que tiene un alto nivel de contaminación (IGVSB, 2008).

4.2 Sensores y Satélites

Existen dos tipos de sensores remotos: sensores pasivos y sensores activos (Fig.4.4)

La energía proveniente del sol puede ser reflejada por la tierra (visible) o bien absorbida y luego emitida por la tierra (IR térmico). Los sensores que utilizan la energía naturalmente disponible son llamados sensores pasivos (Fig. 4.4).

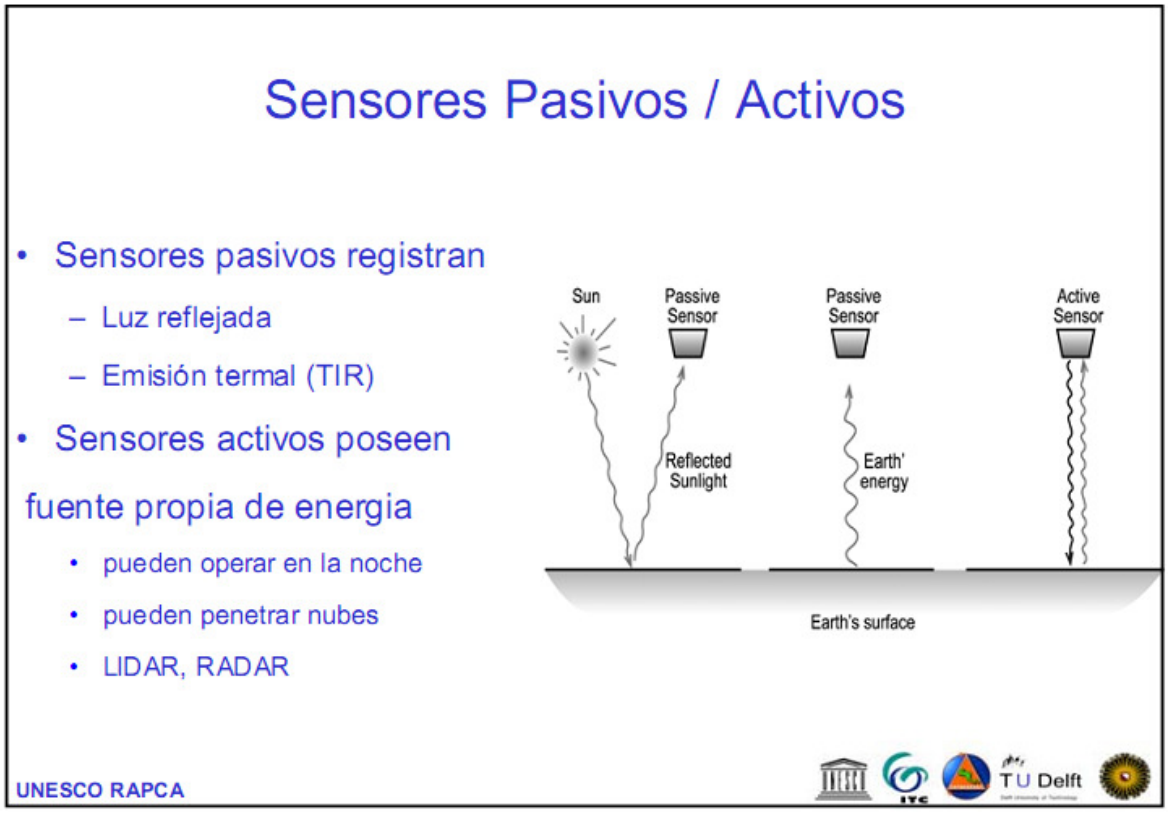


Figura 4.4 Características de los sensores pasivos y activos (Tomado de: www.introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf).

Según CAMPBELL (1981), los sensores activos proveen de su propia fuente de energía para "iluminar" la superficie terrestre. Estos sensores emiten radiación dirigida hacia el área de interés y luego detectan la porción de esa radiación que es reflejada. La principal ventaja de estos sensores es que pueden operar de día y de noche y que pueden emitir radiación diferentes a la emitida por el sol (Ejem. microondas), pudiendo obtener otra información de la superficie (Fig. 4.5).

Para que los sensores puedan obtener la información es necesario que estén montados sobre algún soporte o plataforma. Los satélites son las plataformas más comunes para sensores remotos, aunque también existen sensores remotos montados sobre aviones o sobre estructuras fijas (Ejem radiómetros). Los satélites tienen características particulares que los diferencian entre ellos. La órbita de un satélite describe de manera que se ubica en relación a la Tierra.

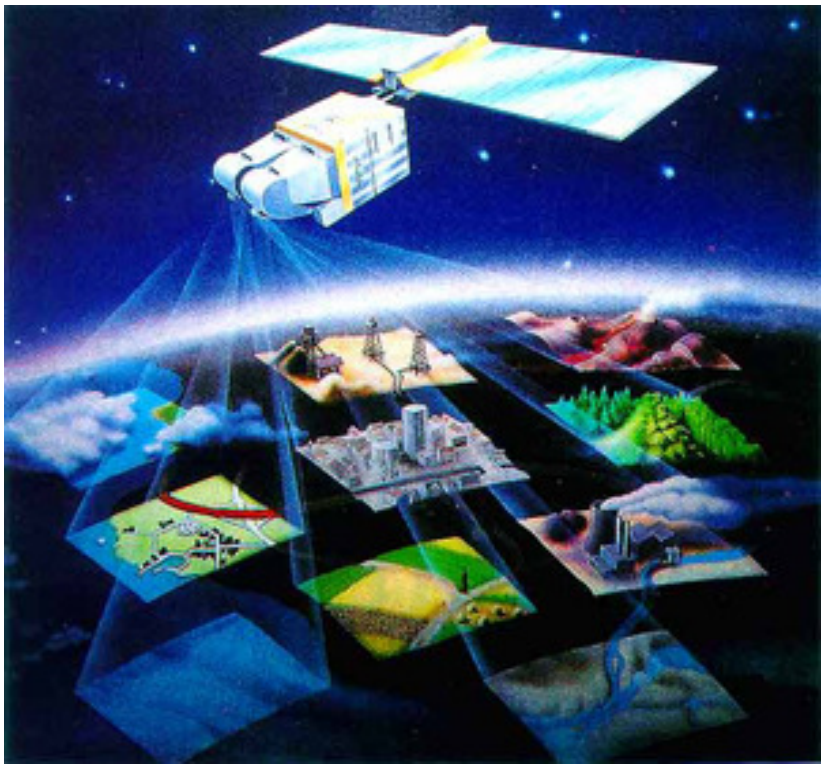


Figura 4.5 Radiaciones emitidas por sensores activos (Tomado de: www.introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf).

4.2.1. Características de las Imágenes Satelitales y Percepción Remota

De acuerdo con MÉNDEZ (2002), una imagen satelital está compuesta por información proveniente de diferentes longitudes de onda, organizada en diferentes canales o bandas para un sensor determinado. De esta manera se obtiene información no solo en el espectro visible, sino también en otras longitudes de onda a las cuales el ojo humano no es sensible (Fig. 4.6).

La utilización de las imágenes obtenidas por los satélites de percepción remota comenzó poco después del lanzamiento del Landsat 1. Desde entonces, las aplicaciones de estas imágenes han crecido rápidamente hacia la mayor parte de las áreas de investigación en usos del suelo y prospección de recursos naturales. Es probable que el área de investigación más difícil en percepción remota desde satélite o avión sea la geológica, puesto que requiere de varias transformaciones en la imagen multiespectral, y de la integración de datos topográficos, geofísicos, geoquímicos, petrográficos y geobotánicos, todos ellos coordinados con un buen apoyo de campo (IGVSB, 2008).

En cuanto a los fenómenos estáticos, los aspectos importantes a estudiar son: la distribución, carácter y estructura de cuerpos rocosos, geoformas, litologías y fallas estructurales. En geología es particularmente importante la visión de conjunto, pues las geoformas, tales como las cadenas montañosas, los valles, las cuencas o las mesetas, están estrechamente interrelacionadas y su extensión puede abarcar una gran área; de manera que para evaluar geológicamente una región se requiere de una visión general (IGVSB, 2008).

En este aspecto la percepción remota satelital marca una ventaja sobre la fotografía aérea ya que se pueden observar grandes extensiones en la misma imagen.

Las observaciones desde el espacio de fenómenos estáticos tienen dos aplicaciones prácticas de consecuencias inmediatas: una mejoría en la cartografía geológica y la obtención de recursos más eficientes para la exploración en campo. Estas aplicaciones traen consecuencias directas en el diseño y desarrollo de proyectos, tales como líneas de ferrocarril, carreteras, presas y, en general, de plantas industriales.

Las aplicaciones de la percepción remota a la geología misma, en el marco referencial de los fenómenos estáticos referidos a los recursos naturales, se dirigen a dos grandes recursos de los cuales Venezuela es un importante productor: la minería y el petróleo (IGVSB, 2008).

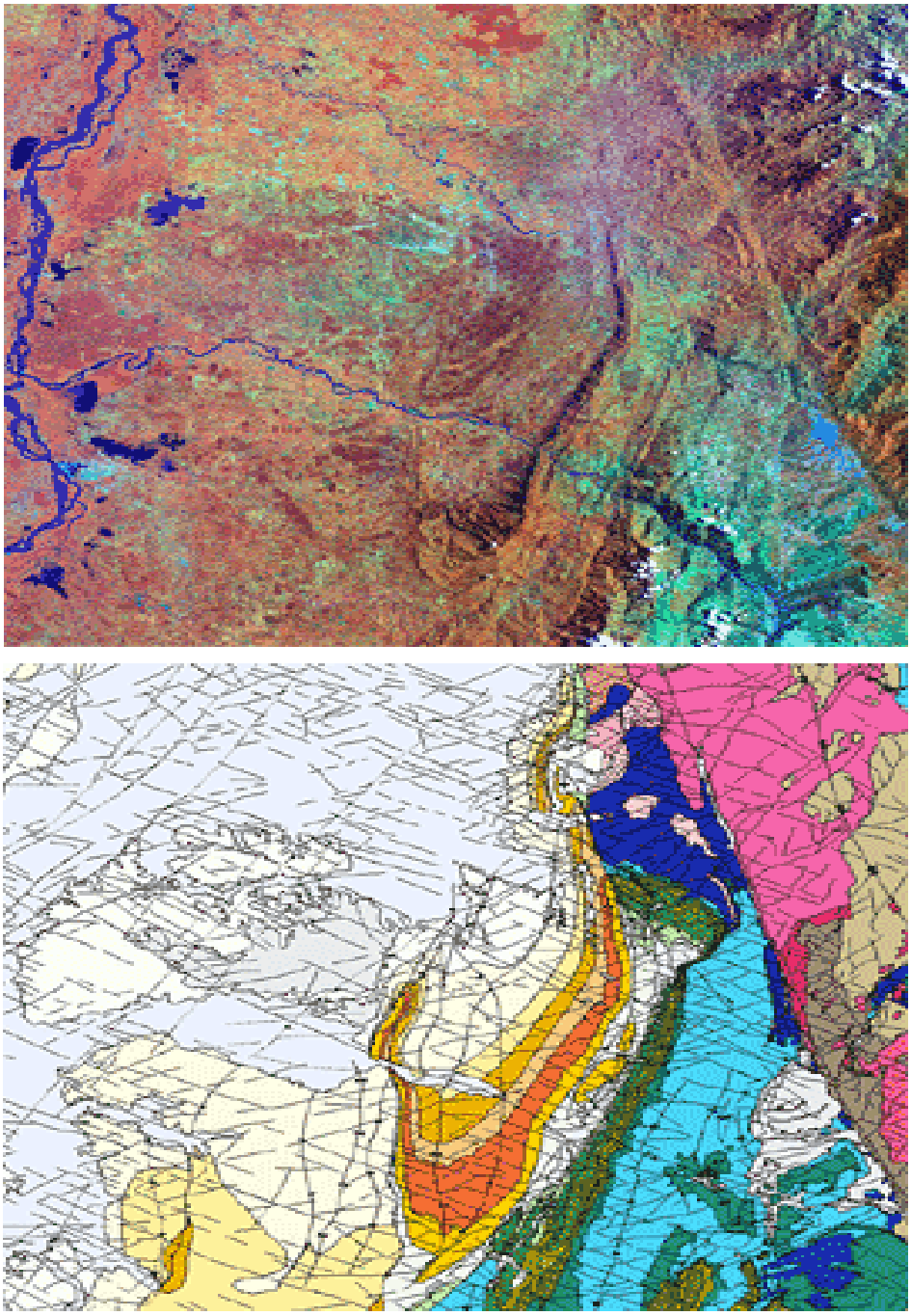
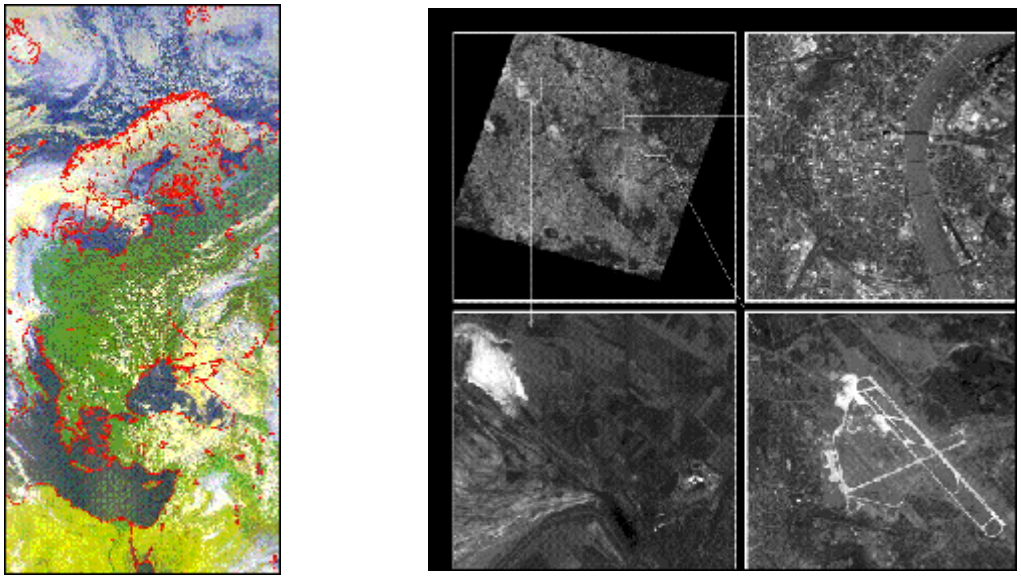


Figura 4.6 Comparación del mapa de interpretación lito-estructural con la imagen de Landsat correspondiente (Tomado de IGVSB, 2008).

Las imágenes satelitales (condicionada por las características de los sensores) están caracterizadas por una serie de parámetros espaciales y espectrales:

1. Resolución Espacial: Es el mínimo tamaño del pixel. Constituye la menor dimensión que el sensor es capaz de individualizar en la superficie terrestre. Esta propiedad, a su vez, está íntimamente relacionada con la dimensión terrestre del ancho de faja barrido por el sensor (Fig. 4.7).



4.7 a 4.7 b

Figura 4.7. Resolución espacial. En la figura se puede observar la diferencia entre una imagen proveniente de un sensor con una resolución espacial de 1.000 m (Fig. 4.7 a) y otra de 30 m de tamaño de pixel (4.7 b), en cuanto al detalle de los elementos que se pueden observar y a la superficie abarcada por cada una de ellas (Tomado de : www.introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf).

Tamaño de píxel: está determinado por la resolución espacial y es el tamaño de la celda de la imagen, la cual cuenta con un único valor (información) (CAMPBELL, 1981).

2. Resolución espectral: Es la cantidad de bandas del espectro en las que el sensor es capaz de obtener información. Esto se logra con sensores independientes para cada banda o con filtros que dejan pasar solo la información de bandas predeterminadas. Estos filtros son los encargados de descomponer la radiación policromática que llega al sensor en ondas monocromáticas, es decir que poseen características de longitud de onda y frecuencia de similar magnitud, a los fines de poder aprovechar sus características distintivas para aplicaciones diversas (Fig. 4.8; CHUVIECO, 1995).

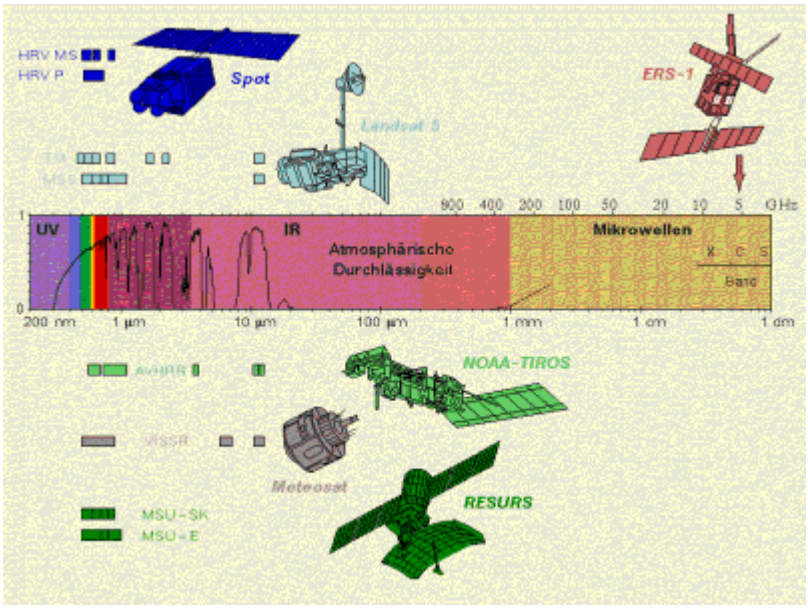


Figura. 4.8. Resolución espectral. Diagrama con el espectro electromagnético y los sectores del mismo en donde algunos sensores remotos registran información (Tomado de www.resolucionespacial.pdf).

4. Resolución radiométrica: describe la cantidad de información contenida en la imagen. Está determinado por la capacidad del sensor para registrar pequeñas variaciones de intensidad en la radiación registrada (Fig.4.9; CHUVIECO, 1995).

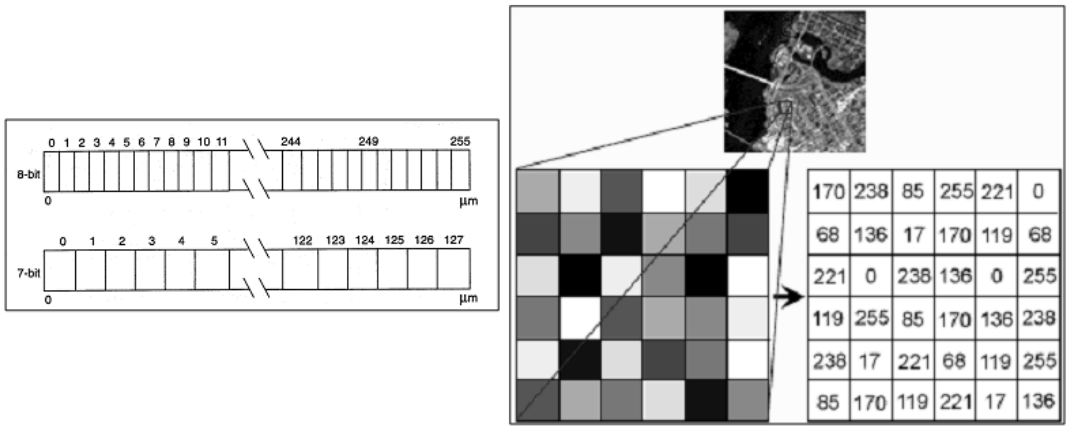


Figura. 4.9 Resolución radiométrica. En la figura se observa la cantidad de radiación registrada en la imagen (Tomado de www.resolucionespacial.pdf).

5. Resolución Temporal: se refiere al tiempo que tarda el sensor en completar una órbita y por ende cada cuanto se toma una imagen (Fig. 4.10; CHUVIECO, 1995).

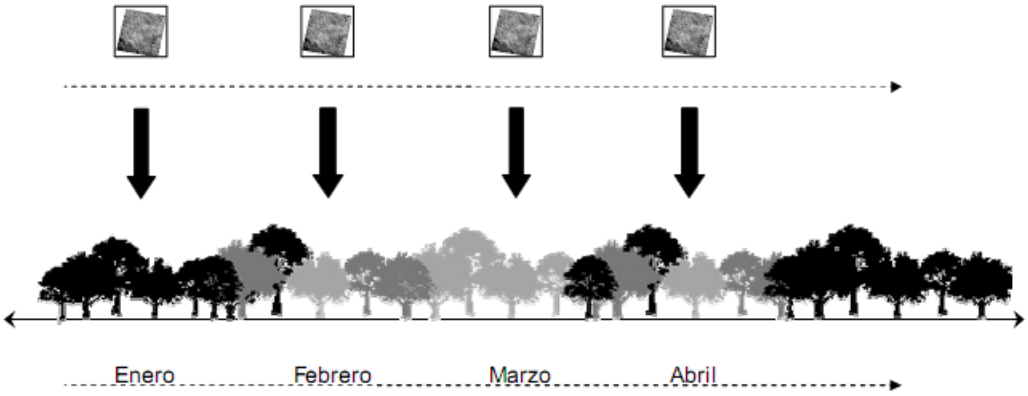


Figura. 4.10 Resolución temporal. En la figura se observa el tiempo que tarda un sensor en complementar una órbita. (Tomado de: www.resolucionespacial.pdf).

4.2.2 Procesamiento y análisis de imágenes

Según CAMPBELL (1981), para el procesamiento de una imagen satelital es necesario ante todo, obtener la información contenida de manera confiable. El pre-procesamiento corrige las distorsiones geométricas y radiométricas, mientras que el proceso de extracción de la información permite identificar y sintetizar la información deseada.

El procesamiento de una imagen implica dos etapas:

Etapa I: PRE-PROCESAMIENTO

1.1. *Georeferenciación*: asigna coordenadas y proyecciones especificas a la imagen, para posicionarla en un lugar de la Tierra correcto.

1.2. *Ortorectificación*: corrige las deformaciones espaciales debidas a la topografía y al ángulo de observación.

1.3. *Corregistro*: hace que dos o más imágenes sean comparables espacialmente, asignado a puntos comunes las mismas coordenadas.

1.4. *Calibración*: Transforma valores en DN en valores de radiancia.

1.5. *Cálculo de reflectancia*: se obtiene a partir de imágenes de radiancia, corrigiendo por la geometría de iluminación y observación.

Etapa II: EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN

2.1. *Las Transformaciones*: se utilizan para sintetizar la información contenida en una imagen de manera de hacerla accesible para los usos requeridos. Entre las transformaciones más comunes se encuentran el cociente entre bandas y los índices de vegetación (CAMPBELL, 1981).

El cociente entre bandas permite resaltar variaciones sutiles en la respuesta espectral de diferentes superficies y muestra la respuesta relativa de la superficie en las longitudes de onda analizadas, lo que facilita la comparación entre imágenes con diferentes valores absolutos (diferente brillo). Por ejemplo, conociendo que la vegetación refleja la radiación en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano (N.IR) y absorbe en las longitudes de onda correspondiente al rojo, se puede identificar la vegetación mediante un cociente entre estas bandas (CAMPBELL, 1981).

Los índices de vegetación, en muchos casos, son cocientes entre bandas, que brindan información sobre diferentes características de la vegetación (Fig. 4.11).

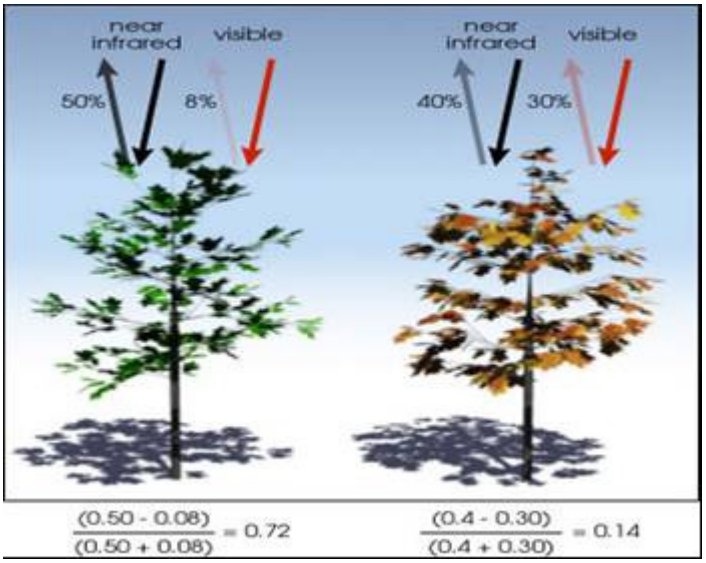


Figura 4.11. Índices de vegetación

(Tomado de www.resolucionespacial.pdf).

Uno de los índices más utilizados es el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

$$NDVI = \frac{\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo visible}}{\text{rojo visible} + \text{infrarrojo cercano}}$$

El cociente de la diferencia sobre la suma de los valores en estas bandas hace que el rango de los valores resultantes de NDVI varíe entre +1 y -1, lo que facilita su interpretación.

2.2. *Las Clasificaciones*: sirven para sintetizar la información espectral contenida en las bandas de una imagen en clases discretas que comparten una característica en común, como por ejemplo, agua, suelo, vegetación, etc.

Las clasificaciones son los procesos de automatización de extracción de información más comúnmente utilizados en teledetección. En estos procesos se utiliza algún mecanismo de aprendizaje sobre las características espectrales de un grupo de píxeles que se utiliza luego para extrapolar la misma información a la totalidad de la imagen (CAMPBELL, 1981).

Los dos tipos de clasificaciones que existen se diferencian en el grado de intervención del usuario en el proceso.

2.2.1. *Clasificación supervisada*, el usuario elige un grupo de píxeles representativo de cada una de las clases que quiere obtener para utilizarlo como entrenamiento para clasificar la imagen. En este caso existe una elección *a priori* de las clases de interés (CAMPBELL, 1981). Cuando se habla de clasificación supervisada, se dispone de información sobre las clases temáticas (vegetación, suelo, cuerpos de agua, etc.) que se quieran identificar en la imagen (Fig. 4.12).

Imagen Original

Área de entrenamiento

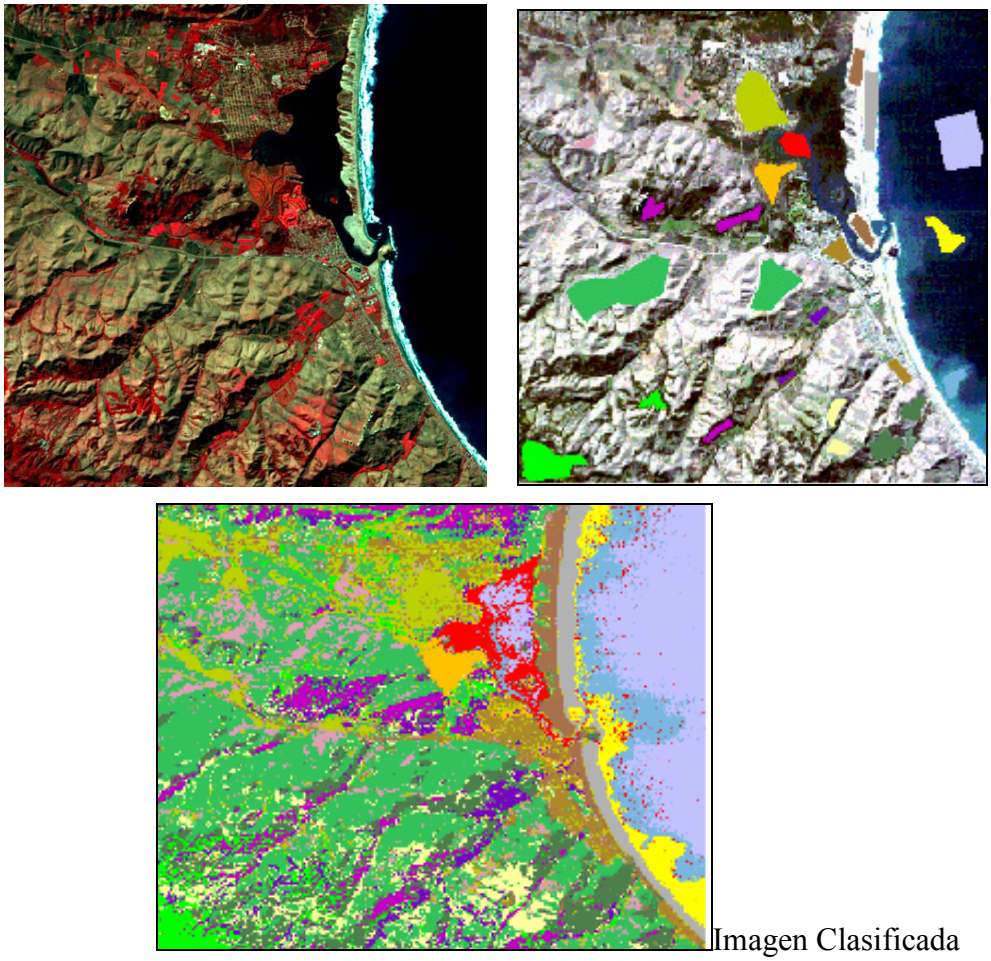


Imagen Clasificada

Figura 4.12 Clasificación supervisada. Se observa en la imagen las diferentes clases temáticas que se desea identificar (Tomado de IGVSB, 2008).

2.2.2. *Clasificación no supervisada*, el proceso de separación entre clases se hace automáticamente por el procesador sobre la base de las diferencias espectrales entre los píxeles de la imagen. Luego, el usuario etiqueta a posteriori las diferentes clases obtenidas de acuerdo a su conocimiento del área de estudio (CAMPBELL, 1981; Fig.4.13).

Imagen Original Imagen Clasificada

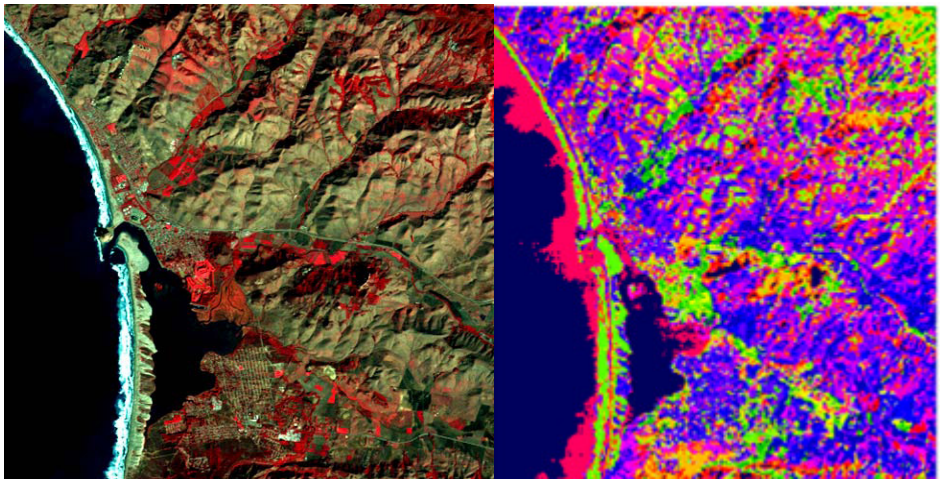


Figura 4.13. Comparación entre la imagen original y la imagen con clasificación no supervisada (Tomado de IGVSB, 2008).

4.2.3 Satélite Landsat 7 ETM

El satélite estadounidense Landsat 7 ETM es el sexto satélite de observación terrestre de la NASA de una serie que data de 1972 (el lanzamiento del Landsat 6 fracasó en 1993). Por lo tanto, el sistema Landsat constituye la grabación continua más prolongada de la superficie de la Tierra. Las tareas principales de todos los satélites Landsat son el control medioambiental, la evaluación de desastres, la explotación del suelo y la planificación regional, la cartografía, la administración de pastizales; y la exploración petrolera y de minerales. El modo de funcionamiento ha mejorado de manera constante. Actualmente, el Landsat ETM cuenta con 8 canales, desde luz visible (canales 1, 2, 3) hasta infrarrojo cercano y mediano (canales 4, 5, 7) y radiación térmica (canal 6). La resolución espacial es de 15 metros en el canal pancromático (8) y de 30 metros en los canales del 1 al 5 y en el 7. El canal térmico 6 ofrece una resolución de 80 metros. El satélite Landsat 7 opera en una órbita circular, heliosíncrona, cuasipolar (IGVSB, 2008; Tabla 4.1; Fig.4.14).

Tabla 4.1. Características del Satélite *Landsat* 7 ETM.

	Landsat 1-3 Escáner multiespectral	Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)	Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM)	
	1972-1982	desde 1982	desde 1999	
	915 km	705 km	705 km	
	18 días	16 días	16 días	
	185 km	185 km	185 km	
	79 × 79 m	30 × 30 m^2	30 × 30 m^2	
		1 = 0,45 - 0,52 µm	1 = 0,45 - 0,52 µm	AZUL
	4 = 0,50 - 0,60 µm	2 = 0,52 - 0,60 µm	2 = 0,52 - 0,60 µm	VERDE
	5 = 0,60 - 0,70 µm	3 = 0,63 - 0,69 µm	3 = 0,63 - 0,69 µm	ROJO
	6 = 0,70 - 0,80 µm 7 = 0,80 - 1,10 µm	4 = 0,76 - 0,90 µm	4 = 0,76 - 0,90 µm	INFRARROJO CERCANO
		5 = 1,55 - 1,73 µm	5 = 1,55 - 1,73 µm	INFRARROJO MEDIO
		7 = 2,08 - 2,35 µm	7 = 2,08 - 2,35 µm	INFRARROJO MEDIO
	8 = 10,4 - 12,5 µm (237 × 237 m^2)	6 = 10,4 - 12,5 µm (120 × 120 m^2)	6 = 10,4 - 12,5 µm (80 × 80 m^2)	INFRARROJO TÉRMICO
			8 = 0,52 - 0,9 µm (15 × 15 m^2)	PANCROMÁTICA

Landsat

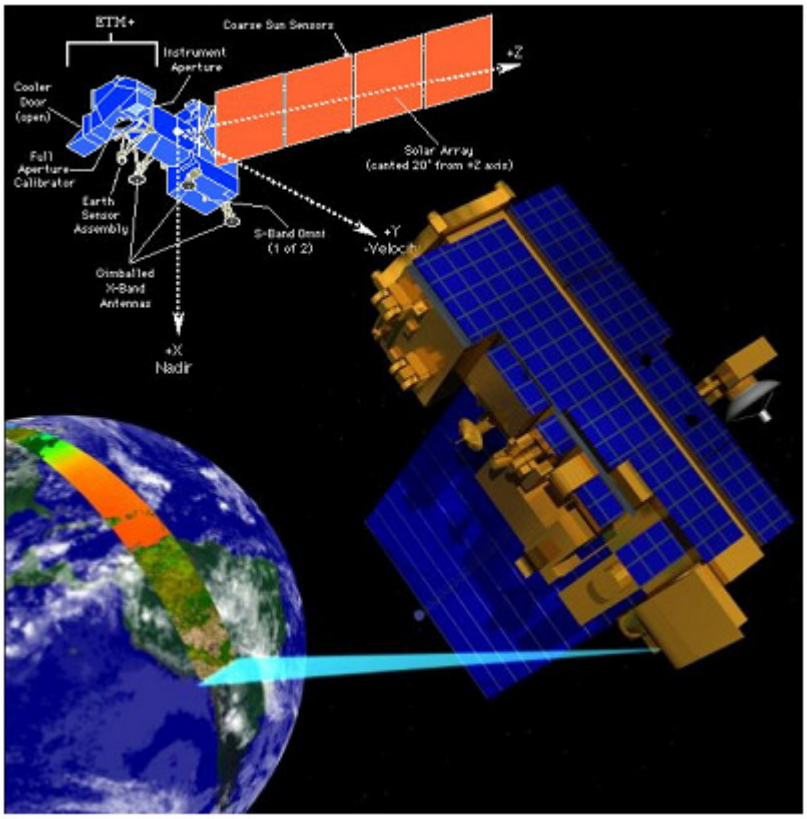


Figura 4.14 Órbita *Landsat* 7 (Tomado de www.landsat7etm.pdf).

4.2.4. Software empleado para el procesamiento de Imágenes Satelitales

4.2.4.1. ENVI

ENVI, Entorno para Visualización de Imágenes (*Environment for Visualizing Images*), es un moderno sistema de procesamiento de imágenes diseñado para proporcionar análisis multiespectral de los datos obtenidos por teledetección desde aviones y satélites. Proporciona un entorno potente, novedoso y de fácil uso para presentar y analizar imágenes de cualquier tamaño y tipo de datos en un amplio rango de plataformas.

El ENVI, contiene herramientas para el análisis de datos hiperespectrales y multiespectrales. Se pueden identificar y representar los píxeles más puros de una imagen o determinar la composición de cualquier espectro desconocido comparándolo con espectros de librerías.

Las nuevas herramientas hiperespectrales de ENVI 3.1 incluyen: remuestreo espectral de los ficheros de datos al rango de longitud de onda definido por el usuario y mejoras del Visualízador Dimensional, lo que permite que los datos puedan verse en múltiples dimensiones (IGVSB, 2008).

La arquitectura abierta de ENVI facilita el trabajo con datos de los proveedores líderes como *Landsat*, SPOT, RADARSAT, NASA, NOAA, EROS Data Center y ESA, y está preparado para acomodar datos de *EarthWatch, Orbview y Space Imaging.* También puede geo-referenciar imágenes e importar vectores. Permite la digitalización de vectores, superponer vectores sobre datos de imágenes, construir nuevas capas, editar datos de puntos, polilíneas y polígonos, crear y/o editar atributos, y consultar la información de los atributos asociada a sus vectores con el GUI intuitivo de ENVI (Fig. 4.15).

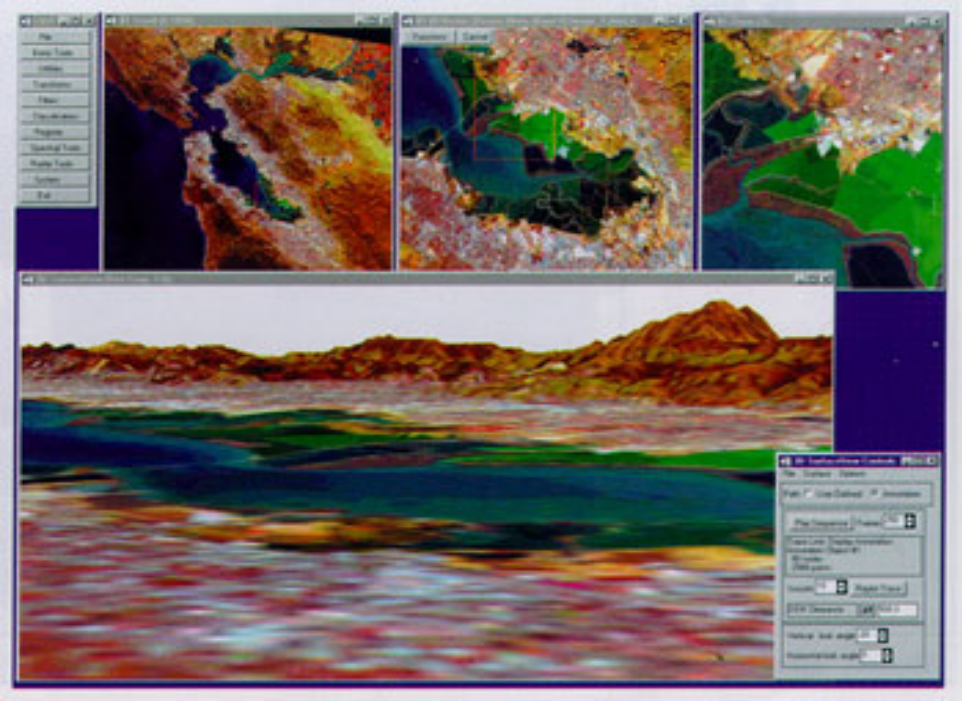


Figura 4.15. Simulación de vuelo con ENVI (Tomado de: www.envi_ser/esd_pol).

4.2.4.2 ArcVIEW GIS 9.2

Es un software GIS para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, estos corresponden a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales; regiones y cualquier tipo de ubicaciones en terrenos determinados. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información de planos y mapas, permitiendo explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presenta la información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos (IGVSB, 2008; Fig. 4.16).

Características

ArcView GIS es el software "desktop" más usado de los GIS del mundo, porque entrega de una forma fácil el trabajo en datos geográficos.

Figura 4.16. Análisis espacial en ArcVIEW GIS 9.2, resaltando en rojo las vías de acceso de la zona. (Tomado de: www.espectral_imagen/arc_gis).

4.2.4.3 Erdas Imagine

Es el sistema más sofisticado y poderosos para procesamiento de imágenes adquiridas a partir de sensores remotos, análisis de datos geográficos y modelaje gráfico de información espacial. Posee una estructura que permite adicionar módulos a su conjunto de herramientas básicas, según los requerimientos de análisis de los usuarios. Está diseñado para incrementar su productividad y ayudarlo a tomar la mejor decisión rápidamente (IGVSB, 2008).

Erdas Imagine suministra un conjunto de herramientas para la entrada y manipulación de imágenes: despliegue y realce, análisis espectral, fotogrametría digital, análisis de imágenes de radar, modelaje de información espacial e integración de datos SIG (IGVSB, 2008; Fig. 4.17).

Figura 4.17 Cuadro de herramientas para la entrada y manipulación de imágenes en Erdas Imagine 9.2 (Tomado de: www.geospatial.cl/.../procesamiento_imagenes).

CAPÍTULO V

ANÁLISIS TOPOGRÁFICO

5.1 Generalidades

Este análisis tiene como objetivo describir la organización general de las formas del relieve, usando criterios topográficos basados en desniveles topográficos, drenajes característicos, pendientes, y criterios geométricos que facilitan la descripción de las topoformas, sus relaciones litológicas y estructurales.

5.2 Interpretación hidrogeológica

A través de la interpretación de la red hidrogeológica de los mapas topográficos y de las imágenes satelitales, se lograron identificar en la zona de estudio dos cuencas principales hacia donde fluye una red de drenajes secundarios, que se explican a continuación:

5.2.1 Cuenca del río Tocuyo

Ocupa la mayor área dentro de la zona en estudio, representa el **Colector Principal 1**. (Fig. 5.1).

El Colector Principal 1, es el río Tocuyo, el cual atraviesa toda la zona de estudio, con una dirección suroeste a noreste y una extensión de aproximadamente 332 Km. A lo largo de su trayecto recibe pocos afluentes de carácter permanente, entre ellos están, los ríos Guaidima, Araurima, Guaca y Agua Clara, desembocando en el Mar Caribe, al norte de Chiciriviche (Ver Anexo 1).

Cabe destacar, que dicho colector principal presenta una geometría meandriforme durante su curso y el grado de encajamiento pudiese corresponder a un gran valle aluvial, donde la sinuosidad de los lazos es muy pronunciada. Este valle se encuentra pobremente encajado a la topografía, por lo que el río se entrecruza en diferentes puntos, dejando a su paso canales interconectados, como las ciénagas Batsamar, Agua Mora, Pozo Azul y la Bacoa al noreste de la zona. A su vez, muchos embalses son registrados en la cuenca siendo relevante el complejo Jatira-Tacarigua cerca de la desembocadura.

En el margen norte del Colector Principal 1, se observa un conjunto de tributarios muy numerosos, entre esos los ríos Araurima y Tucurere, los cuales muestran un patrón

subparalelo al aproximarse al cauce principal, donde la confluencia se efectúa con bajo ángulo, entre los 10º y 60º.

El sector correspondiente a la parte alta de la cuenca, donde nacen estos tributarios (río Tucurere y Araurima), se aprecia que esta red se hace un mucho más densa, definiendo un patrón dendrítico a subparalelo. Hacia el noreste de la cuenca, se observa que la densidad de los drenajes va disminuyendo, guardando la geometría de dendrítico a subparalelo (Ver Anexo 1).

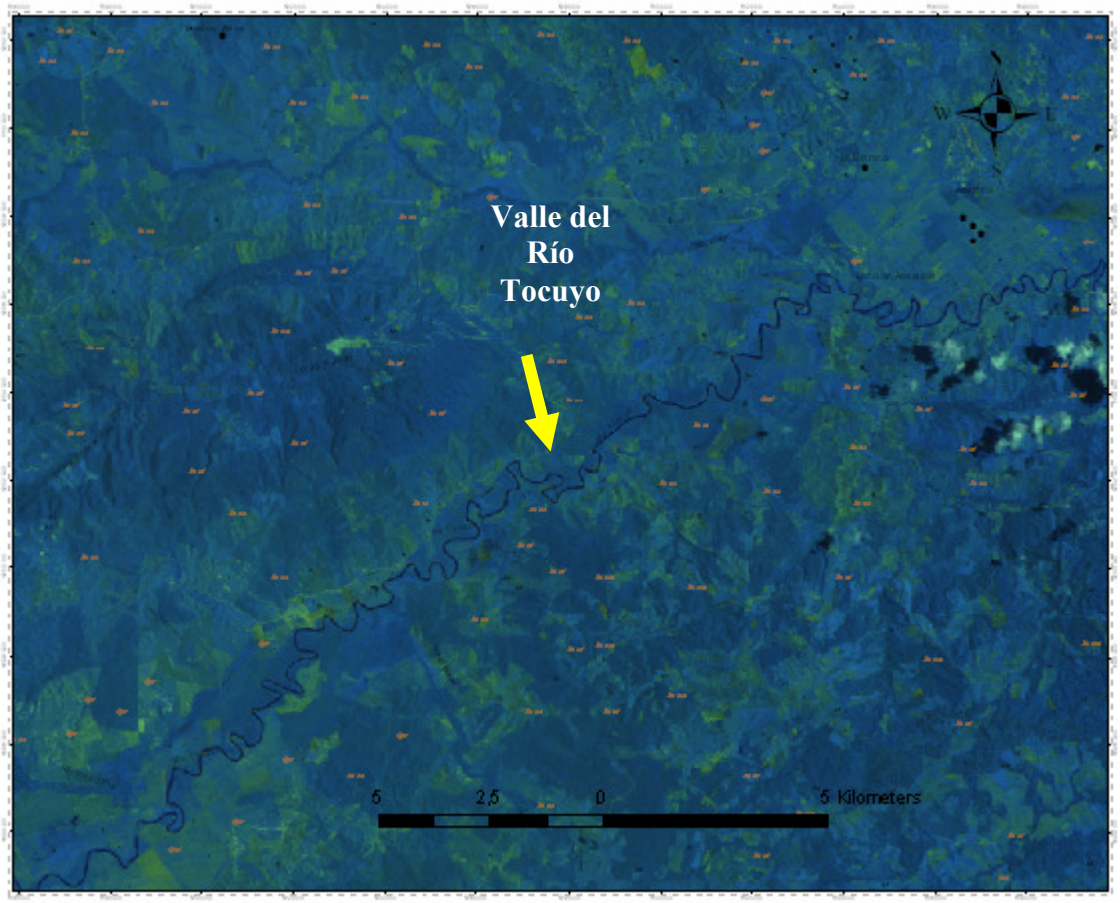


Figura 5.1 Colector Principal 1. Geometría anastomosada del río Tocuyo (Tomada de Landsat 7 ETM, bandas R70 G50 B40).

5.2.2. Cuenca del río Aroa

Ocupa un área menor dentro de la zona en estudio, presenta el **Colector Principal 2** (Fig. 5.2).

Se encuentra al sureste de la zona en estudio, con una orientación suroeste – noreste. Presenta un patrón de drenaje meandriforme y un comportamiento irregular, con desembocadura al Mar Caribe en el Golfo Triste.

En la parte baja del río (hacia el sureste) se presenta una extensa planicie aluvial con muy baja pendiente, el río desemboca en un canal único, pero se observan pequeños arroyos con drenajes asociados al cauce principal del río Aroa.

En el margen norte del colector, se observa un grupo de tributarios numerosos, los cuales muestran un patrón subparalelo al aproximarse al cauce principal, y la confluencia con el colector se efectúa con un ángulo entre los 30º y 70º. La longitud de dichos tributarios tiende a ser corta. En el sector correspondiente a la parte alta de la cuenca, donde dichos tributarios nacen, se aprecia que la red se hace densa, definiendo un patrón dendrítico a subparalelo. En el margen sur, muestra una red escasamente densa que se comporta definiendo un patrón subparalelo, donde la confluencia, se efectúa con un ángulo entre los 30º y 70º. La longitud de dichos tributarios, es de diferentes rangos. Cabe destacar que para la parte media de la cuenca, la densidad de drenaje empieza a disminuir y hacia la parte baja la red de tributarios está pobremente desarrollada.

La cuenca de Aroa se encuentra constituida por una subcuenca denominada Agua Linda, ubicada en la parte alta del río Aroa, al noreste, predominando elementos propios de ríos con meandros y corrientes lentas, típicos de las planicies (Ver Anexo 1).

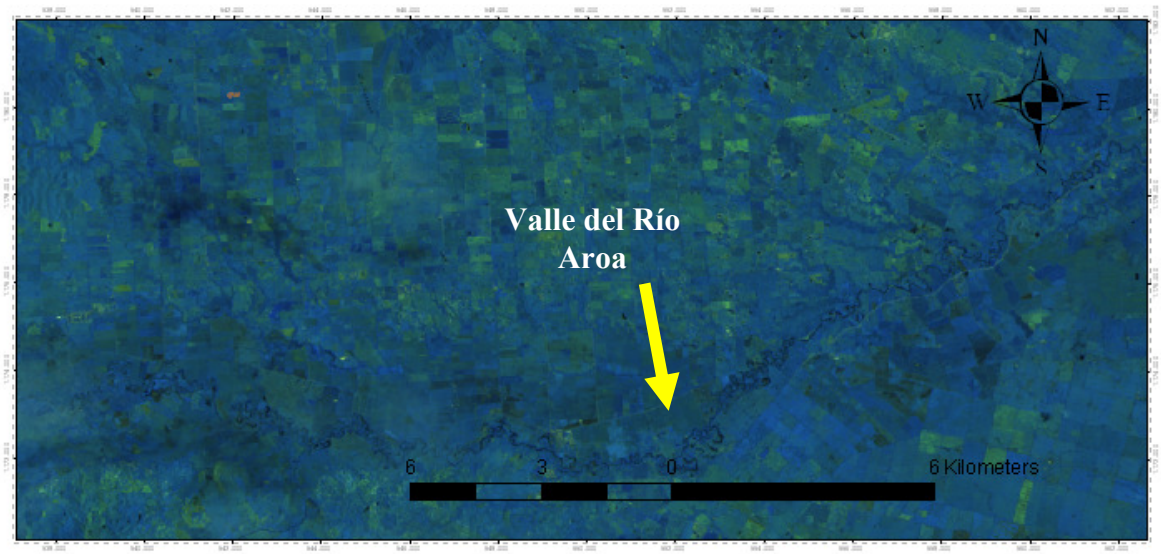


Figura 5.2 Colector Principal 2. Patrón de drenaje meandriforme del río Aroa (Tomada de *Landsat* 7 ETM, bandas R70 G5 B40).

5.3 Interpretación de las unidades topográficas

El paisaje de la zona se caracteriza por ser mixto con elevaciones bajas y medias que oscilan entre los 50-600 m.s.n.m., mostrando una topografía con elementos contrastantes y características bien definidas, que se agrupan de la siguiente manera (Fig. 5.3):

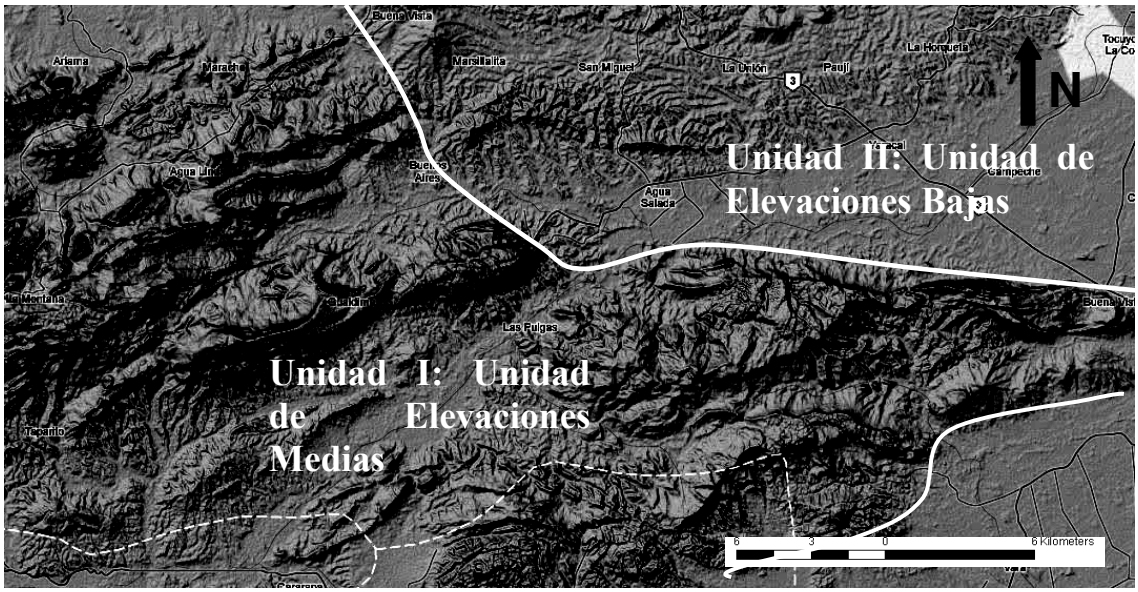


Figura 5.3 Unidades topográficas identificadas en la zona de estudio.

5.3.1 Unidad I: Unidad de elevaciones medias

Esta unidad abarca el 60% de la zona, distribuida hacia el suroeste, sureste y noroeste, con alturas que oscilan entre los 150-600 m.s.n.m. (Fig.5.3).

Posee la mayor densificación de drenajes secundarios adaptados a la topografía, con patrones dendríticos y subparalelos que fluyen hacia su colector principal, el río Tocuyo, el cual posee en general una orientación de N-NE-E. Por esta unidad drenan los ríos principales Tocuyo y Aroa; y los ríos Tucurere, Agua linda y Agua Clara.

Las formas topográficas presentes en la unidad I son pseudoparalelas, con una orientación preferencial N70ºE. Sin embargo, existen varios tipos de relieves bien diferenciados que hacen a esta una unidad algo heterogénea.

Dentro de esta unidad se pueden diferenciar tres áreas (filas alongadas, colinas incipientes y mesetas degradadas disectadas), las cuales se describen a continuación:

5.3.1.1 Tipo 1: Filas elongadas

Predominan hacia el sureste de la zona abarcando un 15% de la zona, distribuidas heterogéneamente con alturas que oscilan en un rango de 100 y 500 m.s.n.m aproximadamente, se caracterizan por ser filas dispuestas de manera alargada con laderas asimétricas, con muchas estribaciones, principalmente hacia el sur, pendientes relativamente elevadas cercanas a los 25º y más abruptas hacia el sur de 30°. Las laderas y las bases de las filas tienen drenajes mayormente adaptados en diferentes tramos, con patrones subparalelos y dendríticos respectivamente. La abundancia del drenaje es intermedia.

Las crestas de las filas se hayan pseudoparalelas y de carácter ligeramente sinuoso. Comprende la cordillera de Buena Vista orientada en sentido general este-oeste, el llamado cerro Misión y los poblados Sanare y Buena Vista (Fig.5.4).

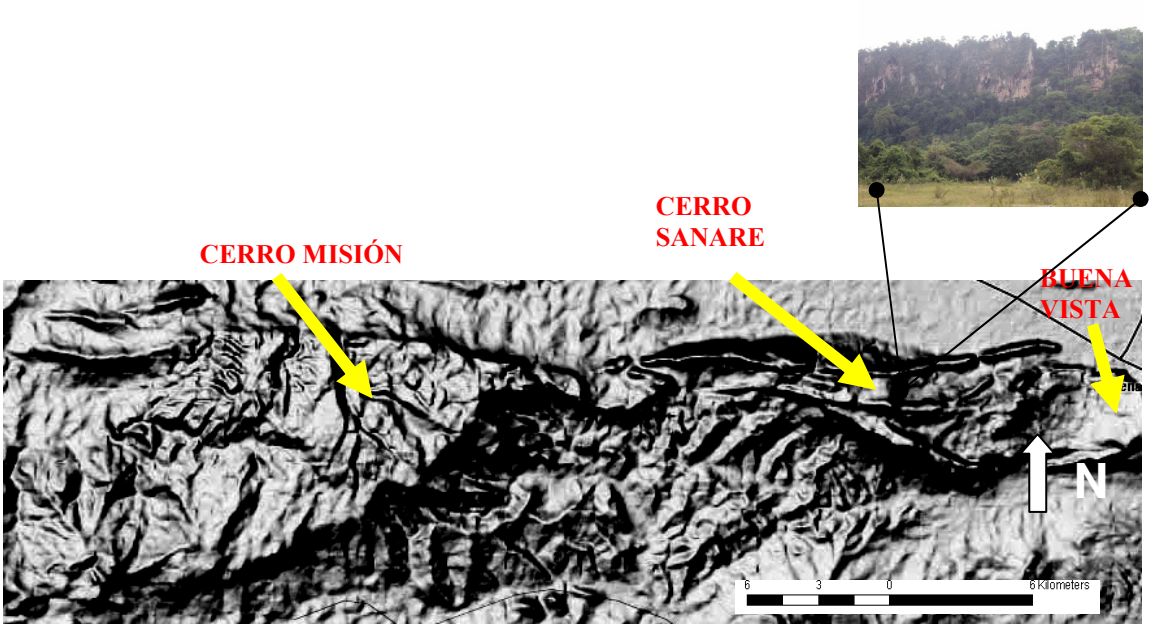


Figura 5.4 Estribaciones de las filas elongadas al sur de la zona de estudio, cercano al sector Buena Vista.

5.3.1.2 Tipo II: Colinas incipientes

Están agrupadas al sur y abarca un 15% de la zona. Presentan una leve disectación incipiente, se encuentran interdigitadas con las filas elongadas. Dentro de este tipo entran los llamados cerros Salsipuedes, Tarana, San Quintín, La Zurda. Poseen una orientación este-oeste y estribaciones en todas sus direcciones. El drenaje es abundante y adaptado a la topografía (Fig.5.5).

En sus alrededores se encuentran los poblados Taparito y Santa Bárbara.

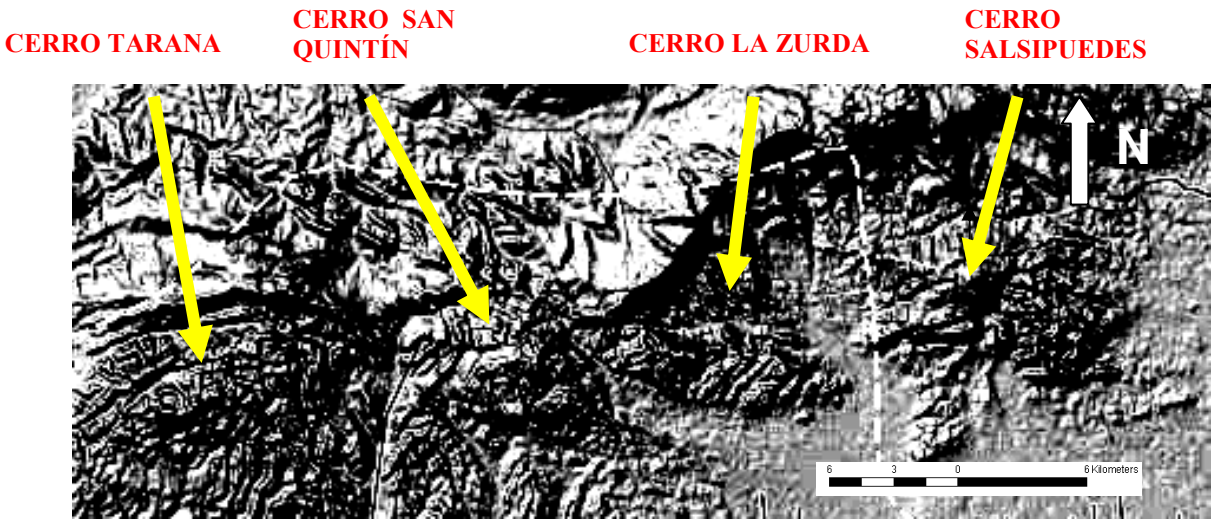


Figura 5.5 Colinas incipientes representadas por los macizos ígneos-metamórficos, ubicados al norte del valle de Aroa.

5.3.1.3. Tipo III: Mesetas degradadas disectadas

Abarca el 30% de la zona de estudio, contiene los cerros Riecito, Agua Chiquita, Guararipano, Mecaco, La Mina, Panela, Yaguré, Churuguacito, cerro Antonio y loma Araurima principalmente, los cuales representan una secuencia de capas de resistencia contrastante que permiten evidenciar los efectos de los agentes erosivos. La zona se considera de erosión baja a media, permitiendo la formación de mesetas alargadas, degradadas y cimas redondeadas.

Las cotas varían entre los 150-650 m.s.n.m., manteniendo en el tope una altura de 600 m aproximadamente.

La mayoría de las mesetas están disectadas, con laderas empinadas levemente hacia el norte. En general, poseen una orientación N65ºE, gran densidad de drenajes relativamente adaptados a la topografía, desarrollados a lo largo de las capas menos resistentes.

La llamada loma Araurima, de laderas levemente asimétricas, forma parte de este elemento topográfico, contiene gran cantidad de estribaciones intercaladas con valles estrechos y un conjunto de tributarios, los cuales muestran un patrón subparalelo al aproximarse al cauce principal, con un alto grado de entallamiento.

Las laderas de las mesetas tienen pendientes de 20º aproximadamente, mientras que el tope expuesto hacia el cielo es más suave (5º aproximadamente), presentan una superficie sinuosa e irregular. Algunas de estas mesetas están yuxtapuestas a las zonas de filas.

La abundancia del drenaje varía de intermedia a alta y se presenta con un patrón dendrítico en las laderas. El río Tocuyo se encuentra en un valle amplio en contacto abrupto hacia su margen norte con el llamado cerro Riecito. Este valle posee una dirección N-NE-E, se encuentra encajado en la topografía con laderas de pendientes suaves.

Bajo un perfil longitudinal se ve un plano irregular en el tope de las mesetas y visualizando este relieve en 3D se asemejan a paralelepípedos alargados (Fig.5.6).

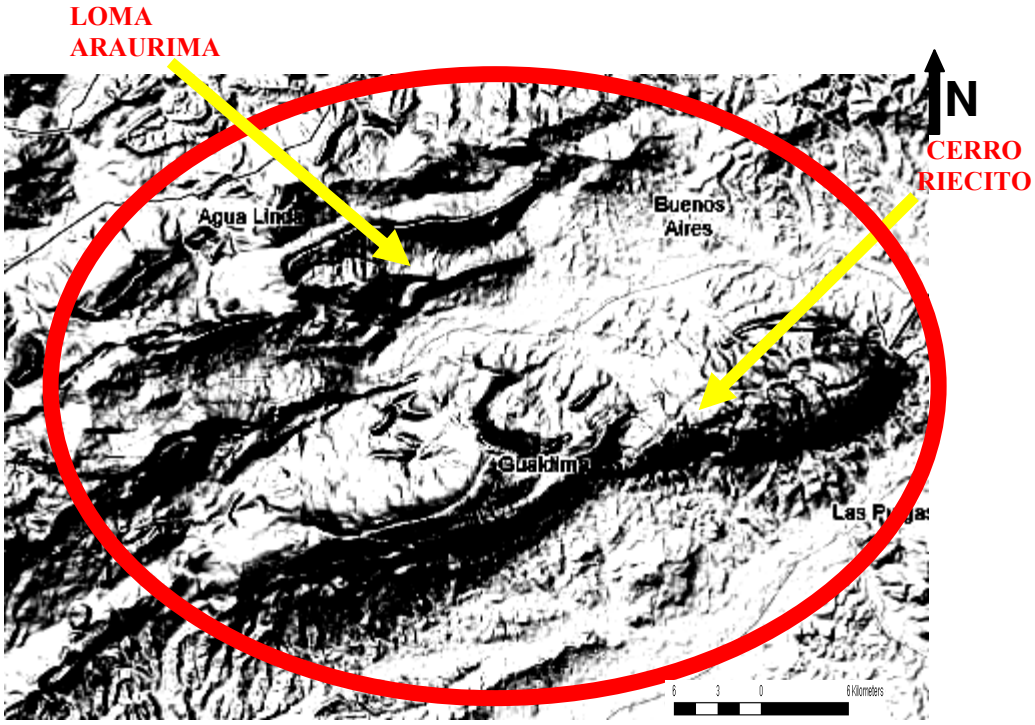


Figura 5.6 Mesetas degradadas disectadas, representadas principalmente por el cerro Riecito y la loma Araurima, ubicadas al noroeste de la zona de estudio.

5.3.2 Unidad II: Unidad de elevaciones bajas

Abarca el 40% de la zona, se encuentra hacia el noreste y en la parte más sur del área, con cotas que no sobrepasan los 150 m.s.n.m. Por esta unidad drenan los ríos Tocuyo, Agua Linda y Aroa, principalmente (Fig.5.3).

La densidad del drenaje es de media a baja, siendo más abundante hacia el noroeste de esta unidad donde se encuentra adaptado a la topografía con un patrón dendrítico. Además, contiene las ciénagas Bátsamar, Agua Mora, Pozo Azul, La Bacoa, la laguna Jatira, laguna Tacarigua, ubicadas hacia el noreste cerca de la desembocadura hacia el Mar Caribe.

Dentro de esta unidad topográfica, se encuentran las poblaciones del Tocuyo de la Costa, Blanquilla, Tacarigua, San Lorenzo, Campeche, San Pedro, Los Empalizados, La Culeta, Santa Bárbara, entre otros.

Las formas de relieve características son los cerros Mamoncito, Yuca y cerro Grande, que oscilan entre los 50- 150 m.s.n.m. La unidad es regular y homogénea, contrastando claramente con la unidad I y ocupando un área mucho menor que la unidad anterior.

En la Unidad II se tienen tres tipos topográficos diferentes (Lomas Bajas Alargadas, Colinas Lobulares e Irregulares, Planicie Aluvial), que se explican a continuación:

5.3.2.1. Tipo I: Lomas bajas alargadas

Se encuentra en la parte norcentral y abarca el 10% de la zona. Este tipo topográfico representa a lomas con crestas levemente amesetadas y sinuosas, laderas fuertemente asimétricas y de pendiente cercana a los 27º, mientras que las crestas exhiben una pendiente comprendida entre 15 a 20º aproximadamente. Presentan estribaciones irregulares, con alturas comprendidas entre los 50-150 m.s.n.m. La densidad de los drenajes es intermedia y tiene un patrón que en general es dendrítico.

Comprende el cerro Grande y en su cercanía poseen los poblados La Danta, La Culeta y San Lorenzo (Fig.5.7).

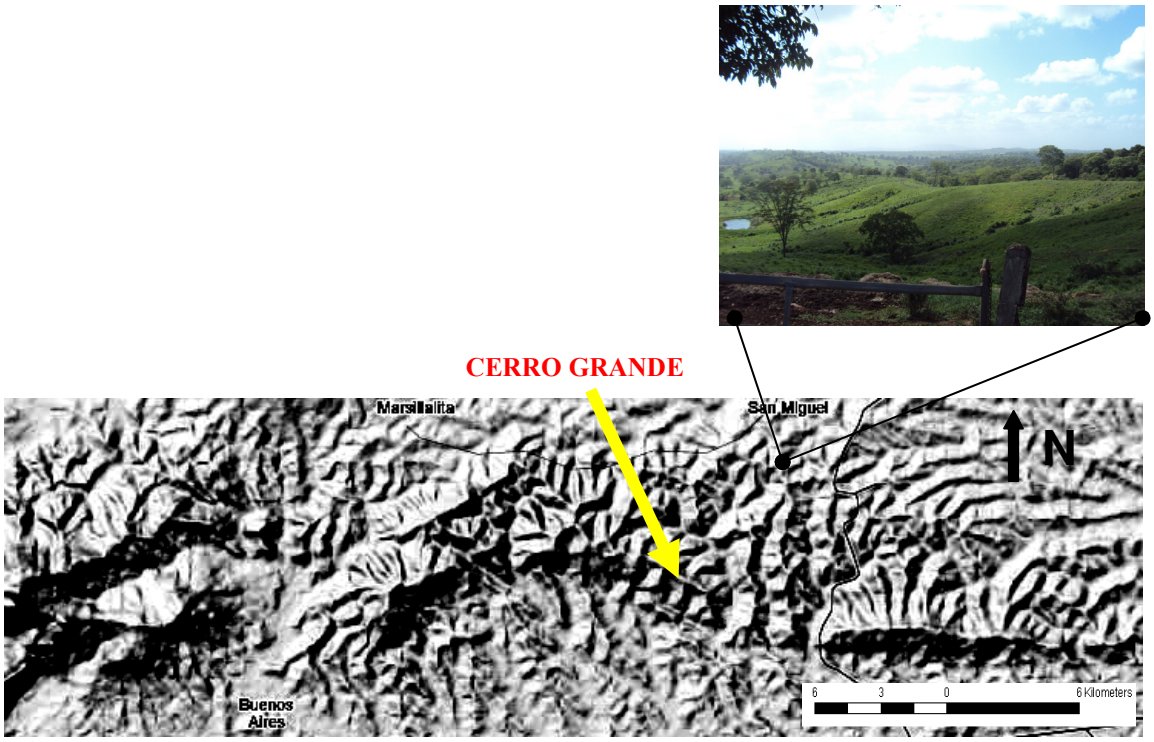


Figura 5.7 Lomas bajas alargadas ubicadas al noreste de la zona, representada principalmente por el "cerro Grande" de cresta sinuosa y laderas asimétricas.

5.3.2.2 Tipo 1I: Colinas lobulares e irregulares

Se encuentra en la parte norcentral y abarca el 10% de la zona. Algunas poseen crestas sinuosas pseudoparalelas entre sí, con una orientación aproximada este-oeste. Otras, son mas empinadas e irregulares, pero todas están fuertemente estribadas en todas direcciones.

Las alturas oscilan alrededor de los 50-150 m.s.n.m, son de pendientes elevadas en las laderas (30°aproximadamente). Estas colinas son de bases circulares que en 3D parecen conos truncados.

La densidad del drenaje es intermedia y se presenta con un patrón subparalelo generalmente.

Comprende los cerros Mamoncito, Yuca y el domo La Esperanza (Fig. 5.8).

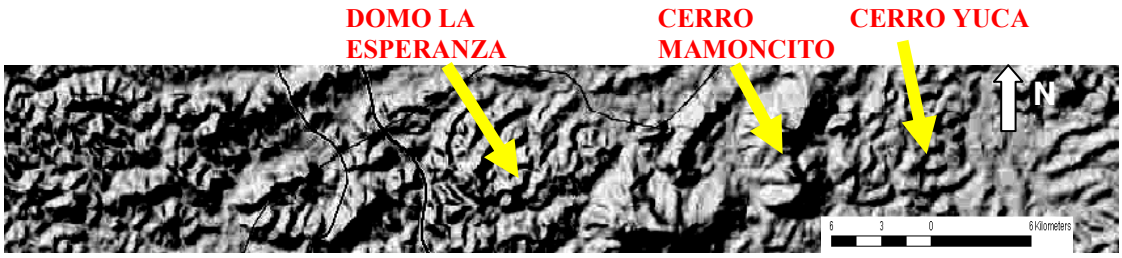


Figura 5.8 Colinas lobulares e irregulares representados por los cerros Mamoncito, Yuca y Domo La Esperanza, ubicados al norte de la zona de estudio.

5.3.2.3. Tipo III: Planicie aluvial

Representa una llanura costera que abarca el 20% de la zona. La costa oriental está conformada por valles marinos generados por las estribaciones de los sistemas montañosos del interior y formaciones aisladas. Representa una región aluvial muy fértil generada principalmente por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa (Fig.5.9).

Comprende parte del valle del río Aroa al sureste de la zona, con una orientación aproximada este-oeste.

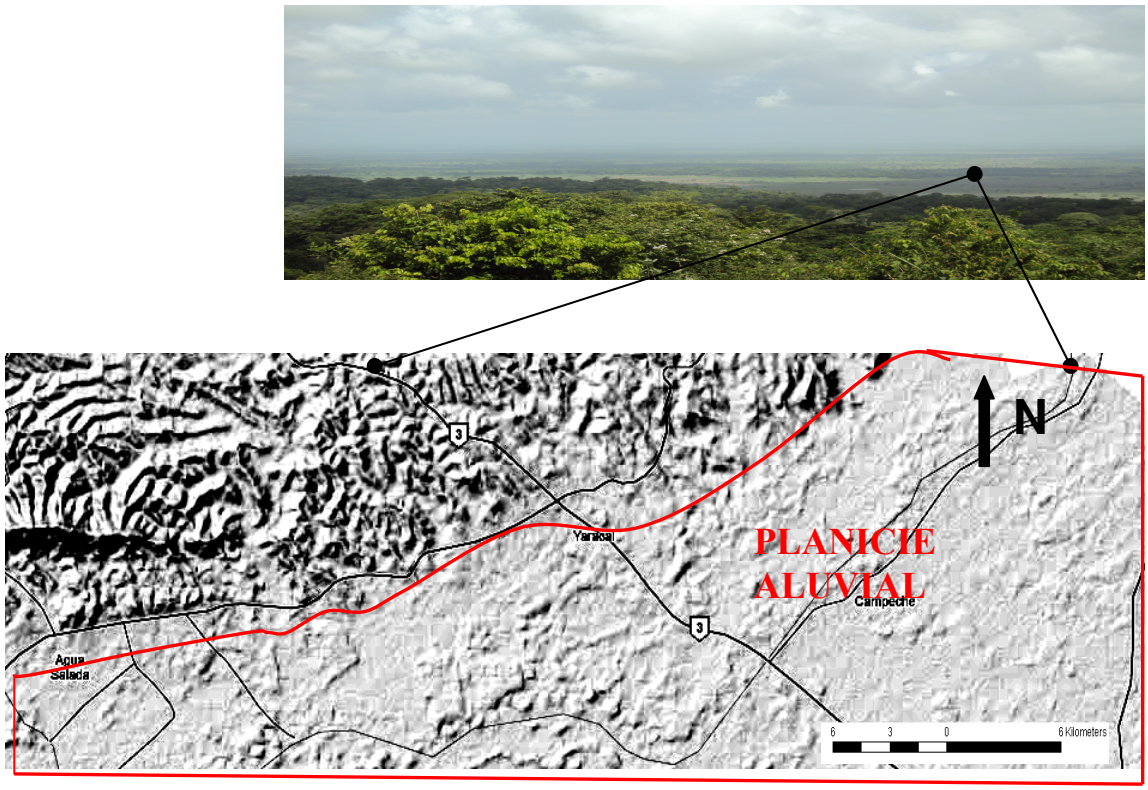


Figura 5.9 Planicie aluvial generada por las estribaciones de las lomas del interior y formaciones aisladas constituida por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa.

En general, en la disposición de las formas del relieve de la zona, destaca la presencia de relieves positivos representados por filas, colinas y mesetas, pseudoparalelas con orientación general este-oeste y con asimetría en sus pendientes. Estas formas de alguna manera, se alternan con patrones de valles encajados, que están adaptados a la topografía.

El contacto entre las dos unidades topográficas determinadas suele ser transicional o interdigitado hacia el norte de la zona de estudio principalmente. Mientras que en la parte sur y este, el contacto entre las unidades es más abrupto, debido al contraste existente entre las pendientes al pasar de una superficie inclinada a otra superficie sub-horizontal.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

6.1 Generalidades

Realizados todos los procedimientos y correcciones de las imágenes satelitales (ver Apéndice 1) y las observaciones de campo, se obtuvieron los resultados de dicho estudio para la actualización de la geología de la zona oriental de Falcón, al sur del Alto de Esperanza–Guacharaca. La interpretación se basa en el análisis de rasgos topográficos, litológicos y estructurales.

Litológicamente, el área de estudio está compuesta por rocas sedimentarias, metamórficas e intrusiones ígneas, dispuestas de la siguiente manera:

Las rocas sedimentarias, son las más abundantes y abarcan el 90% del área en estudio, pertenecen a las formaciones Cerro Misión, Guacharaca, San Lorenzo, Pozón, Casupal, Agua Linda, Capadare y Ojo de Agua, junto a depósitos cuaternarios.

Las rocas ígneo-metamórficas afloran en los macizos de Tarana, San Quintín, La Zurda y Salsipuedes al sur de la zona en estudio, entre el límite de los estados Falcón y Yaracuy, abarcando un 9% del área total.

En la zona de Sanare-Buena Vista afloran unas intrusiones ígneas descritas detalladamente por FOURNIER *et al.* (2003), quienes reportan en la quebrada Yaracuibare una serie de cuerpos ígneos de "andesita" ubicados en dos afloramientos separados en una extensión de aproximadamente 210 m intrusionando a las lutitas de la Formación Cerro Misión, abarcan un porcentaje del 1% en la zona de estudio.

6.2 Interpretación litológica

A partir de la información obtenida en campo aunado a la interpretación de imágenes satelitales y apoyados en referencias bibliográficas, se describen las unidades litológicas presentes en la zona de la siguiente manera:

6.2.1 Formación Cerro Misión

La Formación Cerro Misión constituye la unidad más antigua depositada en esta parte de la cuenca, abarca un bajo porcentaje en la zona (1% aproximadamente) y está presente en la parte norcentral, adayacente al Alto de Esperanza–Guacharaca y en los cerros Sanare y Misión, al sureste de la zona de estudio.

De acuerdo a la literatura la Formación Cerro Misión está compuesta de lutitas calcáreas fosilíferas de color gris oscuro, la base no está expuesta y el tope grada concordantemente a la Formación Guacharaca (RENZ, 1948).en la parte norcentral de la zona, y hacia el flanco sur del cerro Sanare se observa que por encima de la Formación Cerro Misión descansa discordantemente la Formación Casupal (WHEELER, 1963).

Esta unidad no pudo ser revisada en campo debido a lo inaccesible de la zona de afloramiento en el sector Sanare-Buena Vista donde se encuentran los cerros Sanare y Misión. Adicionalmente, de acuerdo con los mapas geológicos compilados está presente en el domo La Esperanza, sin embargo no aflora en esta localidad (Fig.6.1).

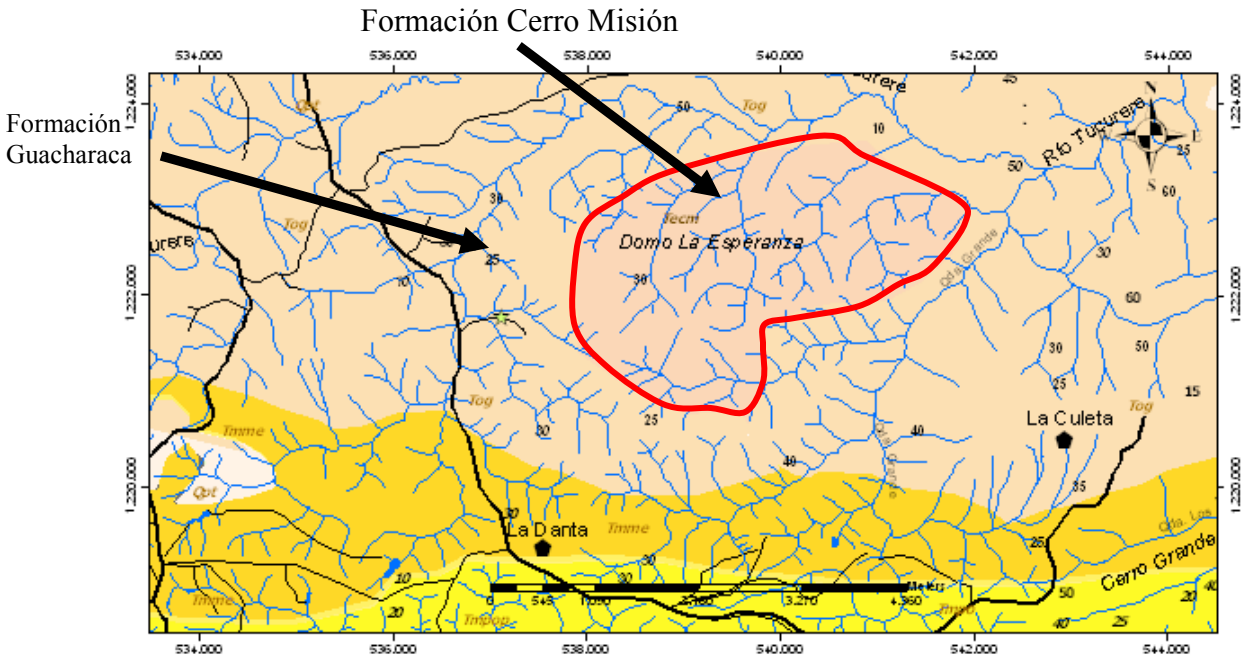


Figura 6.1 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observa el contacto de la Formación Cerro Misión (Tecm) con la Formación Guacharaca (Tog) interpretado de los mapas geológicos empleados (H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G. (1967) y EL MAPA DE LA CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962).

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

En las imágenes satelitales resulta difícil distinguir a esta unidad, debido a que se encuentra en contacto con la Formación Guacharaca que presenta características litológicas relativamente similares y poco competentes, observándose la misma respuesta ante las imágenes empleadas (Fig. 6.2). En la imagen clasificada no se presenta una combinación de colores distintivos que ayude a identificar esta formación, por lo que se concluye que la interpretación de la respuesta litológica en las imágenes satelitales de las lutitas de estas formaciones no es tan eficiente (Fig.6.3), sin embargo al realizar la clasificación supervisada se aprecia cierta concentración de colores en el área donde se encuentra cartografiada la Formación Cerro Misión (Fig. 6.4).

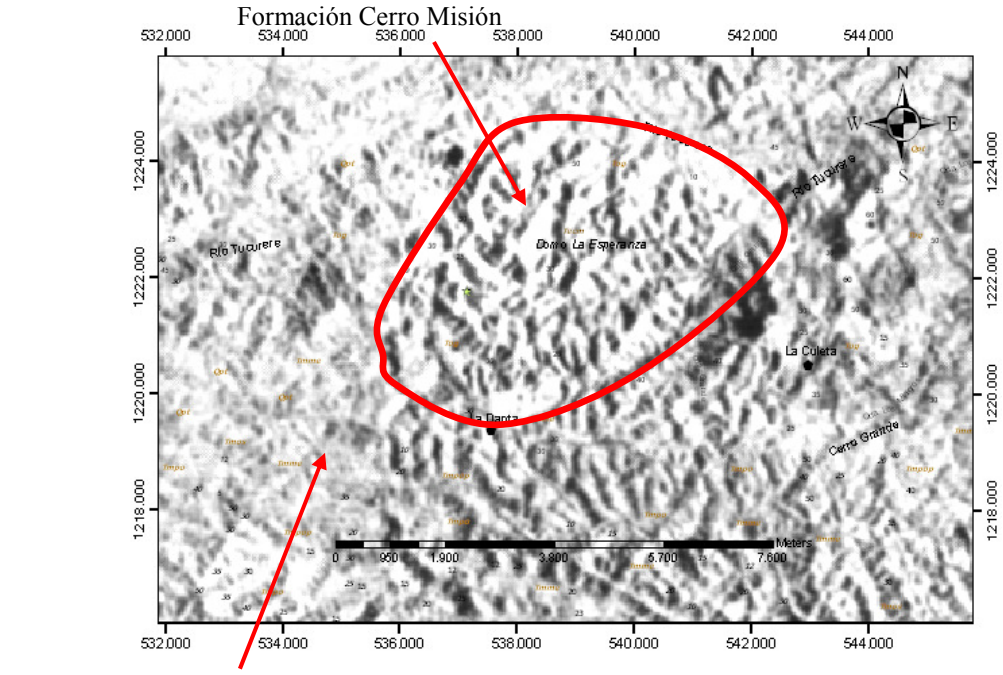


Figura 6.2 Unidad de elevaciones bajas (Colinas lobulares irregulares) formada por litologías poco competentes como son las lutitas de la Formación Cerro Misión y las lutitas de la Formación Guacharaca

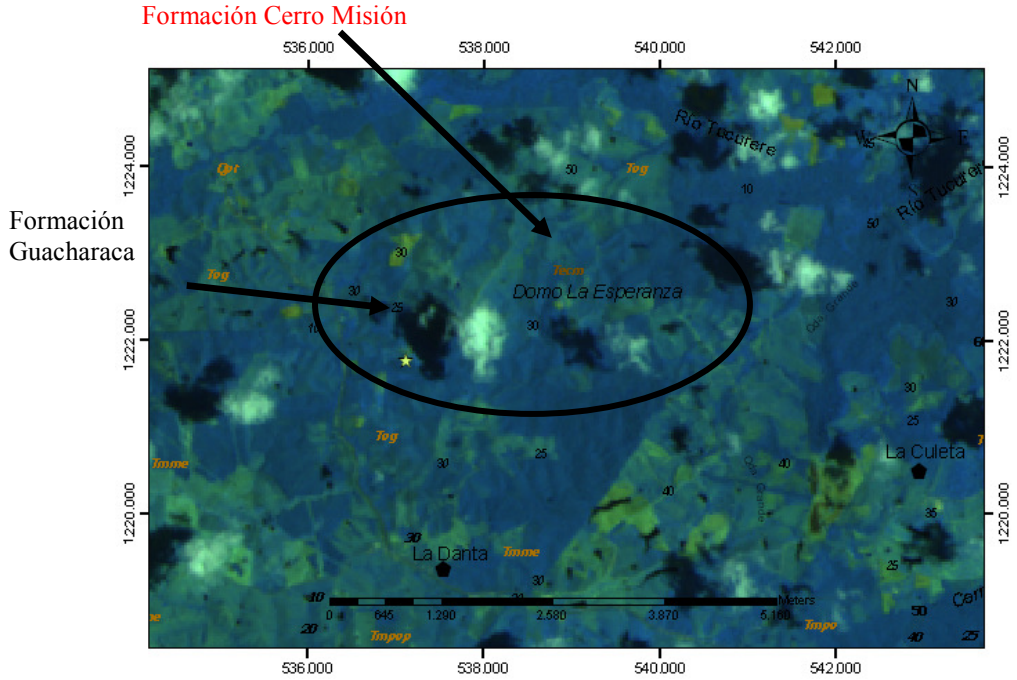


Figura 6.3 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50). Se señalan las formaciones Cerro Misión y Guacharaca cartografiadas en los mapas geológicos empleados (H.G.K. modificado por J.A.G. (1967) y el mapa de la Creole Petroleum Corporation (1962), pero no se logra diferenciar estas unidades en la imagen satelital.

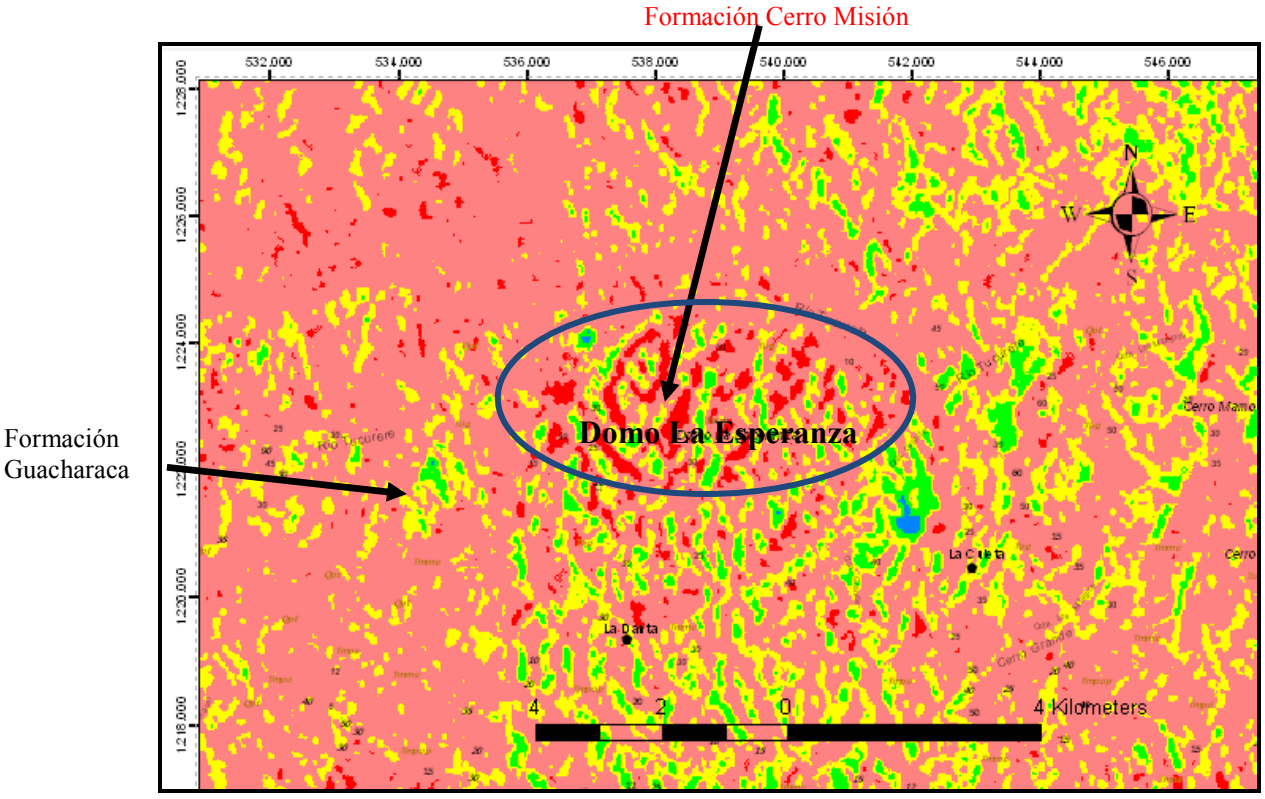


Figura 6.4 Clasificación supervisada de la imagen satelital donde se aprecia una ligera coloración en los pixeles de rojo (Formación Cerro Misión) a verde-amarillo (Formación Guacharaca).

6.2.2 Formación Guacharaca (Grupo Agua Salada)

La Formación Guacharaca abarca un 4% de la zona, extendiéndose en el flanco sur del alto La Esperanza–Guacharaca.

De acuerdo a la literatura, la Formación Guacharaca presenta las siguientes características litológicas y contactos formacionales:

En la descripción original de SUTER (1947), este autor menciona que la unidad contiene areniscas glauconíticas en su parte superior, dispuestas en capas delgadas (1,5 a 6,5 m), que denomina Arenas de Guayaval-La Danta. En el subsuelo de Mene de Acosta, la formación consiste de una secuencia de lutitas calcáreas y no calcáreas y lutitas limolíticas, con capas ocasionales de arenisca en su parte superior (RENZ, 1948). Tal como se indicó en la unidad anterior, RENZ (1948), define el contacto inferior de la Formación Guacharaca como concordante y transicional con la Formación Cerro Misión (Ver Figs.6.2; 6.3). WHEELER (1960,1963) presenta dos modelos estratigráficos para el contacto superior, uno con contacto concordante y transicional y otro discordante por debajo de las areniscas de la Formación San Lorenzo, concluyendo que el problema necesita más estudio (Fig.6.5).

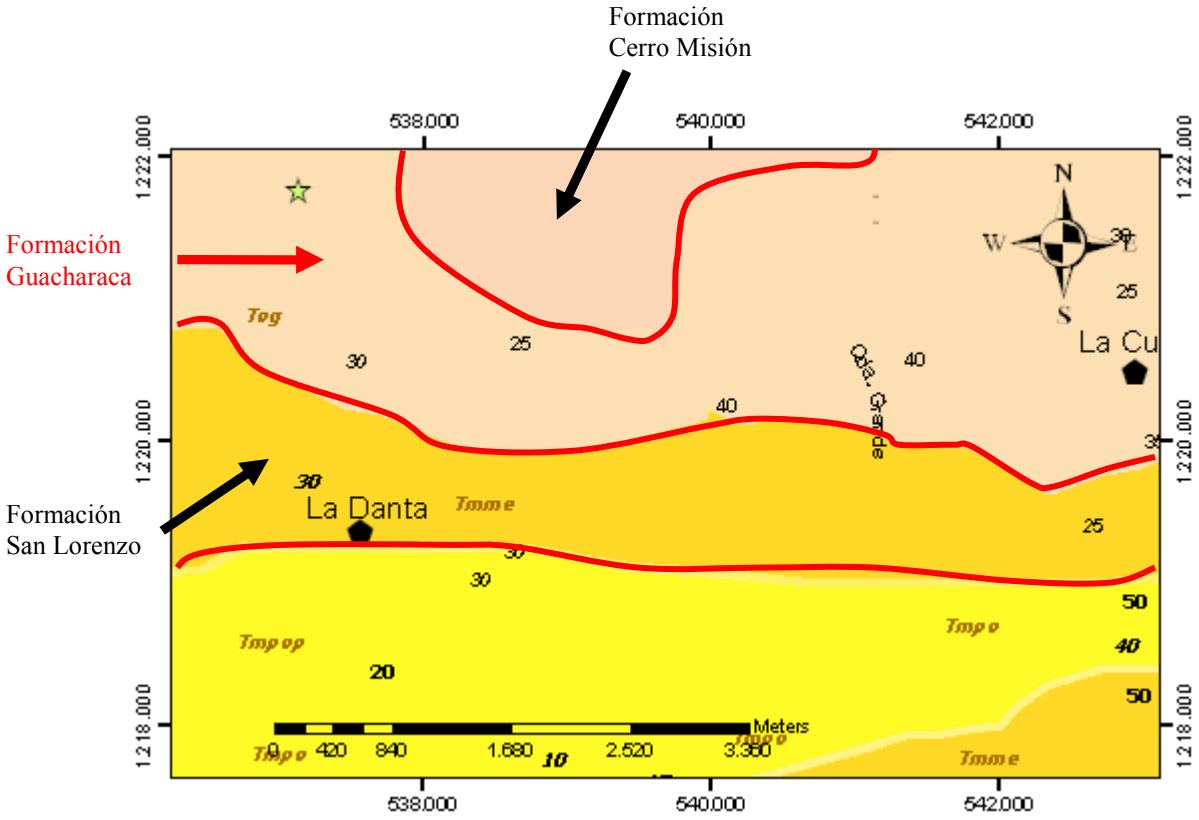


Figura 6.5 Mapa geológico actualizado de la zona, donde resalta el contacto entre las formaciones Cerro Misión, Guacharaca y San Lorenzo según los mapas empleados (H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G. (1967) y el mapa de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962)), ubicado en las proximidades del domo la Esperanza. Parte norcentral del área de estudio.

Formación Cerro Misión (Tecm), Formación Guacharaca (Tog), Formación San Lorenzo (Tmme), Formación Pozón (Tmpo)

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

En cuanto a la interpretación realizada de la Formación Guacharaca en las imágenes satelitales, resulta complicado diferenciar a esta unidad de las demás formaciones que se encuentran adyacentes (formaciones Cerro Misión y San Lorenzo). Al igual que se explicó en el punto 6.2.1, esta dificultad radica posiblemente, a que no existe entre ellas una diferencia resaltante en los componentes litológicos que ayude a apreciar características relevantes en cada una de estas unidades (Formación Cerro Misión, Grupo Agua Salada) (Fig. 6.6) y por lo tanto no hay una respuesta definida en las imágenes satelitales clasificadas (Fig. 6.7).

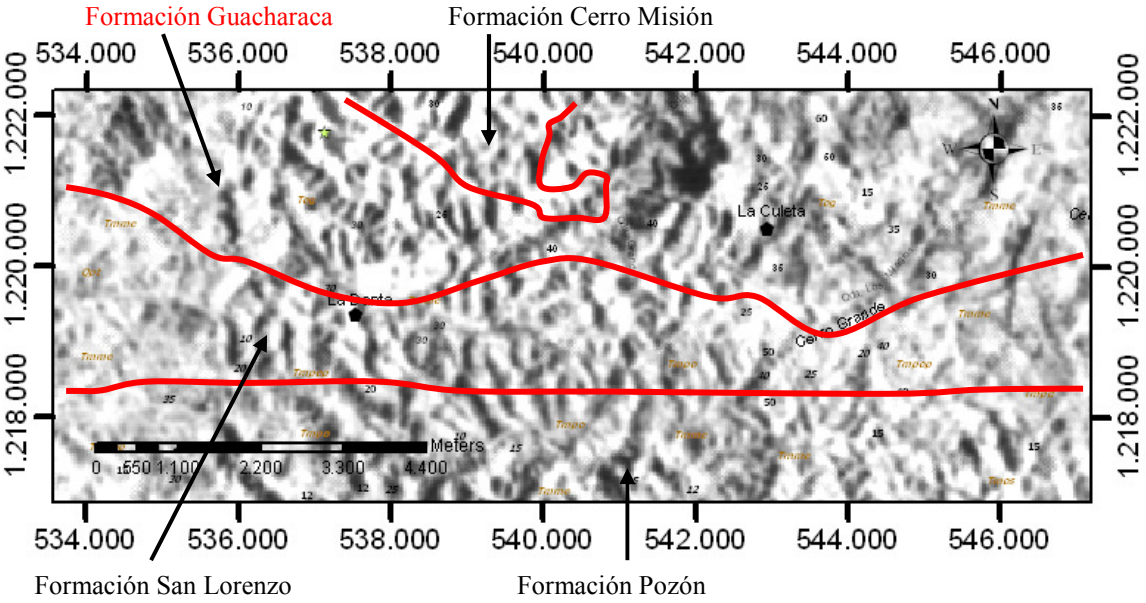


Figura 6.6 Unidad de elevaciones bajas (colinas lobulares irregulares) formada por litologías poco competentes pertenecientes a la Formación Cerro Misión y al Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón)

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

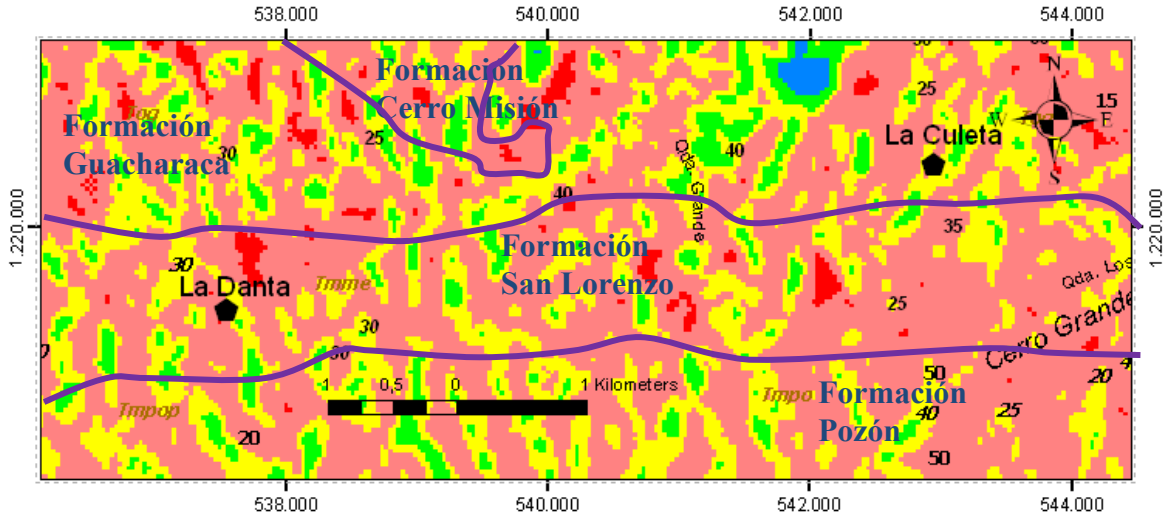


Figura 6.7 Imagen clasificada al sur del domo la Esperanza, donde se representa la Formación Cerro Misión y el Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón), observando que no existe discrepancias o característica alguna que ayude a distinguir entre dichas formaciones.

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.3 Formación San Lorenzo (Grupo Agua Salada)

La Formación San Lorenzo abarca entre un 7% de la zona en estudio, se extiende al noreste del valle del Tocuyo, al sur del alto La Esperanza–Guacharaca.

De acuerdo a la literatura, la Formación San Lorenzo está constituida por dos miembros: el Miembro El Salto compuesto por capas lenticulares de areniscas, localmente glauconíticas de hasta 10 m de espesor, intercalados con arcillitas limosas y limolitas de color gris azulado, tiene un espesor de 262 m (SUTER, 1947) y el Miembro Menecito caracterizado por una secuencia de arcillitas grises, arcillitas glauconiticas verdosas y margosas, tiene un espesor de 138 m. La Formación San Lorenzo es concordante y transicional sobre la Formación Guacharaca e infrayace a la Formación Pozón (SUTER, 1947) (Fig. 6.8).

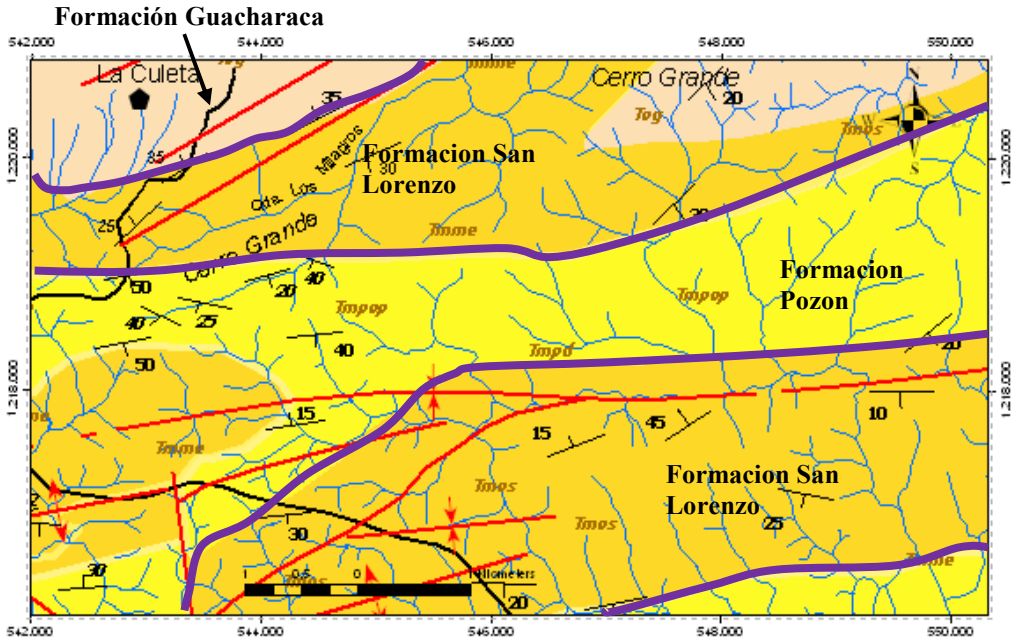


Figura 6.8 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representan los contactos de la Formación San Lorenzo con las formaciones Pozón y Guacharaca

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

La Formación San Lorenzo, al igual que las demás formaciones pertenecientes al Grupo Agua Salada, no puede distinguirse en las imágenes satelitales debido a que todas estas unidades presentan respuestas similares, posiblemente resultado de la similitud litológica, comportándose de la misma manera (Ver Fig.6.6). En las imágenes clasificadas es difícil reconocer los contactos de esta unidad con las demás formaciones, ya que no se observa una concentración de colores que ayude a delimitar a la Formación San Lorenzo (Fig. 6.9)

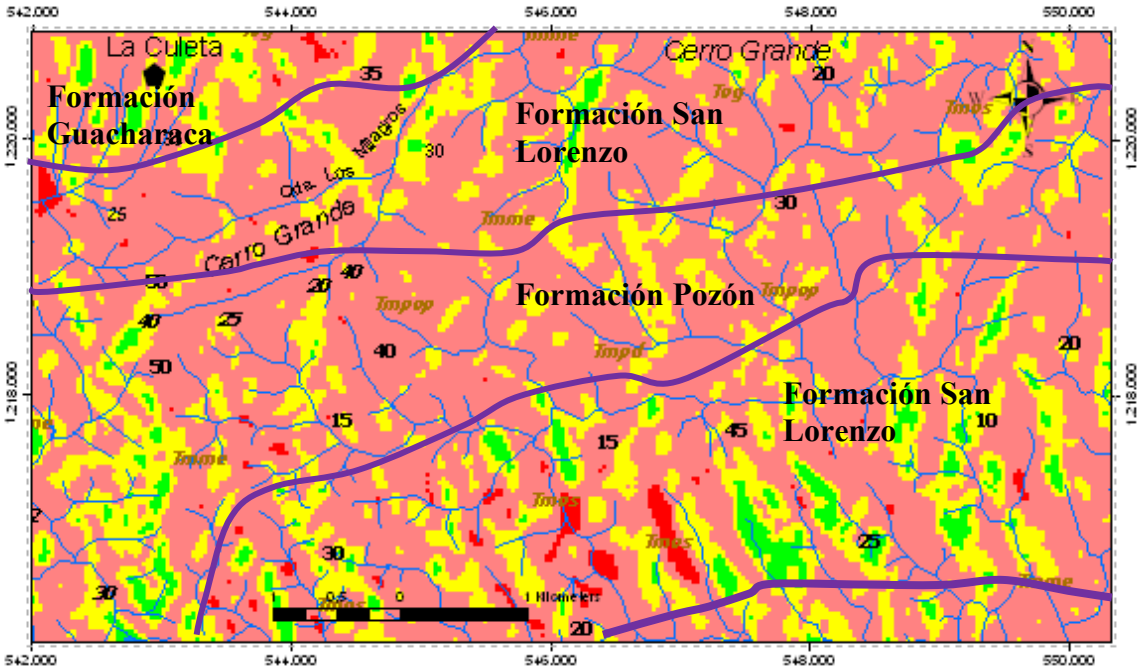


Figura 6.9 Imagen supervisada al noreste de la zona, donde existe uniformidad en los colores de las bandas de todo el Grupo Agua Salada, sin poder diferenciar los contactos litológicos de las formaciones Guacharaca, Pozón y San Lorenzo.

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.4 Formación Pozón (Grupo Agua Salada)

La Formación Pozón abarca un 7% de la zona de estudio, aflorando al noreste del valle del Tocuyo, al sur del alto La Esperanza–Guacharaca.

De acuerdo a la literatura, la Formación Pozón presenta las siguientes características litológicas y contactos litológicos:

La sección basal de la Formación Pozón se compone de areniscas glauconíticas correspondientes al Miembro Policarpio, seguido por arcillitas margosas del Miembro Husito y finalmente por arcillitas no calcáreas del Miembro Huso (RENZ, 1948).

Miembro Policarpio: compuesto de arcillas fosilíferas mal estratificadas; arcillas margosas y arenas glauconíticas, con concreciones ferruginosas y de marga blanca (RENZ, 1948).

Miembro Husito: compuesto por arcillas margosas de color gris pardo a marrón chocolate, intercaladas con abundantes margas de foraminíferos, más frecuentes hacia

arriba, y un horizonte de concreciones de marga consolidada blanca y amarilla. Toda la sección contiene granos diseminados de glauconita (RENZ, 1948).

Miembro Huso: compuesto de arcillas no calcáreas que meteorizan a gris y rojo, con intercalaciones de margas y arcillas calcáreas amarillas, con lentejones delgados de arena calcárea de grano fino hacia el tope (RENZ, 1948).

Los contactos de esta formación son concordantes con la unidad suprayacente Formación Ojo de Agua y con la unidad infrayacente Formación San Lorenzo (RENZ, 1948).

Tal como se mencionó anteriormente, las formaciones pertenecientes al Grupo Agua Salada (Guacharaca, San Lorenzo y Pozón) son difíciles de distinguir en las imágenes satelitales, debido a que no presentan colores distintivos sino varias tonalidades de verde sin mayor particularidad, por lo que se identifican como una sola unidad, tal como se observa en la Figura 6.10. De igual forma, en la imagen clasificada no se tiene una respuesta definida de cada una de estas formaciones presentando colores muy similares (Fig. 6.9)

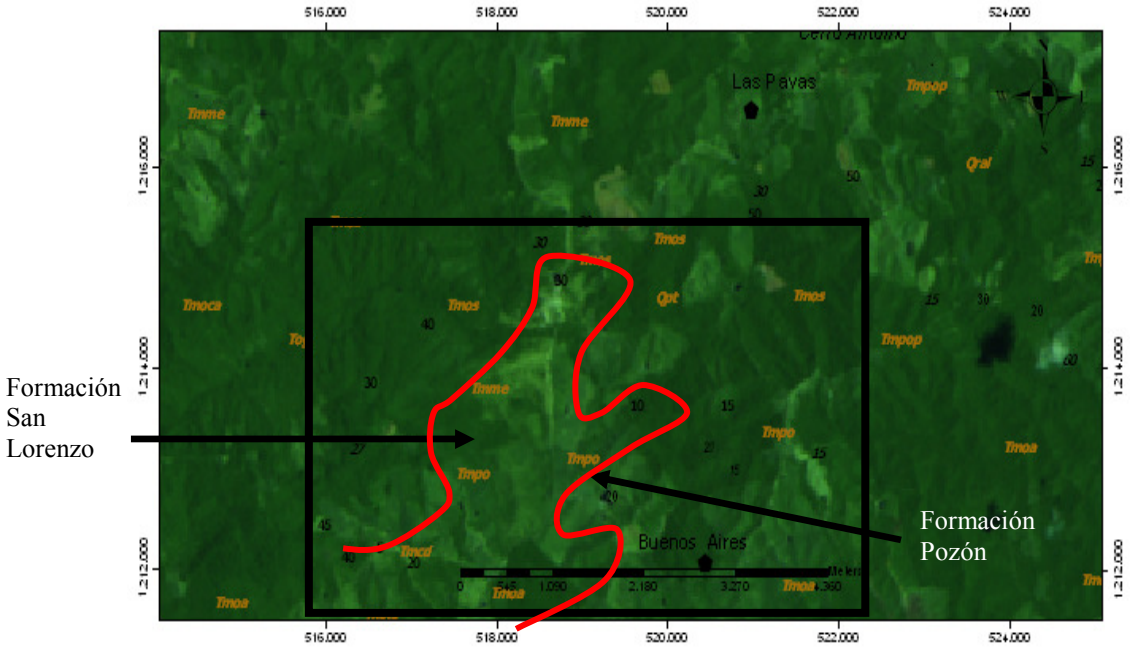


Figura 6.10 Imagen Satelital Landsat 7 ETM, 2001, bandas (R70, G50, B30), donde se muestra un ligero contraste en las tonalidades de las formaciones San Lorenzo y Pozón, las cuales forman parte de la unidad de elevaciones bajas (Colinas lobulares irregulares)

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.5 Formación Casupal

La Formación Casupal aflora en las zonas sur-central y suroriental de la subcuenca de Casupal, desde la región de Riecito-Cerro Misión-Cerro Sanare y al norte y este de los macizos Tarana y San Quintín, abarcando un área aproximada de 10%.

De acuerdo a la literatura la Formación Casupal presenta las siguientes características litológicas y contactos litológicos:

En Falcón suroriental la Formación Casupal puede dividirse en dos miembros: uno inferior, con predominio de areniscas de grano fino y arcillas, presencia de material carbonoso y estratificación en capas masivas. En general la granularidad es más gruesa hacia el tope; los primeros conglomerados aparecen en la parte media del miembro superior, contienen guijarros de cuarzo y ftanita negra en una matriz calcárea que al ascender en la sección están poco consolidados (WHEELER, 1963; p.55).

La base de la Formación Casupal se desconoce en el sureste de Falcón; sólo en el flanco sur del cerro Sanare se observa una discordancia sobre rocas más antiguas (Formación Cerro Misión) y en inconformidad con las unidades ígneo-metamórficas. El tope es generalmente discordante por debajo de calizas y lutitas de las Formaciones Agua Linda y Capadare (WHEELER, 1963).

A unos 9 km al suroeste de la colonia Araurima en el municipio Silva, se observó la presencia de un intervalo caracterizado por la presencia de clastos de cuarzos blanquecinos y subredondeados (3-15 mm) en una matriz calcárea infrayacentes a calizas de color gris claro, con un espesor de 90 cm (Figs. 6.11a; 6.11b). Sin embargo, debido a lo inaccesible de la zona no se pudo describir el afloramiento completo ni conocer el espesor total de la unidad en esta localidad.

Formación Casupal

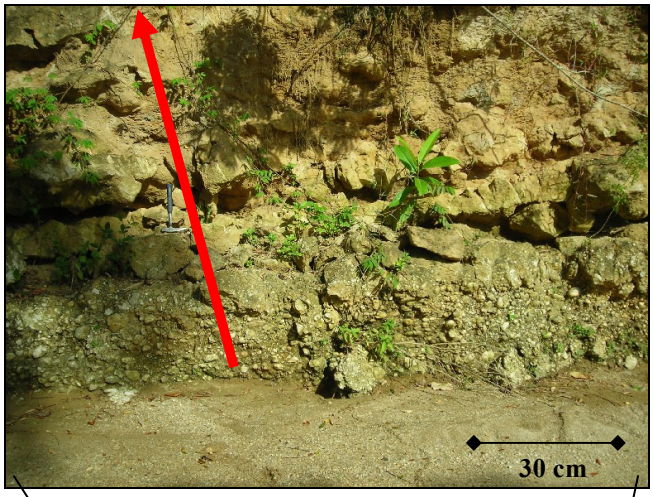
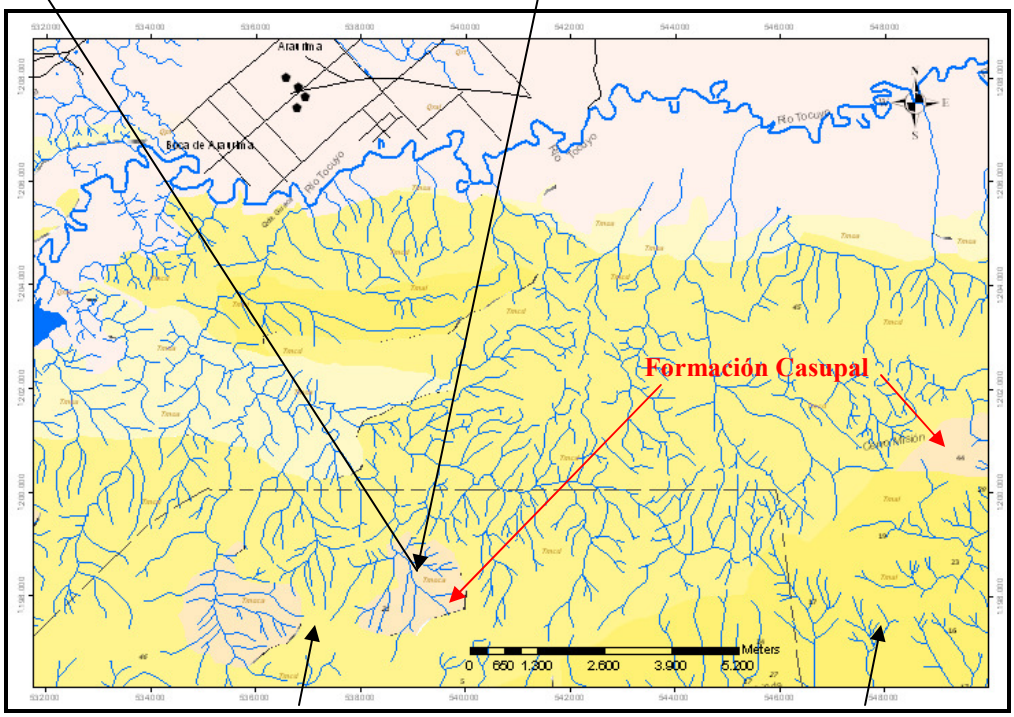


Figura 6.11a Intervalo caracterizado por la presencia de clastos de cuarzo subredondeados en una matriz carbonática, hacia la parte inferior. Formación Casupal, sector Sanare – Cerro Misión, Falcón



Formación Capadare Formación Agua Linda

Figura 6.11b Mapa geológico actualizado de la zona, indicando la ubicación de la Formación Casupal (Tmoca) y su contactos con las formaciones Capadare (Tmcd) y Agua Linda (Tmal)

De la interpretación obtenida de las imágenes satelitales, la Formación Casupal tuvo una mejor respuesta al oeste de la zona de estudio, en el cerro Riecito, donde se logró distinguir el contacto con la Formación Capadare, mostrando una degradación de colores, más claros hacia la Formación Casupal (Figura 6.12). Esta unidad compuesta de litologías relativamente competentes forma parte de la unidad de elevaciones medias, específicamente del tipo perteneciente a las mesetas degradadas disectadas (Fig.6.13).

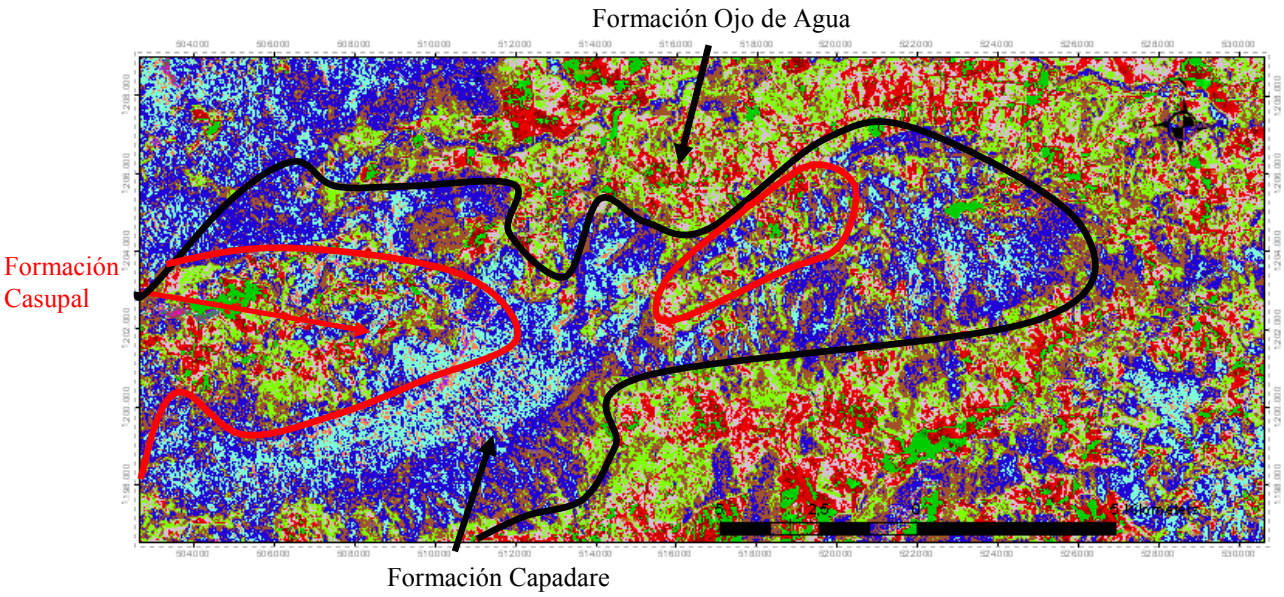


Figura 6.12 Imagen de clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa la variación de pixeles concentrados en el centro de la imagen, que corresponde al cerro Riecito y a su vez muestra claramente el contacto de la Formación Casupal con la Formación Capadare.

Formación Capadare Formación Casupal

Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

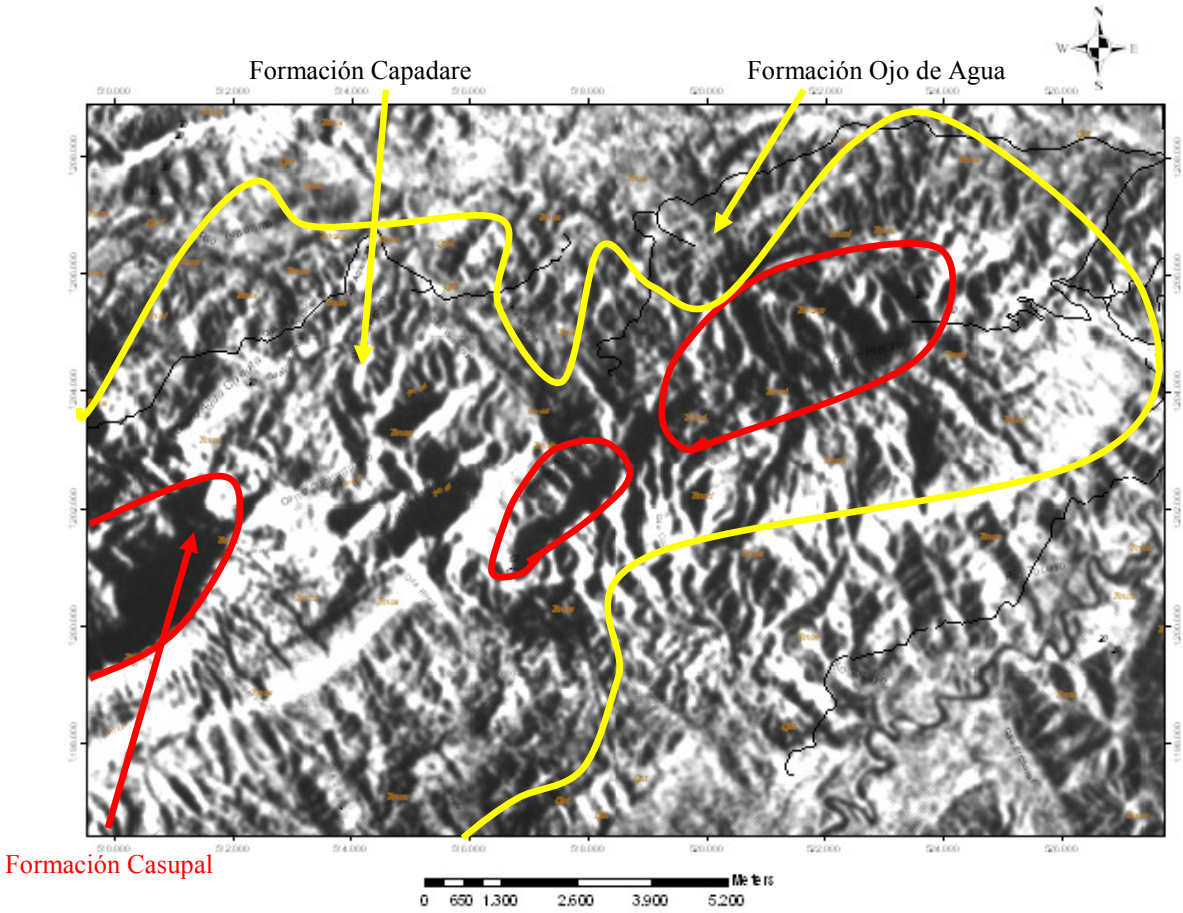


Figura 6.13 Unidad de elevaciones medias (mesetas degradas disectadas) formadas por litologías relativamente competentes pertenecientes a las formaciones Casupal y Capadare, Cerro Riecito.

, Contacto entre las unidades litoestratigráficas

Al este de la zona, en el flanco sur del cerro Sanare, la respuesta en las imágenes de la Formación Casupal es más difusa, no logrando definir claramente la extensión geográfica de la misma ni sus contactos con otras formaciones, por lo que fue cartografiada en esta parte de la zona de acuerdo a los mapas geológicos empleados (H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G., 1967 y el mapa de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION, 1962) (Fig.6.14).

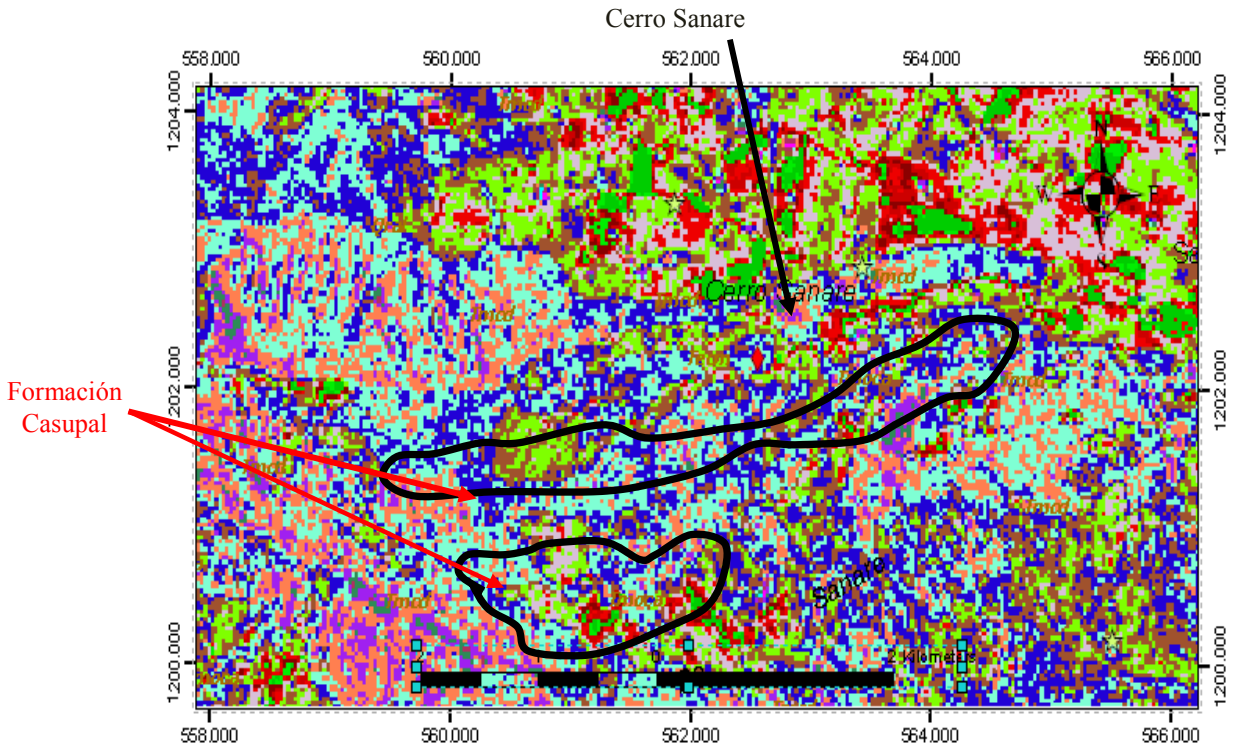


Figura 6.14 Clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se aprecia que no existe uniformidad en los colores que ayuden a delimitar los contactos litológicos de la Formación Casupal con otras formaciones.

Formación Casupal

Formación Capadare

Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.6 Formación Agua Linda

La Formación Agua Linda, aflora en las cercanías del río Guachipano, afluente a su vez del río Agua Linda, 2 Kms al sur de Cerro Misión, abarcando un 8% en la zona de estudio.

De acuerdo a la literatura, la Formación Agua Linda presenta las siguientes características litológicas y contactos litológicos:

Consiste de arcillitas, lutitas yesíferas y calizas intercaladas y en menor proporción conglomerados calcáreos y limolitas calcáreas fosíliferas. Su espesor es de 1.300 m, el contacto inferior es concordante sobre la Formación Casupal y el contacto superior es

discordante con las calizas y arcillitas de la Formación Capadare (LIDDLE, 1946; MÉNDEZ, 1967; CAMACHO & MIJARES, 1989). Aunque WHEELER (1963), señala que el contacto inferior es discordante sobre la Formación Casupal (Fig. 6.15).

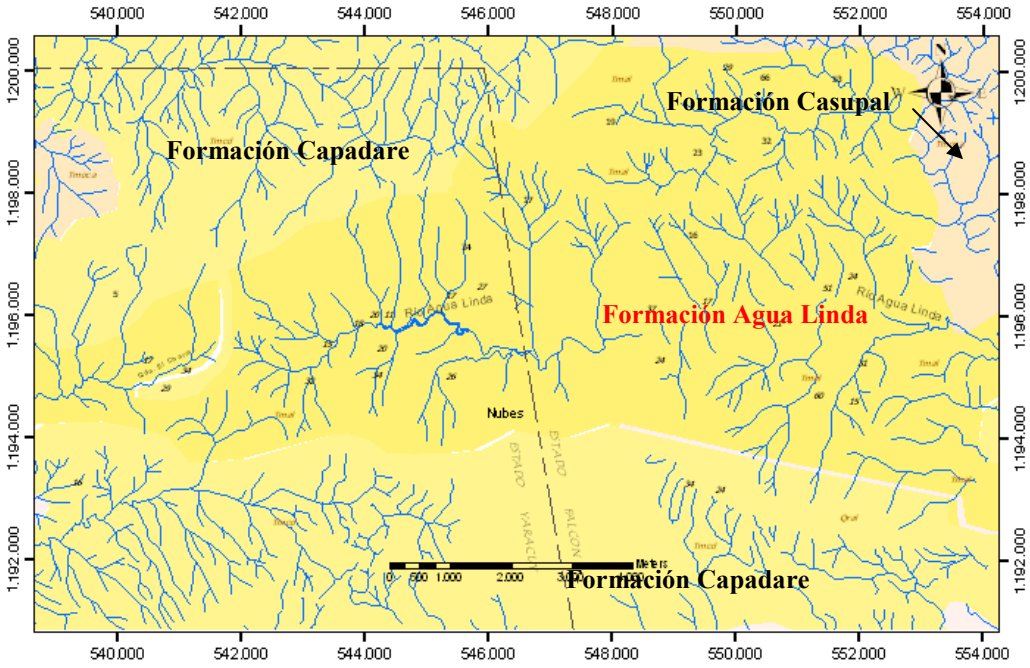


Figura 6.15 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representan los contactos de la Formación Agua Linda con las formaciones Casupal y Capadare, en las cercanías del cerro Misión.

Formación Agua Linda (Tmal), Formación Casupal (Tmoca), Formación Capadare (Tmcd)

La Formación Agua Linda, corresponde con la unidad topográfica I de elevaciones medias, específicamente del tipo filas elongadas descritas en el capítulo V, que se encuentra en la parte sur central del área de estudio, presentando una litología menos competente que las formaciones Casupal y Capadare (Fig.6.16)

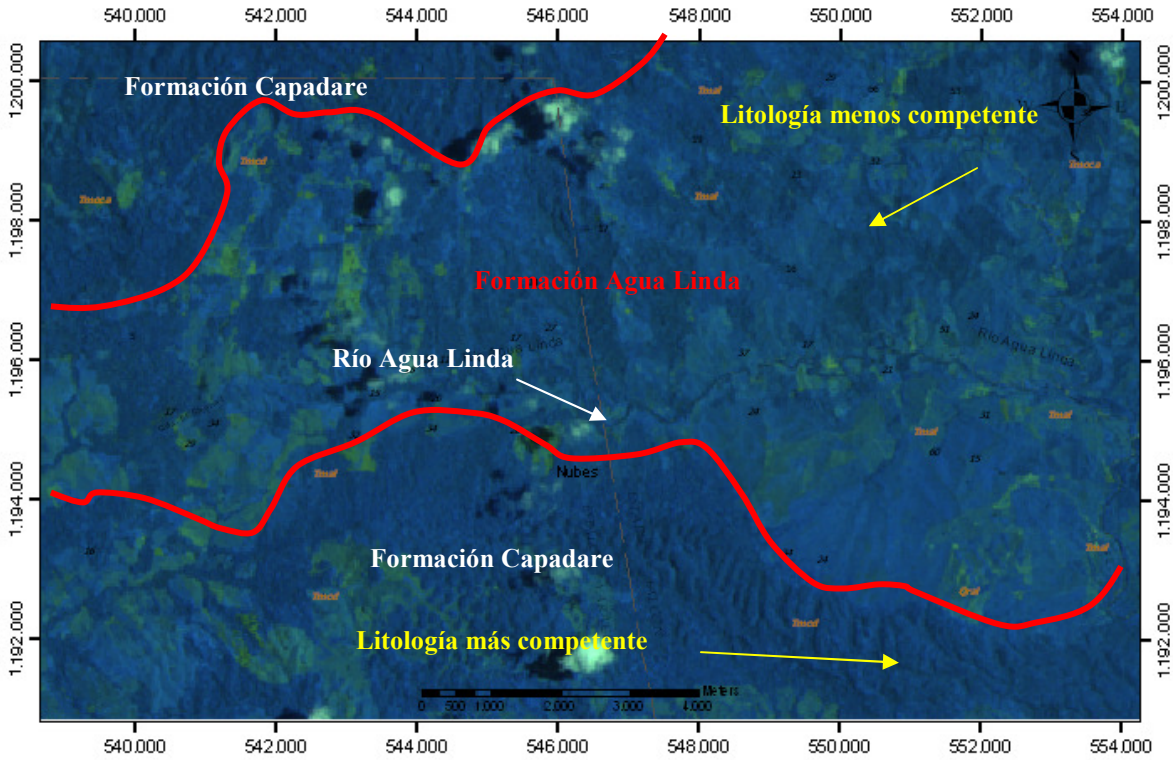


Figura 6.16 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa los contactos de las formaciones Agua Linda y Capadare.

La respuesta en las imágenes clasificadas permitió la cartografía del contacto entre las formaciones Agua Linda y Capadare, de acuerdo al cambio en la coloración de los pixeles de la imagen, donde se observa claramente que la Formación Agua Linda presenta en su mayoría una coloración entre azul y verde, mientras que la Formación Capadare presenta una tendencia hacia colores rosados (Fig. 6.17).

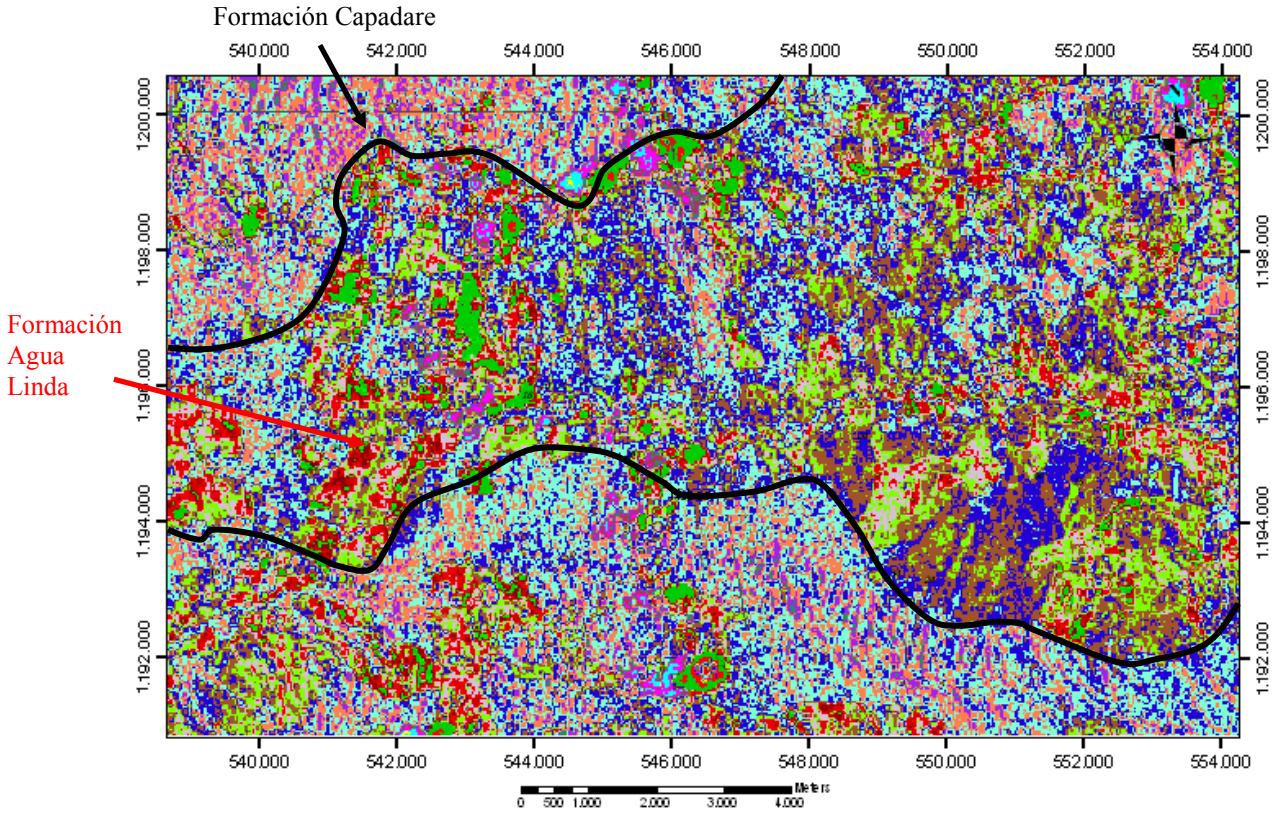


Figura 6.17 Imagen Satelital, con supervisión no clasificada, bandas (R10, G20, B30), donde se muestra claramente el contacto de la Formación Agua Linda con la Formación Capadare.

6.2.7 Formación Capadare

La Formación Capadare aflora en gran parte de la zona de estudio, principalmente en los cerros Sanare, Riecito y al norte y sur de los macizos Tarana, la Zurda y San Quintín, ocupando un 18% del área aproximadamente.

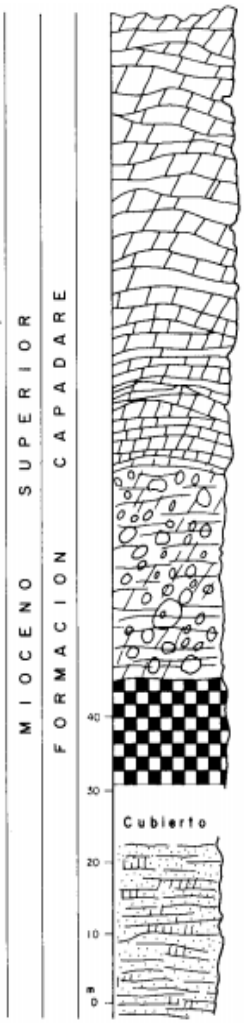
De acuerdo a la literatura la Formación Agua Linda presenta las siguientes características litológicas y contactos litológicos:

LAMUS *et al*. (1989) describen la Formación Capadare al noroeste de Tucacas e indican que litológicamente está caracterizada, de base a tope, por calizas fosilíferas poco consolidadas; calizas fosfáticas gris claro a marrón oscuro, cuarzosas y cavernosas; calizas

arrecifales de color marrón a gris claro, densas, duras y muy fosilíferas. La secuencia culmina con arcillas rojo-amarillentas, arenosas y calcáreas depositadas en ambientes lacustres y arenas conglomeráticas de color amarillento, rojizo y marrón claro.

GONZÁLEZ DE JUANA, *et al*. (1980) indican la presencia de dolomitas en la región de Sanare, en la figura 6.18 se presenta la columna estratigráfica presentada por estos autores para esta localidad.

El contacto inferior de esta formación al norte de la zona es discordante sobre la Formación Agua Linda y Casupal, hacia Aroa descansa sobre las rocas metamórficas del Sistema Metamórfico del Caribe. Al sur y este del macizo Tarana, está en contacto de inconformidad sobre el Esquisto de Aroa (LOZANO & MUSSARI, 2007). Al sur del macizo San Quintín está en contacto de falla de ángulo alto con las metavolcano-sedimentarias de San Quintín; y al sur de los macizos La Zurda y Salsipuedes está en contacto inconforme con el Metagabro anortosítico de Yumare. Hacia el tope está cubierta por terrazas y aluvión del Cuaternario (LOZANO & MUSSARI, 2007). Sin embargo, GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) mencionan que el contacto superior, con la Formación Ojo de Agua es concordante y transicional diacrónico.



Dolomita masiva, coherente, densa color marrón claro a crema

Dolomita grano muy fino. Marrón claro. Densa maciza. Buena estratificación

Conglomerado Dolomitico-Calcareo, color marrón. Granos de cuarzo blanco y jaspe negro.

Zona de contacto. Rico en óxidos de hierro Fosfato brechoide ferruginoso.

Fosfato marrón grisáceo, brechoide, denso, macizo, estratificación irregular

Lutitas margosas y limolitas calcárea. Mal estratificadas. Color marrón claro a verdoso

Figura 6.18 Columna litoestratigráfica de la Formación Capadare, en Sanare, Falcón Oriental. (Tomado de GONZÁLEZ DE JUANA, *et al*, 1980)

En campo se pudo observar varios tipos litológicos correspondientes con la literatura, tales como:

- En el sector de Sanare, se observaron intercalaciones de calizas delgadas, pobremente estratificadas, con un espesor que varía entre los 20-30 cm, de color marrón meteorizando a marrón parduzco y areniscas calcáreas tabulares, medianamente compactas, terrosas, amarillentas, con un espesor de 70 cm y un tamaño de grano de 0,1 a 0,3 mm, los granos son subangulosos y presentan una baja esfericidad (Figs. 6.19, 6.20).

Figura 6.19 Afloramiento de intercalaciones de calizas delgadas de 20-30 cm y areniscas calcáreas con un espesor de 70 cm. Sector El Puñal, Sanare, estado Falcón.

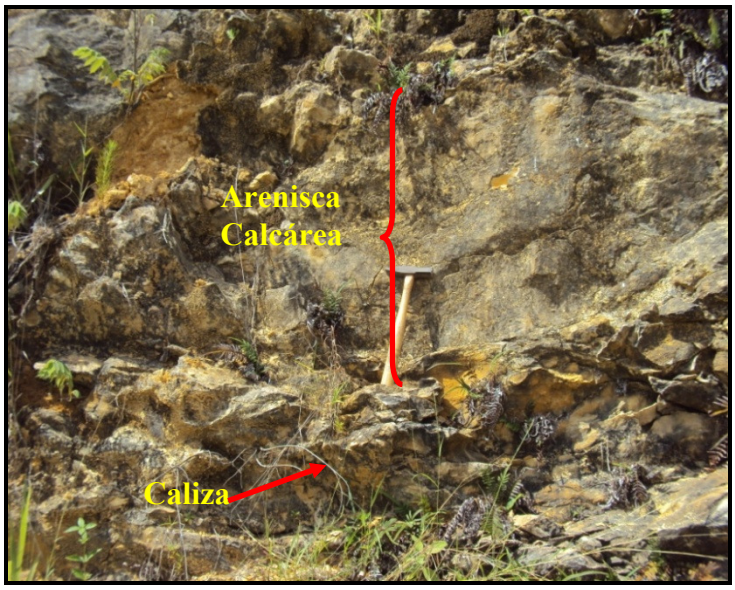


Figura 6.20 Disposición de las calizas delgadas intercaladas con areniscas calcáreas. Sector El Puñal, Sanare, estado Falcón.

- En la zona de Buena vista, afloran calizas de color crema a amarillo pardo, fosilíferas (fragmentos de conchas y bivalvos) (Fig. 6.21; 6.22), formando farallones abruptos (Fig. 6.23). En ocasiones se observaron depósitos por evaporación de aguas incrustantes, que se

presentan en forma de costras superficiales de color blanco a rosado claro denominadas caliche (Fig. 6.24), las cuales son características de climas semiáridos, como son los que predominan en la región de Falcón. Estas calizas son referidas en la literatura como calizas arrecifales.

Figura 6.21 Disposición de los bloques de caliza en el sector Buena Vista, estado Falcón.

Figura 6.22 Afloramiento de calizas pobremente estratificadas Sector Buena Vista, Sanare, estado Falcón.

Figura 6.23 Exposición de la Formación Capadare en el cerro Sanare.

Figura 6.24 Costras superficiales de caliche. Sector Buena Vista, Sanare, estado Falcón.

La Formación Capadare en la zona de estudio aflora como cuerpos carbonáticos aislados y cuerpos de fosfatos, que se destacan como prominentes cerros en la topografía baja y ondulante de las lutitas del Grupo Agua Salada. Esta formación se ubica en la unidad topográfica I de elevaciones medias descrita en el capítulo V (lomas alargadas, colinas incipientes, mesetas degradadas disectadas) (Fig. 6.25), siendo la unidad mas diferenciable

en las imágenes satelitales, debido a la uniformidad e intensidad de los colores en toda la extensión donde aflora la formación.

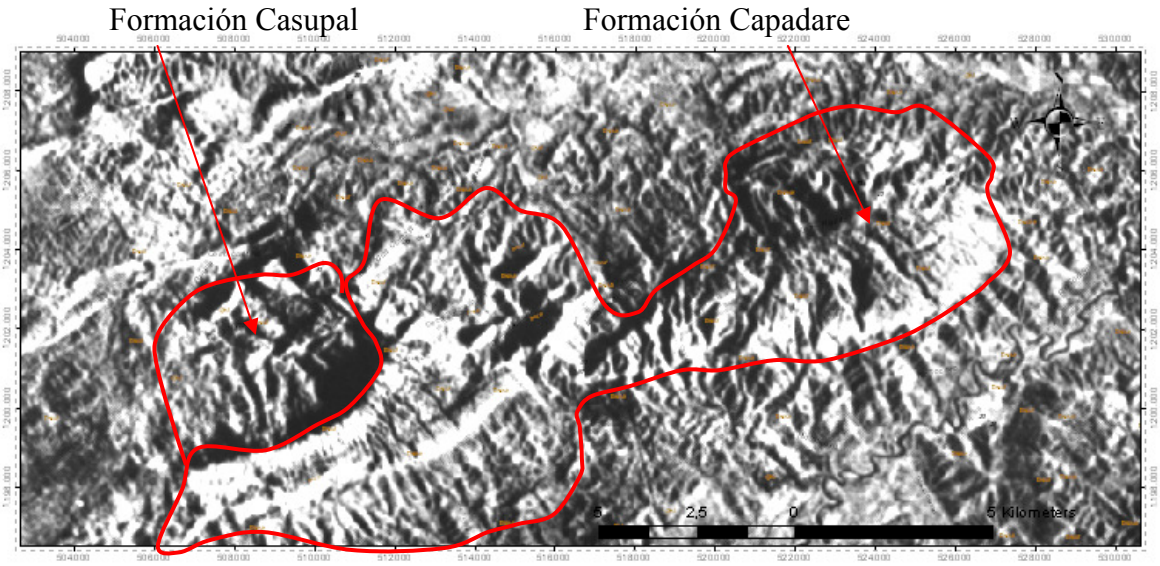


Figura 6.25 Imagen de radar de la zona, donde se aprecia el cerro Riecito correspondiente a las mesetas degradas disectadas de la unidad topográfica I (Unidad de elevaciones medias), constituido por litologías competentes como las Formaciones Capadare y Casupal.

, Contacto entre las unidades litoestratigráficas

La respuesta de las imágenes con clasificación supervisada y no supervisada al oeste de la zona de estudio, mostró gran efectividad al captar dos unidades como lo son: la unidad de elevaciones medias representada por el cerro Riecito y la unidad de elevaciones bajas representado por el valle del río Tocuyo (Fig. 6.26), donde puede observarse el contacto de litologías competentes, correspondiente a las formaciones Capadare y Casupal principalmente, con otras menos competentes, representadas por la Formación Ojo de Agua y depósitos Cuaternarios.

Es importante destacar que con el uso de las imágenes satelitales y de radar se pudo corroborar los contactos formacionales que aparecen en los mapas geológicos que sirvieron de base para este estudio. Pero a pesar que las imágenes mostraron claramente la concentración de pixeles en las distintas unidades que afloran y en las adyacencias del cerro Riecito, los contactos formacionales cartografiados finalmente fueron el resultado de la interpretación realizada tanto de las imágenes satelitales como de los mapas geológicos

empleados, pudiendo observar en las figuras que aparecen a continuación, que en el mapa actualizado los contactos tienen una tendencia general E-O (Fig.6.27a), mientras que en la imágenes (Figs.6.27b; 6.28) se observa un contacto más irregular.

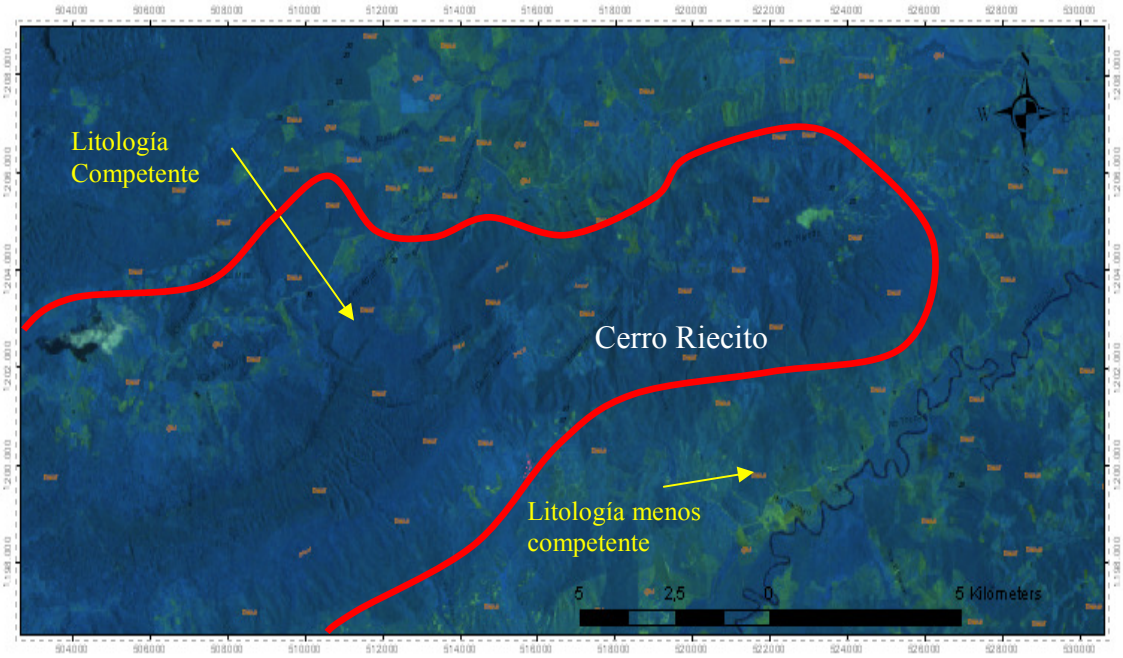


Figura 6.26 Imagen satelital donde se muestra el contacto de las dos unidades topográficas: unidad de elevaciones medias (litología competente) y unidad de elevaciones bajas (litología menos competente). Combinación de bandas: R70, G50, B40.

Unidad de elevaciones medias, litología más competente.

Unidad de elevaciones bajas, litología menos competente

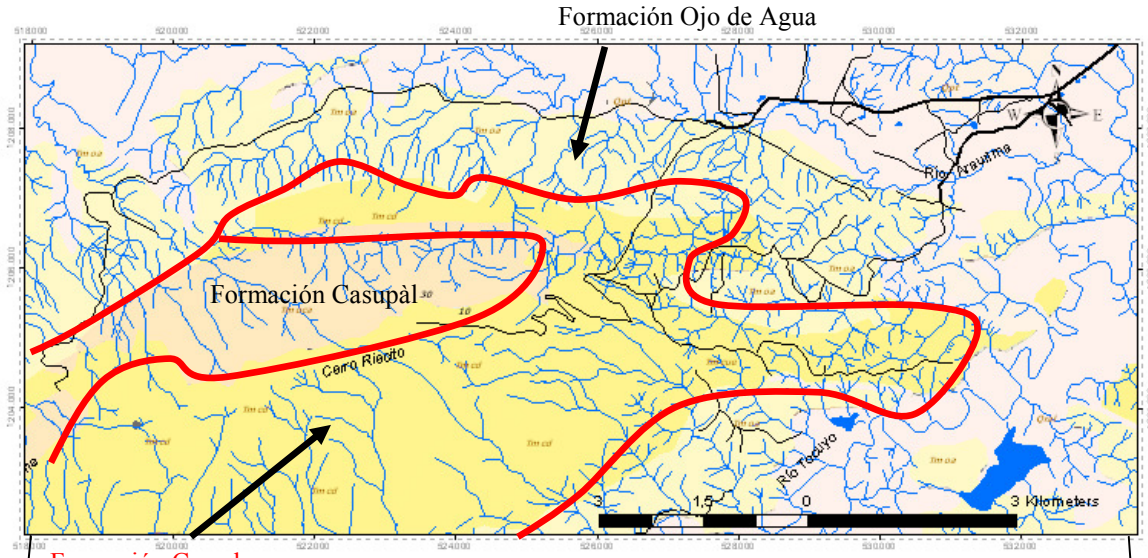


Figura 6.27a

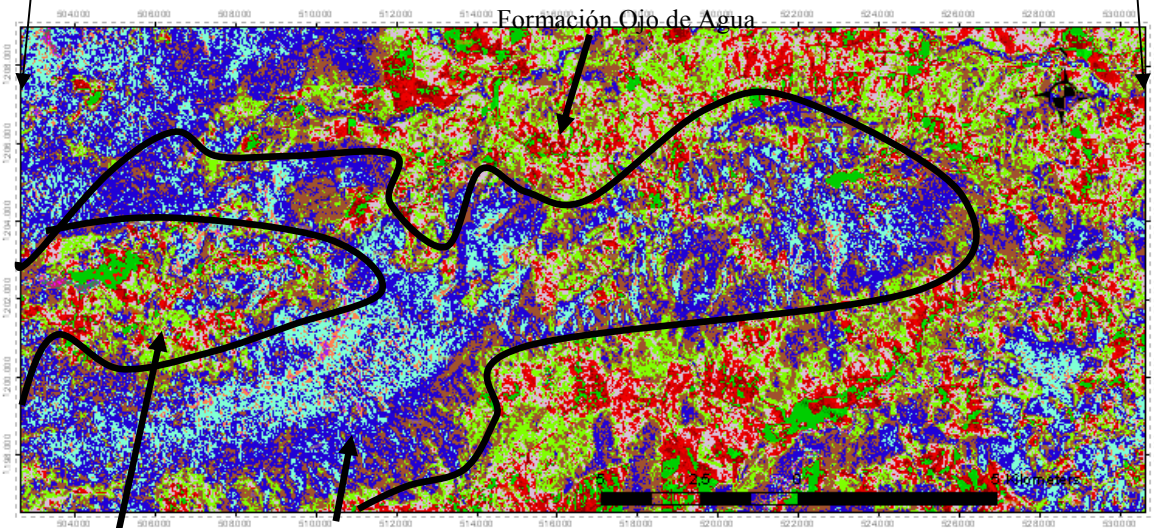
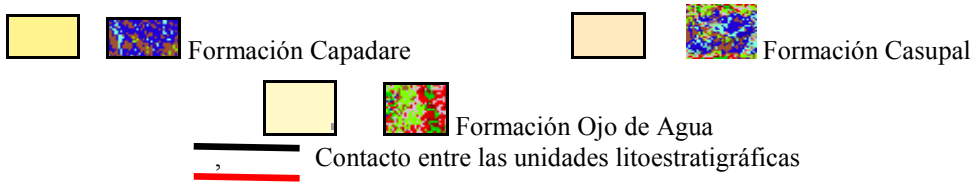


Figura 6.27b

Figura 6.27a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig. 6.27b Imagen de clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa la variación de pixeles concentrados en el centro de la imagen, cerro Riecito, igualmente se muestra claramente el contacto de la Formación Capadare con las formaciones Casupal y Ojo de Agua.



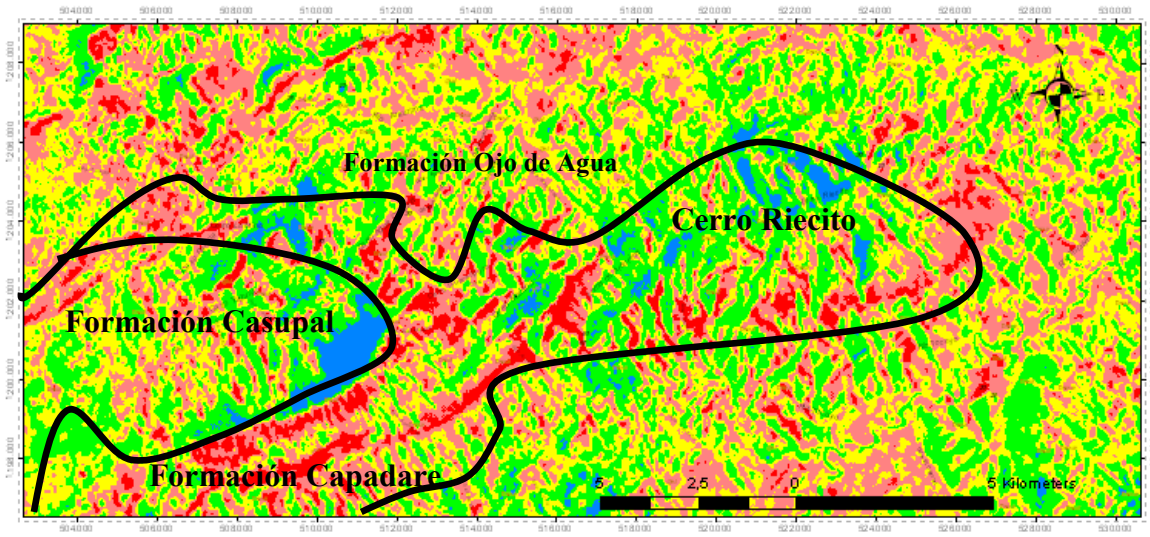


Figura 6.28 Imagen de clasificación supervisada, donde puede observarse la Formación Capadare en contacto con las formaciones Casupal y Ojo de Agua.

Formación Capadare Formación Casupal Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

Adicionalmente, la clasificación no supervisada generó una buena resolución al este de la zona estudiada, corroborando la correspondencia entre los contactos de las formaciones Capadare, Agua Linda y Ojo de Agua presentados en el mapa geológico de la CREOLE PETROLEUN CORPORATION (1962), debido a la variación entre pixeles que se observan en la imagen, con una variedad de colores para cada formación (Fig. 6.29a; 6.29b).

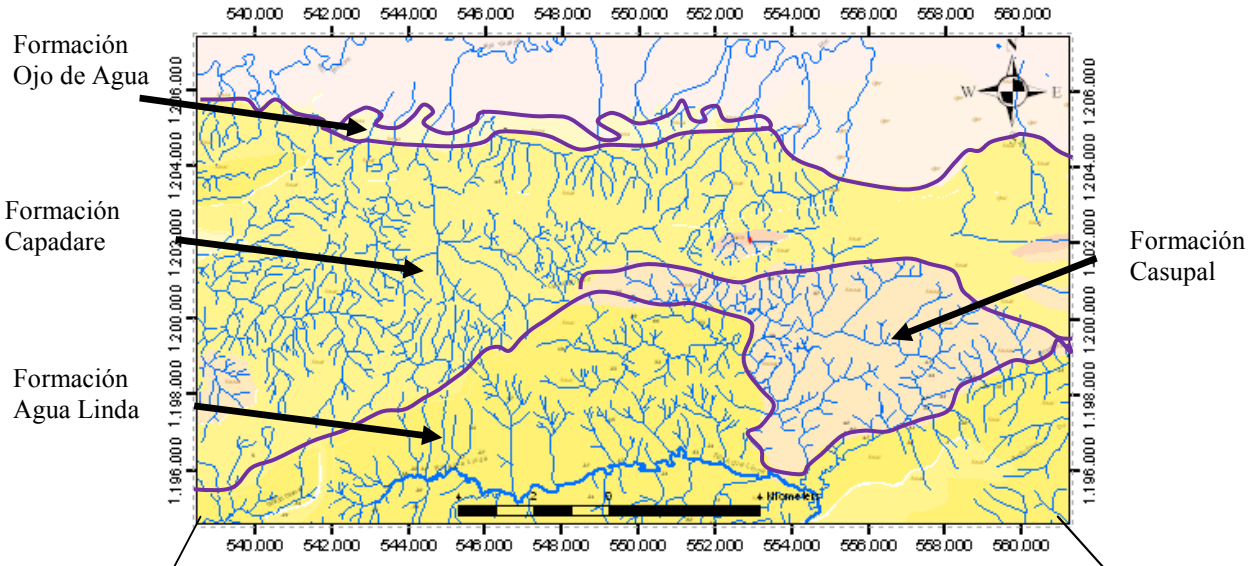


Figura 6.29a

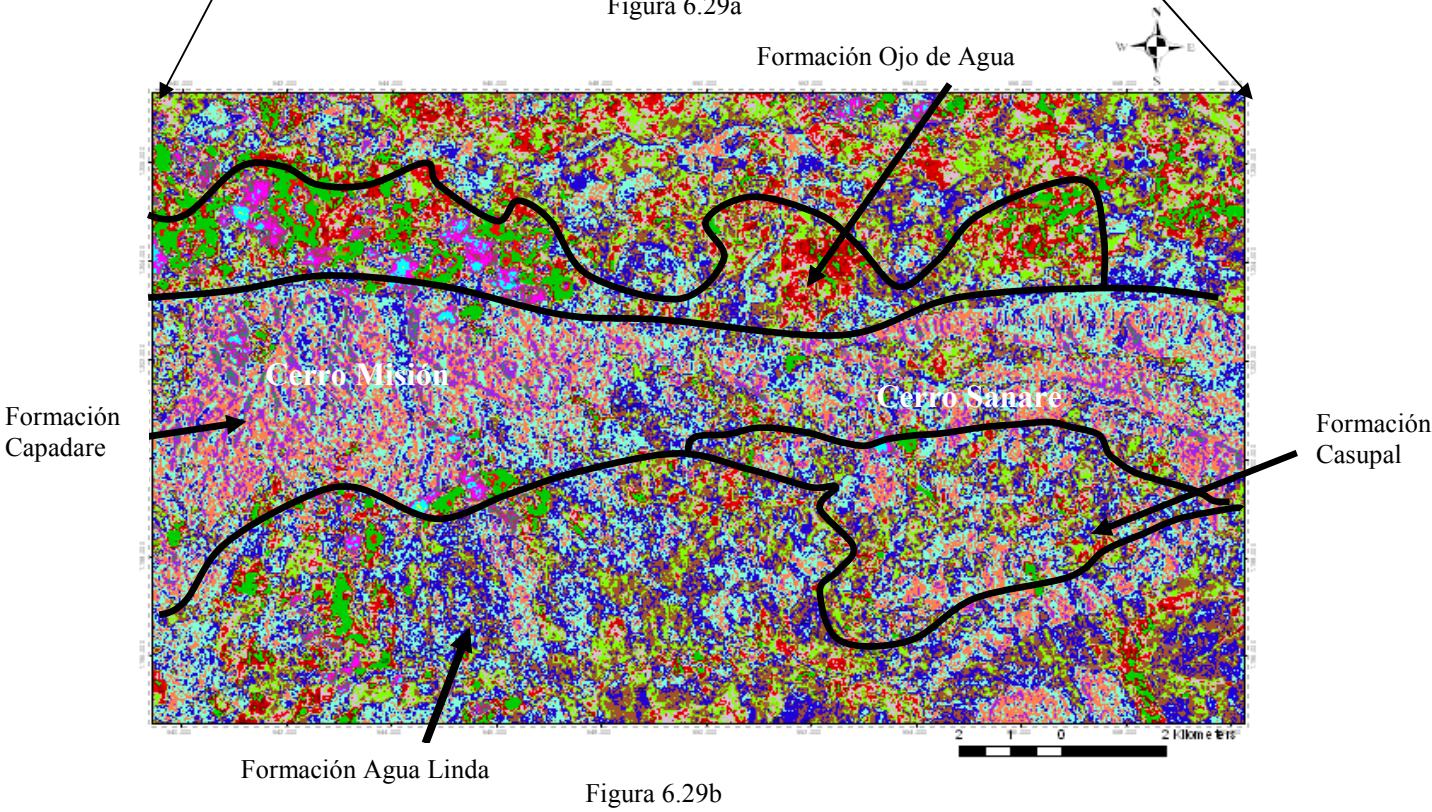


Figura 6.29b

Figura 6.29a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig.6.29b Clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se muestra el contacto de la Formación Capadare con las formaciones Ojo de Agua (al norte), Agua Linda y Casupal (al sur). Cerros Misión y Sanare.

Formación Capadare

Formación Ojo de Agua

Formación Agua Linda

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.8 Formación Ojo de Agua

La Formación Ojo de Agua, representa el 12% del área de estudio, se extiende desde el límite oeste hasta la parte central y al suroeste de la zona, ocupa parte de las laderas del cerro Riecito.

De acuerdo a la literatura la Formación Agua Linda presenta las siguientes características litológicas y contactos litológicos:

RENZ (1948), describe a la formación, la cual consiste predominantemente de areniscas micáceas interestratificadas con arcillas, conglomerados, calizas arenosas y nodulares, con ostras y otros moluscos. El contacto inferior de la Formación Ojo de Agua es concordante con la Formación Pozón, mientras que en el flanco sur de la cuenca de Agua Salada suprayace concordantemente a la Formación Capadare (Fig. 6.30) y más al sur, hacia Aroa, descansa discordantemente sobre rocas metamórficas del Sistema Montañoso del Caribe. El contacto superior es discordante por debajo de sedimentos Cuaternarios (RENZ, 1948) (Ver Anexo 1).

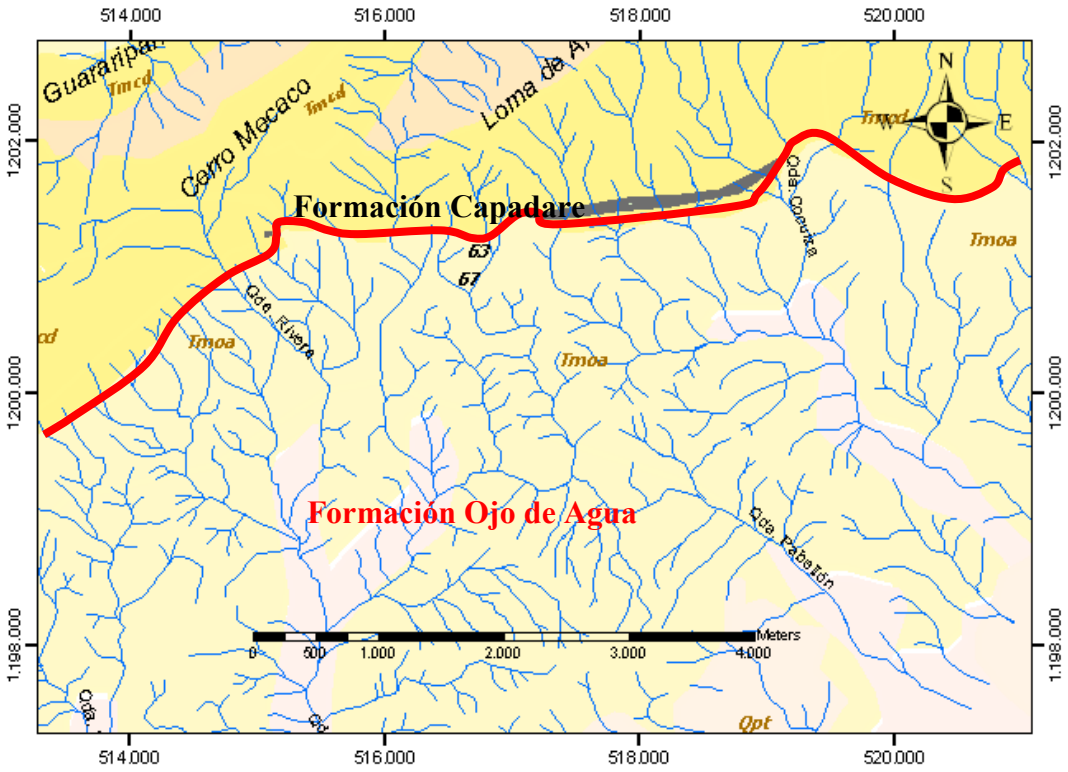


Figura 6.30 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los contactos de la Formación Ojo de Agua con y Capadare, al suroeste de las laderas del cerro Riecito. Mapa Base Creole.

Formación Capadare Formación Ojo de Agua Depósitos Cuaternarios

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

De acuerdo a lo observado en campo, la Formación Ojo de Agua se encuentra constituida por arenas sueltas, de color amarillo terroso a ocre, micáceas, con niveles conglomeráticos y estratificación cruzada, interestratificadas con arcillas de color amarillo claro. Texturalmente, las arenas presentan un tamaño de grano entre 0,5 a 2 mm, subangulosos y con baja esfericidad; en los niveles conglomeráticos el tamaño de grano varía entre 0,5 y 4 cm, subredondeados, con esfericidad elevada. (Figs. 6.31; 6.32)

Figura 6.31 Afloramiento de la Formación Ojo de Agua, al norte de la colonia Araurima.

Figura 6.32 Afloramiento de la Formación Ojo de Agua, donde se observan los niveles conglomeráticos al norte de la Colonia Araurima.

La respuesta de las imágenes satelitales para la Formación Ojo de Agua fue de gran ayuda para delimitar sus contactos con la Formación Capadare y los depósitos cuaternarios. En la figura 6.33, se ubica la unidad de elevaciones medias (mesetas degradadas disectadas) intercaladas con valles estrechos, constituida por.las formaciones Casupal, Capadare y Ojo de Agua.

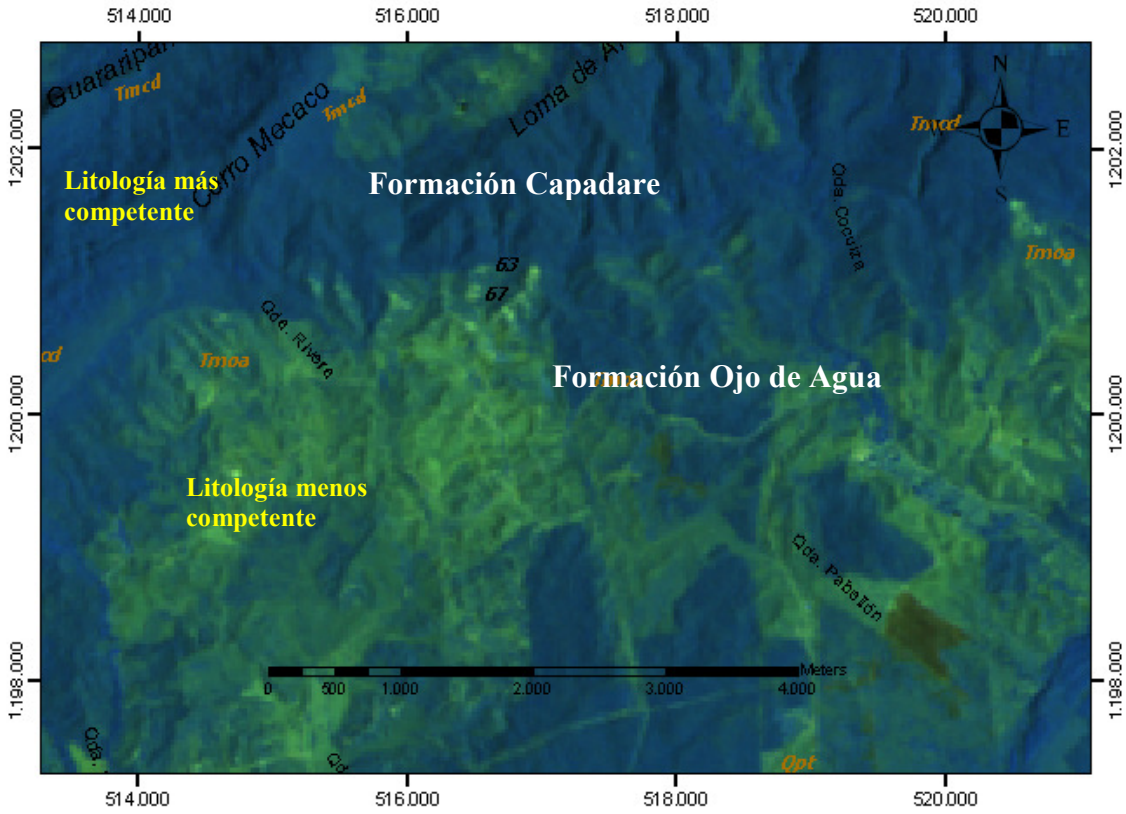


Figura 6.33 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa el contacto de las formaciones Capadare y Ojo de Agua, además de apreciarse el cambio de tonalidad en los colores correspondientes a cada una de las unidades litológicas.

Formación Capadare Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

A su vez la información aportada por las imágenes con clasificación no supervisada, arrojaron de igual forma un gran aporte para la interpretación de los contactos entre las formaciones Capadare y Ojo de Agua, corroborando la información que se tenía, manifestándose por el cambio de coloración entre los pixeles, permitiendo así delimitar sus

contactos de acuerdo a la litología característica de cada formación, como se puede observar en la figura 6.34.

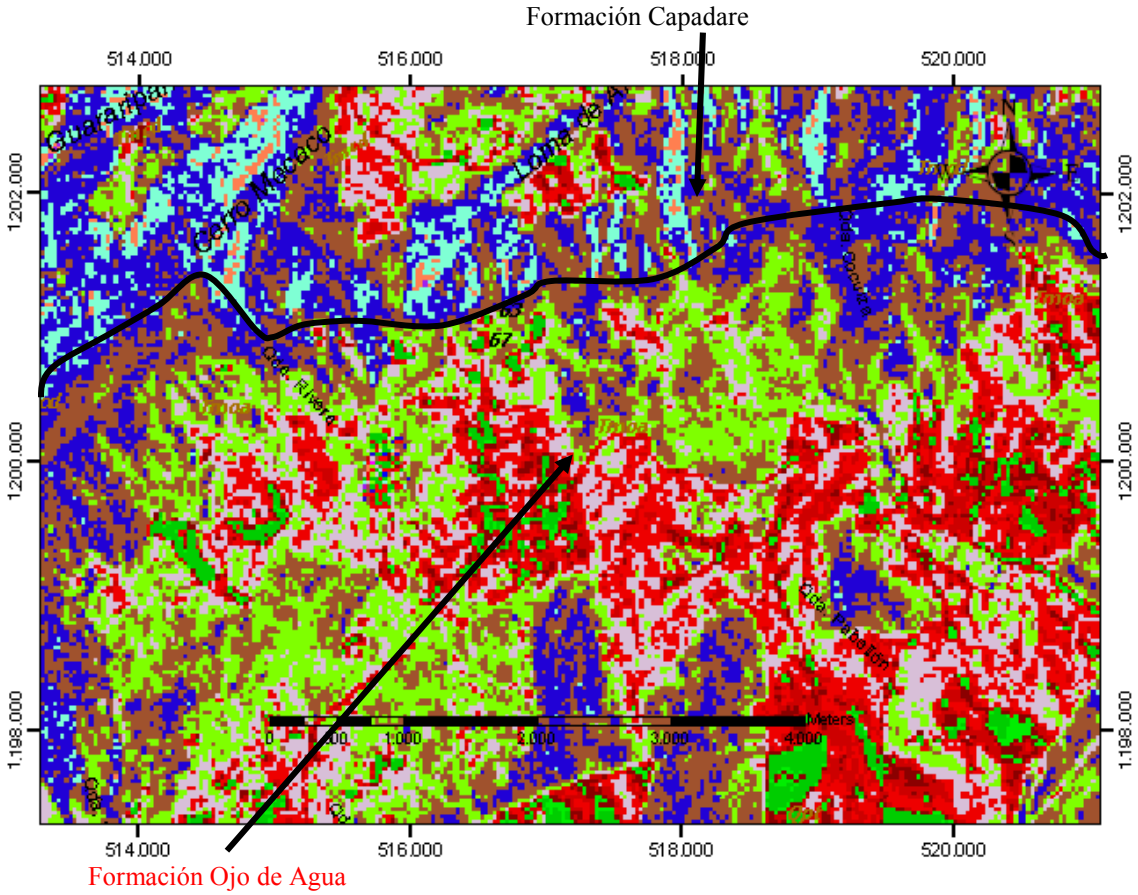


Figura 6.34 Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa el contacto entre las formaciones Capadare y Ojo de Agua.

Formación Capadare

Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litoestratigráficas

6.2.9 Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios constituyen un 23% de la zona aproximadamente, se observan en la parte central del área, en las laderas del valle del río Tocuyo (Fig.6.35) hasta su desembocadura. Los depósitos cuaternarios suprayacen discordantemente a la Formación Ojo de Agua (Fig.6.36). La unidad está representada por acumulaciones de limos y gravas las cuales presenta huellas de desecación en las llanuras del río Tocuyo (Fig.6.37a, 6.37b).

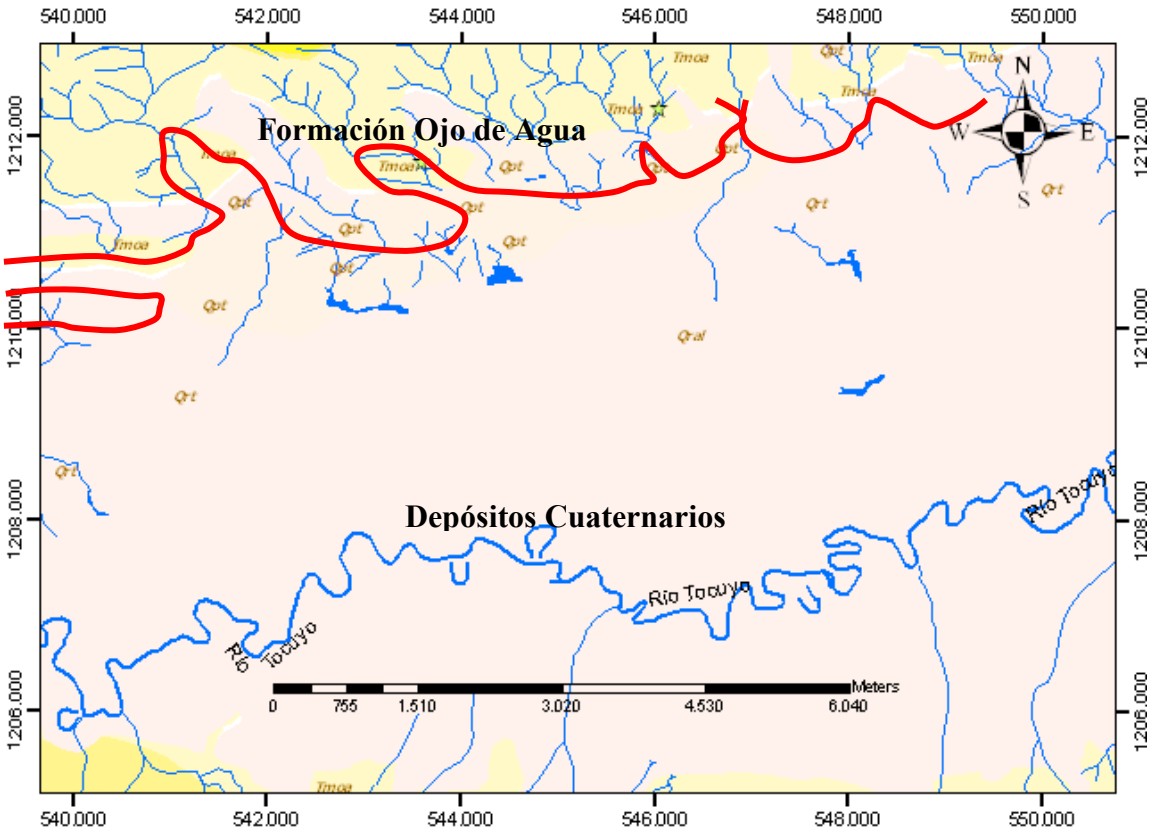


Figura 6.35 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los contactos de la Formación Ojo de Agua con los depósitos cuaternarios, al norte de cerro Misión. Mapa base Creole.

Depósitos Cuaternarios

Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litológicas

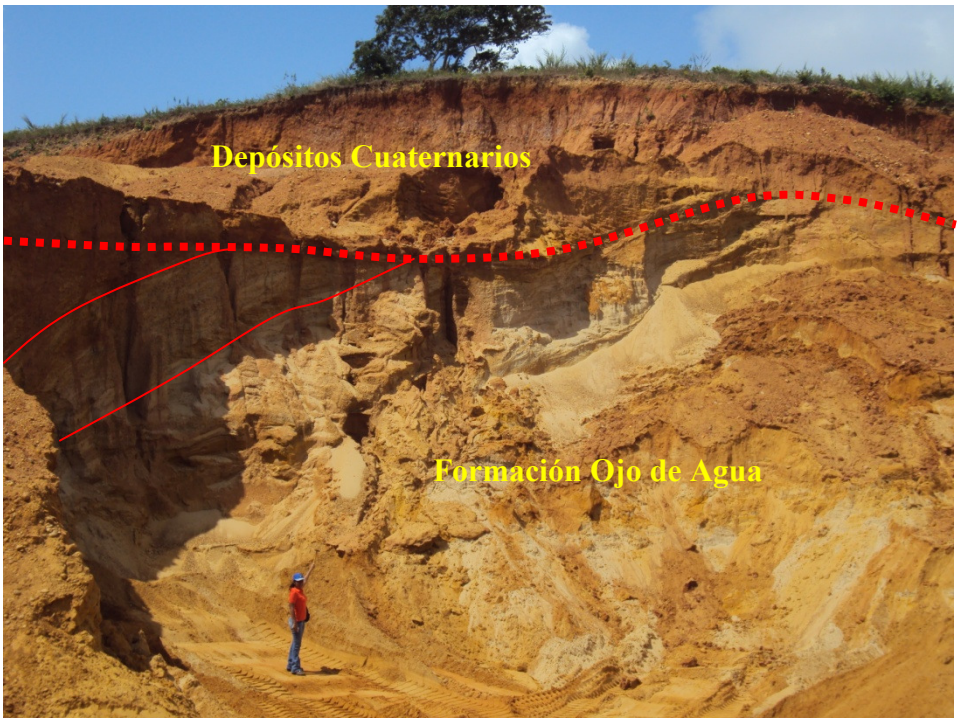


Figura 6.36 Contactos entre los depósitos cuaternarios y la Formación Ojo de Agua. Sector Araurima, estado Falcón.

, ... Contacto discordante entre las unidades litológicas

Figura 6.37a Sedimentos de aluvión y encajamiento de la terraza en las adyacencias del río Tocuyo

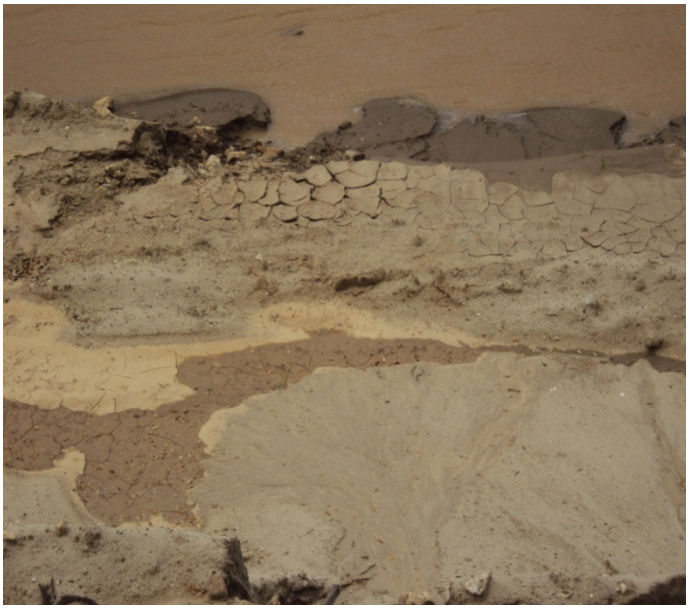


Figura 6.37b Grietas de desecación en limos depositados por el río Tocuyo en épocas de inundación. Alto Tocuyo, Falcón.

Los depósitos cuaternarios se ubican en la unidad de elevaciones bajas, del tipo planicie aluvial, descritas en el Capitulo V, constituidas por una litología menos competente (Fig. 6.38). La determinación de los contactos de los depósitos cuaternarios con otras formaciones mediante las imágenes satelitales no fue muy eficiente, debido a que no se

obtuvieron cambios en la coloración de los pixeles (Fig. 6.39), siendo cartografiados finalmente según los mapas geológicos empleados en este estudio.

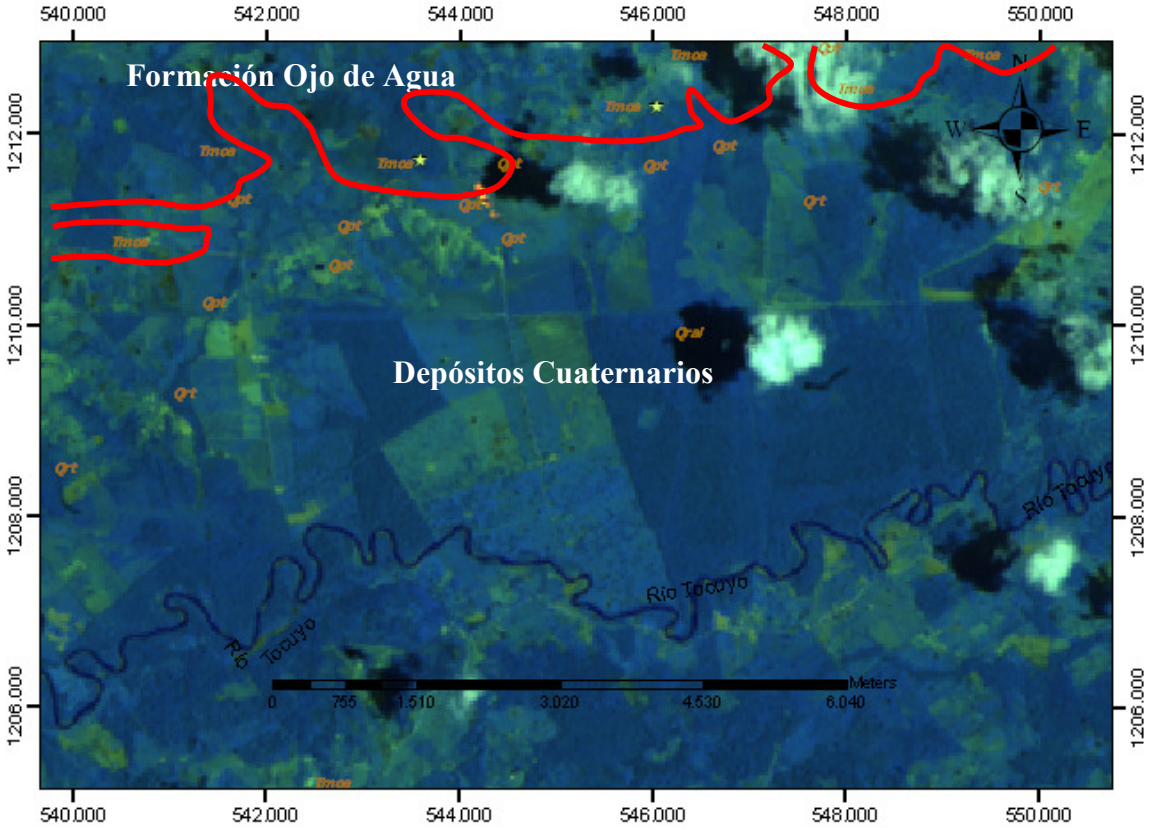


Figura 6.38 Imagen satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa muy levemente el contacto de los depósitos cuaternarios (planicie aluvial) y la Formación Ojo de Agua (unidad de elevaciones medias)

Contacto entre las unidades litológicas

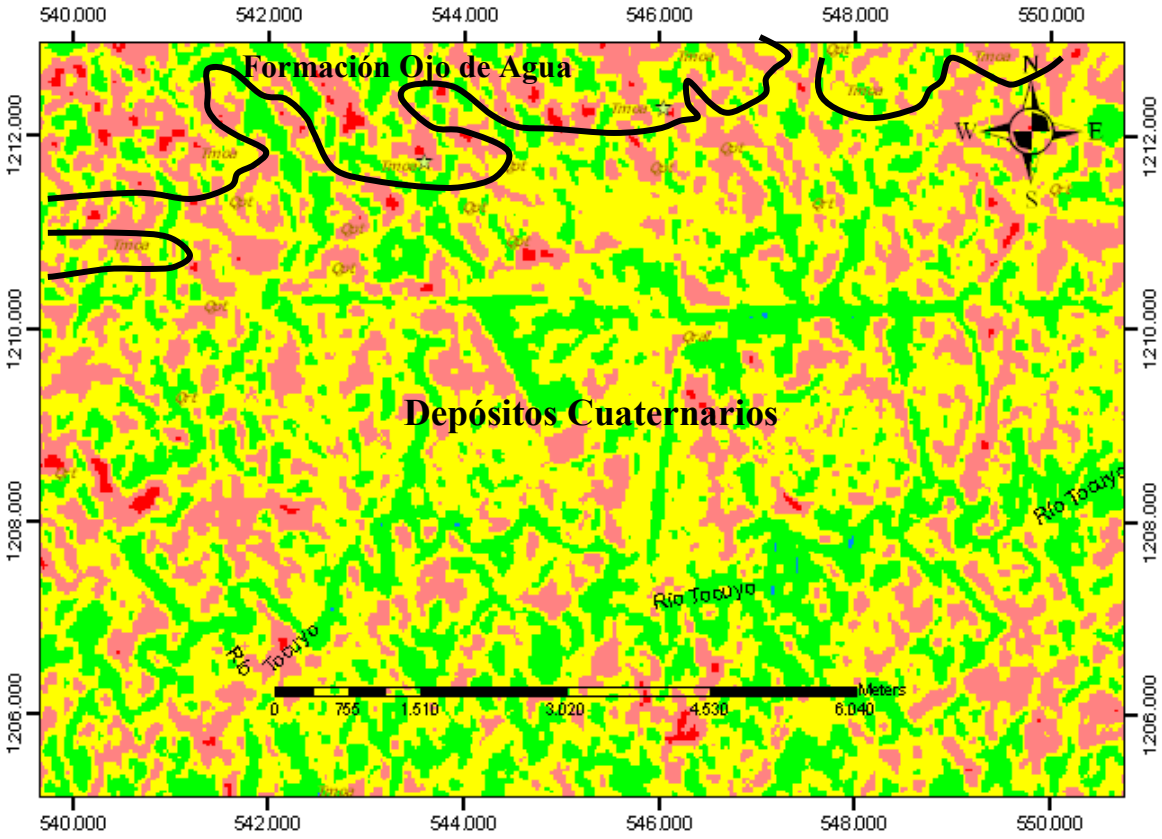


Figura 6.39 Imagen satelital con clasificación supervisada, donde se observa que no existe algún cambio en la coloración de los pixeles para determinar la extensión de los depósitos cuaternarios.

Contacto entre las unidades litológicas

6.2.10 Rocas ígneas–metamórficas

Las rocas metamórficas de edad Cretácico representan un 9% aproximadamente del área en estudio, se observan al sur de la zona, en los macizos Tarana, La Zurda, San Quintín y Salsipuedes. Las intrusiones ígneas afloran en la zona de Sanare (Fig.6.40a, 6.40b).

En el macizo de Tarana afloran, al norte, filita grafitosa-micácea, al sur, esquisto grafitoso-cuarzo-micáceo y mármol, pertenecientes a la unidad litológica Esquito de Aroa. Además en el centro de la parte sur se encuentra un lente alargado de serpentinita, considerado perteneciente a la Asociación Metamórfica La Costa (LOZANO & MUSSARI, 2007).

En el macizo de San Quintín afloran, al norte, anortosita y gabro, incluyendo leucogabro a melanogabro, de la unidad litológica Metagabro anortosítico de Yumare, al sur, metalava, metatoba, brecha volcánica y metasedimentarias de la unidad litológica Metavolcanosedimentarias de San Quintín (LOZANO & MUSSARI, 2007).

En el macizo de La Zurda afloran, intercalados, rocas gabroides de la unidad litológica Metagabro anortosítico de Yumare (LOZANO & MUSSARI, 2007).

El macizo Salsipuedes litológicamente es bastante heterogéneo con respecto a los otros cerros, afloran de manera intercalada, gneis, esquisto, granofiro y gabro de la unidad litológica Metagabro anortosítico de Yumare (LOZANO & MUSSARI, 2007).

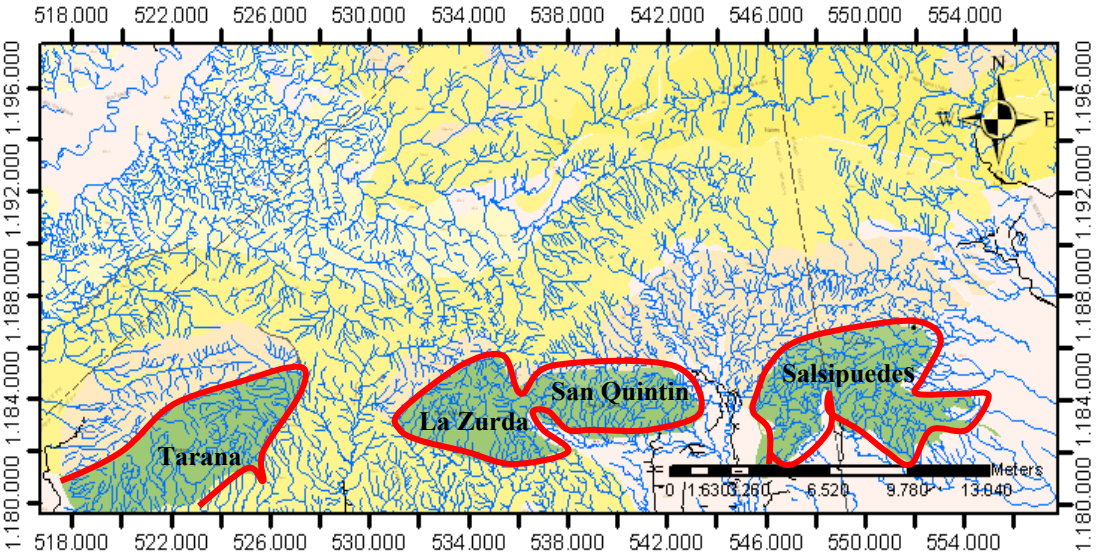


Figura 6.40a Mapa geológico actualizado de la zona, donde se representa los macizos ígneos – metamórficos al sur de la zona en estudio.

Rocas ígneo-metamórficas

Formación Casupal

Formación Capadare

Formación Ojo de Agua

Contacto entre las unidades litológicas

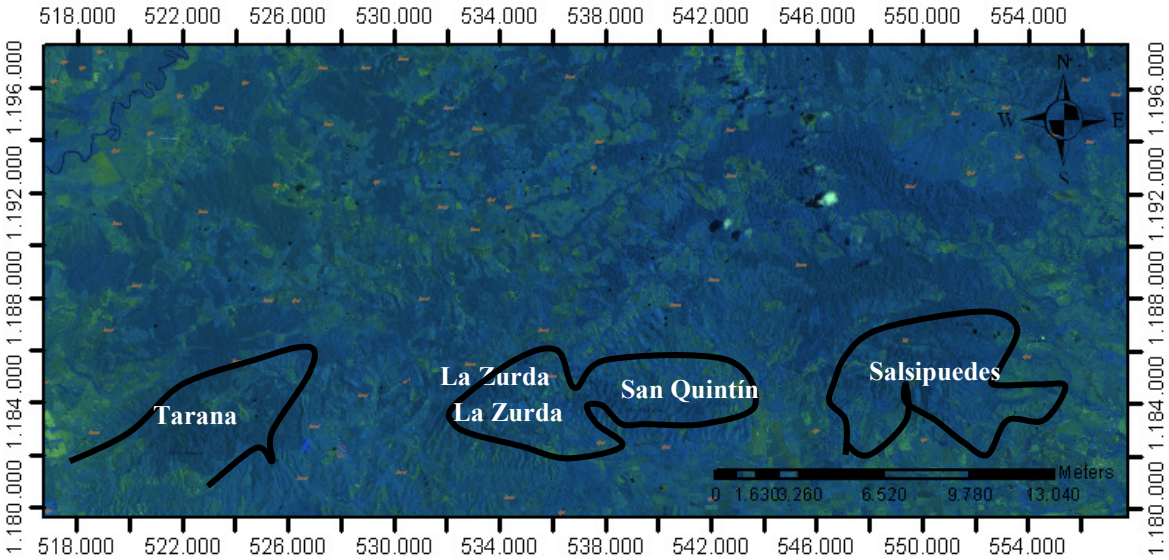


Figura 6.40b Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observan los cuatro cerros donde afloran las rocas ígneo-metamórficas, al sur del área en estudio.

Contacto entre las unidades litológicas

La respuesta de las imágenes satelitales con clasificación supervisada y no supervisada no mostraron distinción entre las formaciones que se encuentran en contacto con las rocas ígneo-metamórficas, debido a que no presentan un cambio de coloración en los pixeles de gran relevancia que ayude a delimitar estos contactos (Fig. 6.41).

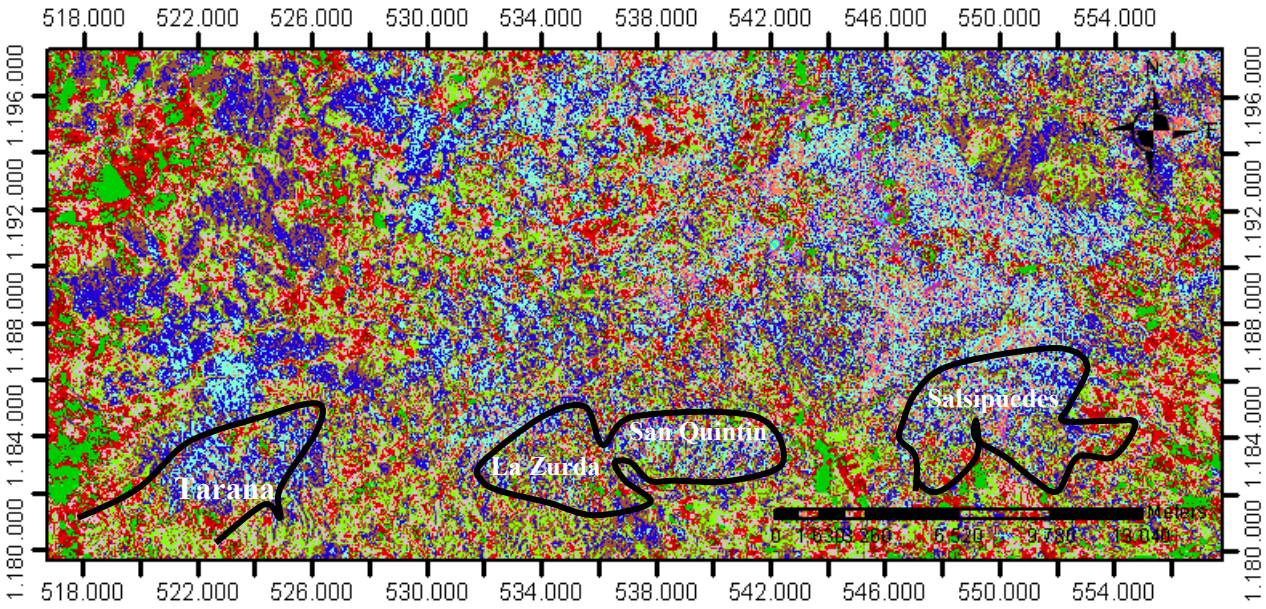


Figura. 6.41 Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa que no existe distinción entre los contactos formacionales adyacentes a los macizos ígneo-metamórficos.

Contacto entre las unidades litológicas

6.3 Incongruencias litológicas

Una vez explicadas las distintas formaciones que existen en la parte suroriental de Falcón, se presenta una tabla 6.1 con las incongruencias obtenidas de la cartografía litológica de la zona de estudio, entre los mapas geológicos empleados en este trabajo (mapa CREOLE PETROLEUM CORPORATION, 1962 y mapa de H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G., 1967).y en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela (1956. 1970, 1997). Además, se señalan como fueron resueltas dichas discrepancias:

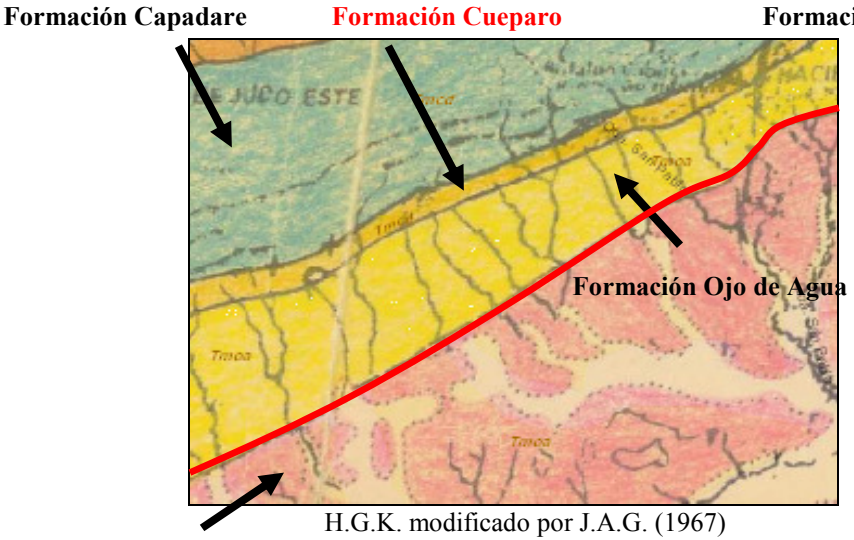
Tabla 6.1 Incongruencias litológicas en la zona de estudio

Nº	Autor (es)	Ubicación	Incongruencias
1	Mapa CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y mapa de H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G. (1967).	Cerro Sanare - Buena Vista, al este de la zona y en la parte surcental y suroeste.	Aparece cartografiada la Formación Cueparo (no documentada en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela).
2	Mapa CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y mapa de H.G.K. MODIFICADO POR J.A.G. (1967).	Cerro Riecito, al suroeste del sector Araurima.	Aparece cartografiada la Formación Riecito (informal, LEV, 1997).
3	Mapa CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y mapa de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967).	En el margen norte del río Tocuyo, entre los poblados Yaracal y Buenos Aires (parte norcentral de la zona).	Aparece cartografiada la Formación Guaidima (no reconocida en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela).
4	Mapa CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962).	Al oeste de la zona (en el cerro Riecito).	Cartografían la Formación Bachacal (invalidada en Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970).
	Mapa de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967).	En la parte más norcentral y al oeste de la zona (en el cerro Riecito).	Cartografían la Formación Bachacal (invalidada en Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1970).

De acuerdo a la integración de los datos obtenidos en campo, la interpretación de las imágenes satelitales, aunado con la información bibliográfica, se obtienen los siguientes resultados:

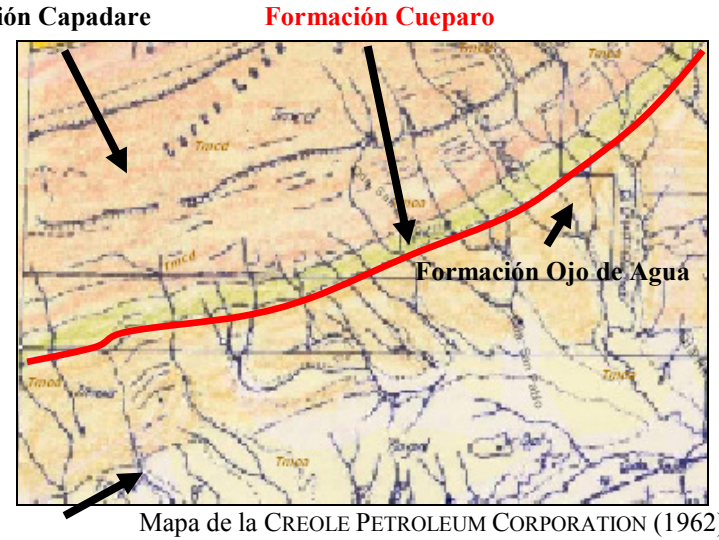
- En los mapas de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967) aparecen cartografiadas la Formación Cueparo (no reconocida en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela) y la Formación Riecito (informal, LEV, 1997), de acuerdo con las características litológicas observadas en campo estas unidades corresponden con la Formación Capadare (Figs. 6.42a, 6.42b, 6.42c).
- En los mapas de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967) aparece cartografiada la Formación Guaidima (no reconocida en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997), de acuerdo con las características litológicas observadas en campo esta unidad corresponde con la Formación Ojo de Agua (Figs. 6.42a, 6.42b, 6.42c).
- La Formación Riecito (informal), referida en los mapas geológicos CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967), corresponde con las calizas fosfáticas de la Formación Capadare (Figs.6.43a; 6.43b; 6.43c).
- La Formacion Bachacal invalidada en el Lexico Estratigráfico de Venezuela de 1970, referida en los mapas geológicos CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962) y de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967), fue establecida como Formación Casupal para el año 1970 (Figs.6.43a; 6.43b; 6.43c).

Debido a la existencia de diferentes contactos propuestos por los autores consultados (CREOLE PETROLEUN CORPORATION, 1962 y H.G.K MODIFICADO POR J.A.G, 1967), se realizaron una serie de comparaciones para determinar si existe concordancia en algunos resultados y los límites entre las formaciones, bajo las respuestas de las imágenes satelitales, obteniendo mayor analogía con el mapa Creole Petroleum Corporation (1967).



H.G.K. modificado por J.A.G. (1967)

Figura 6.42a



Mapa de la CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962)

Figura 6.42b

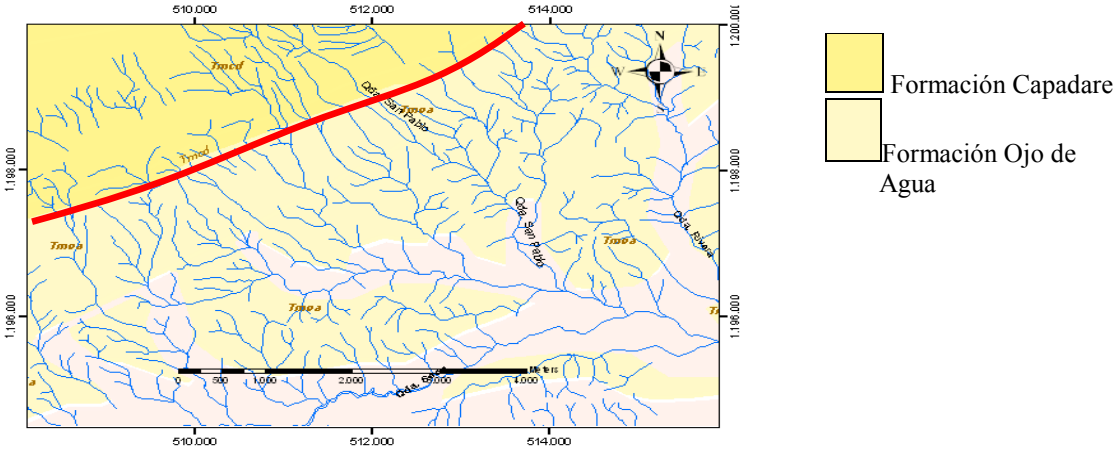


Figura 6.42c

Figuras 6.42a y 6.42b Representación de las formaciones Cueparo y Guaidima cartografiadas en los mapas geológicos consultados. Figura 6.42c Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observa finalmente las equivalencias litológicas de las formaciones Cueparo y Guaidima

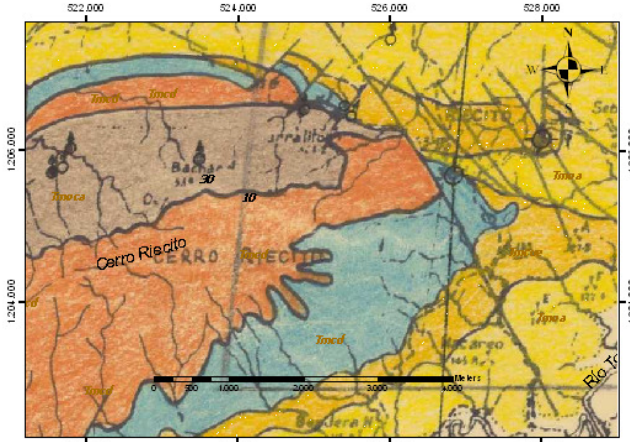


Figura 6.43a Tomado de H.G.K. modificado por J.A.G. (1967)

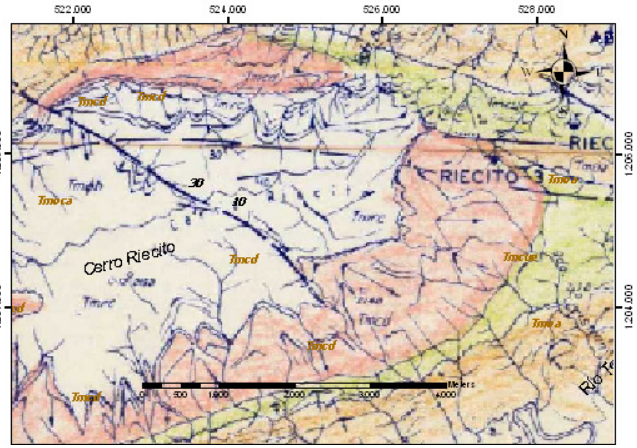
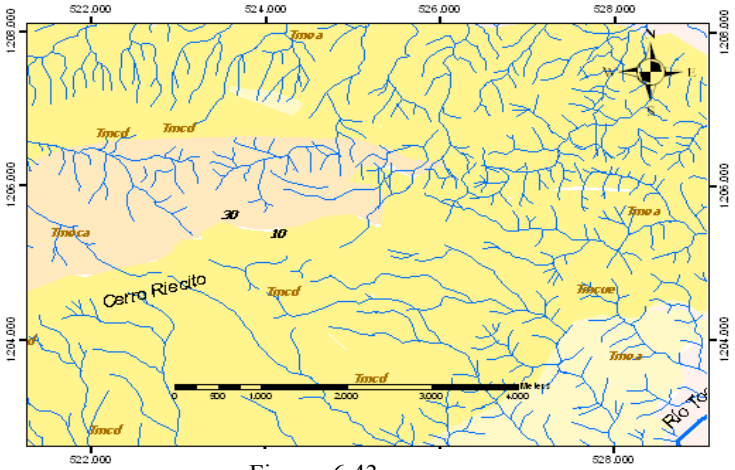


Figura 6.43b TOMADO DE CREOLE PETROLEUM CORPORATION (1962)



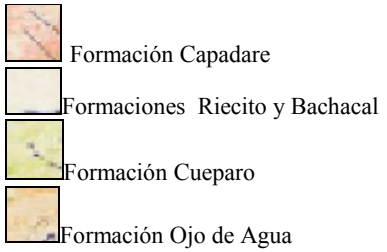
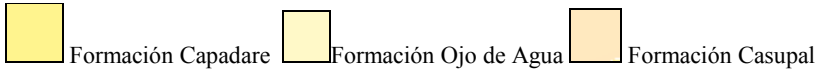


Figura 6.43c



Figuras 6.43a y 6.43b Representación de las formaciones Cueparo, Riecito, Bachacal, Capadare y Ojo de Agua cartografiadas en los mapas geológicos consultados. Figura 6.43c Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observa finalmente las equivalencias litológicas de las formaciones Cueparo, Riecito y Bachacal

6.4 Descripción de rasgos estructurales

Como se sabe, la cuenca de Falcón es de alta complejidad estratigráfica y estructural (descrita en el Capítulo III). En la zona de Falcón oriental, se evidencian claramente las consecuencias de la actividad tectónica, donde se registran estructuras compresionales en la costa, que suelen ser de poco interés. Pero, la zona se ve influenciada directamente por las estructuras de mayor relevancia en el ámbito regional, dichas estructuras (fallas y pliegues) forman parte del Anticlinorio de Falcón.

Es notoria la distribución de litologías competentes y no competentes en el área de estudio y zonas aledañas, que dan los bajos y altos topográficos observados en campo y en las imágenes de radar, por ejemplo, de acuerdo con LA CRUZ (2000), el bloque Sanare - Buena Vista / Chichiriviche, está conformado por los horsts correspondientes a los dos cerros y un graben delimitado por dos fallas de dirección sureste-noroeste. Probablemente dichos cerros constituían una faja orientada este-oeste y debido a una compresión noreste-suroeste (asociada al tectonismo de la Placa Caribe), fue fallada, produciéndose el movimiento relativo en la componente vertical de los bloques (Fig. 6.44).

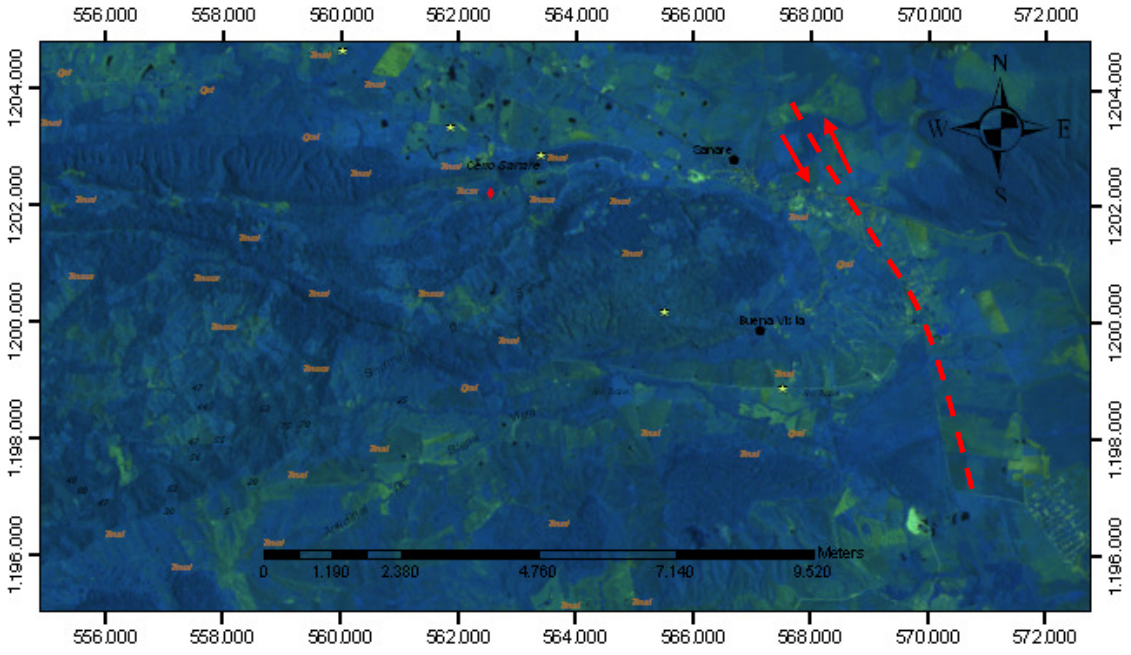


Figura 6.44 Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa una falla en dirección sureste-noroeste de 6 Km aproximadamente. Sector Sanare-Buena Vista.

Falla

6.4.1 Estructuras principales

La zona de estudio está caracterizada por la presencia de pliegues y fallas, éstas últimas con desplazamientos inversos muy locales, como respuesta a los esfuerzos compresionales a que fue sometida la región de Falcón durante el período orogenético post-Mioceno.

A continuación se describen las estructuras geológicas características en orden jerárquico, recopiladas de los mapas geológicos y de la interpretación de las imágenes satelitales.

6.4.1.1. Pliegues

Representan las estructuras más resaltantes, son característicos los plegamientos apretados hacia el margen norte del río Tocuyo (Fig. 6.45) y plegamientos más suaves hacia el sur de la zona (Fig. 6.46).

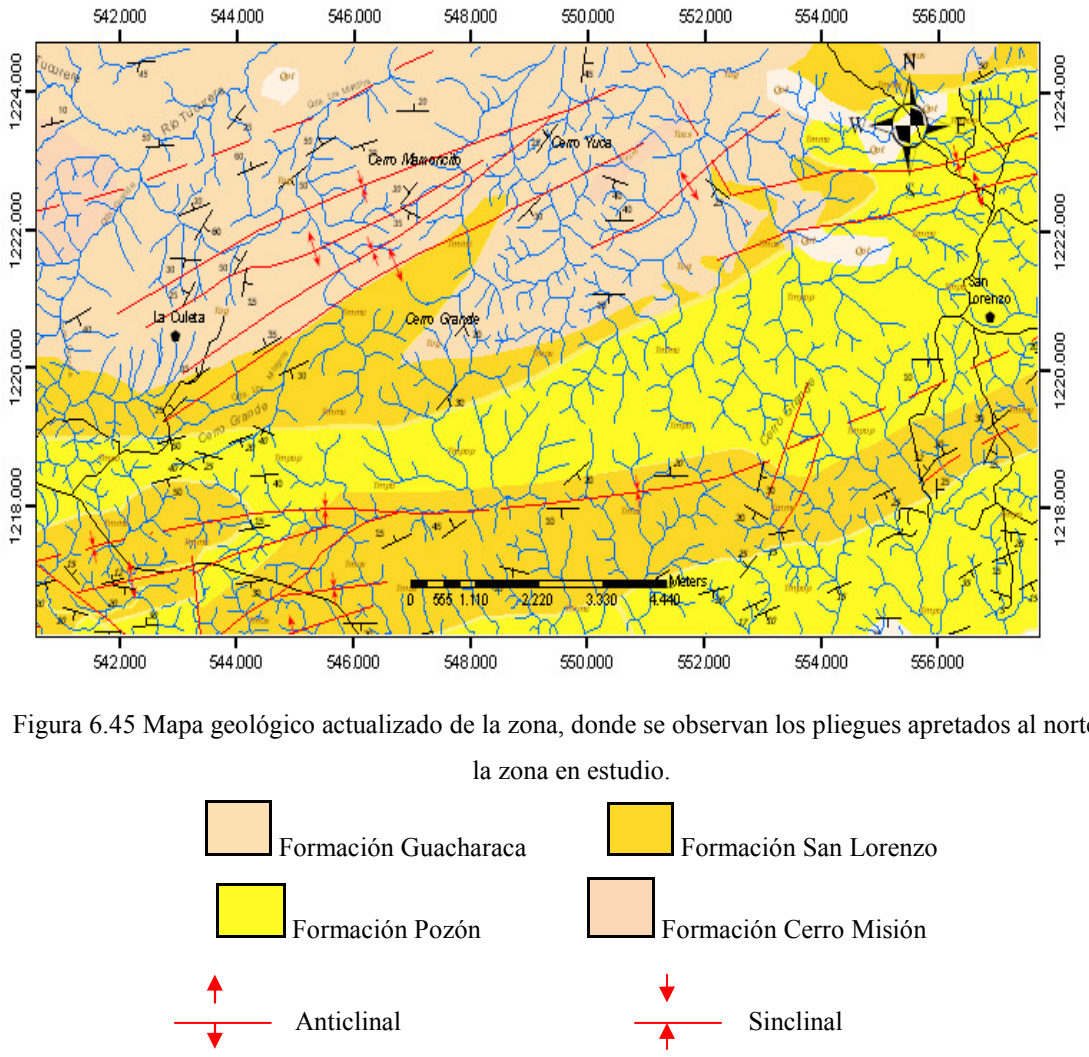


Figura 6.45 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observan los pliegues apretados al norte de la zona en estudio.

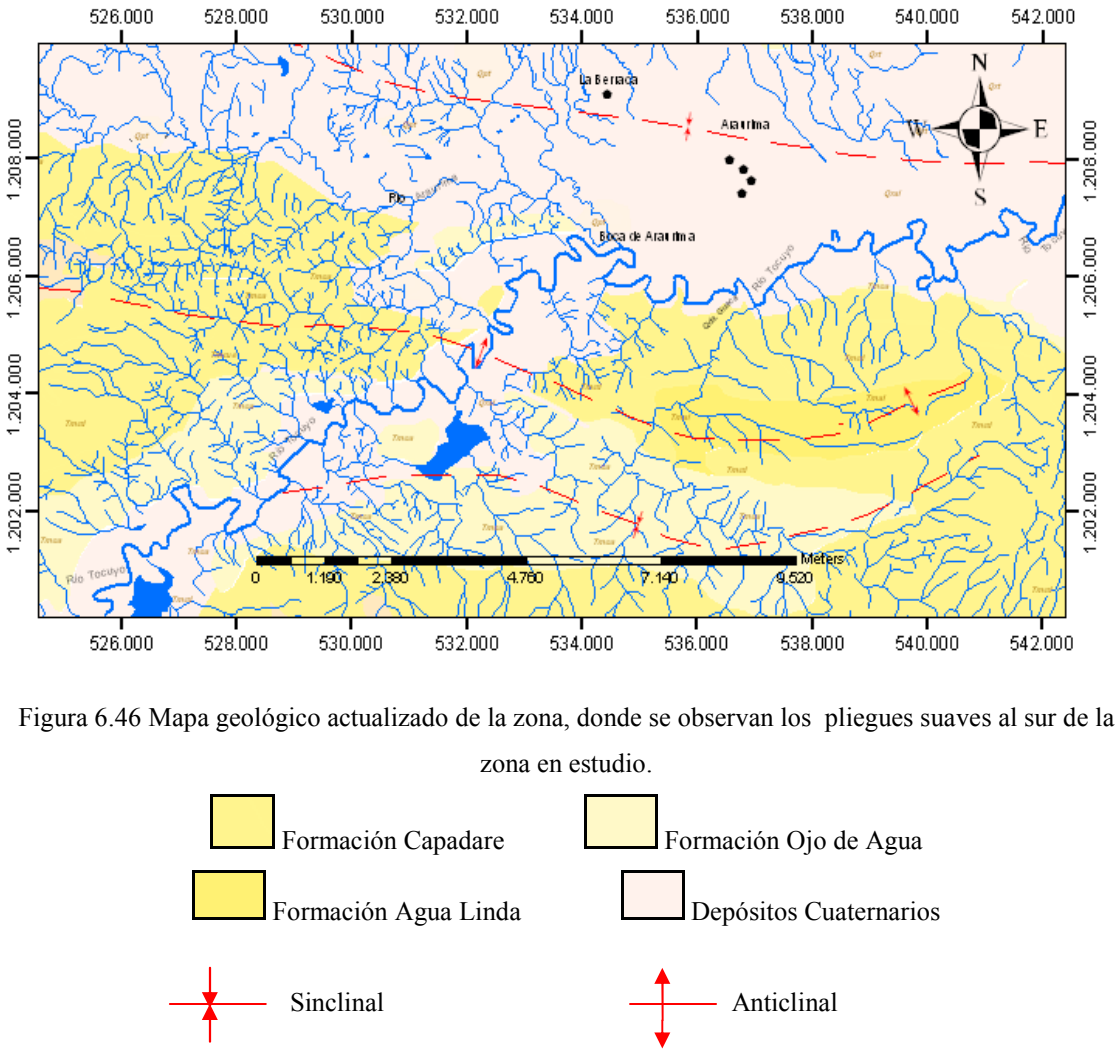


Figura 6.46 Mapa geológico actualizado de la zona, donde se observan los pliegues suaves al sur de la zona en estudio.

Los anticlinales son levemente asimétricos, presenta un perfil de laderas más abruptas hacia el norte, están relacionados con las elevaciones medias de la unidad I (filas elongadas, colinas incipientes, mesetas degradadas disectadas) y con las lomas bajas alargadas de la unidad II descritas en capítulo V (Fig. 6.47); definidos por las litologías más competentes (formaciones Capadare y Casupal) y litologías medianamente competentes (formaciones Agua Linda y Ojo de Agua). Los ejes de estos anticlinales tienen una dirección general suroeste-noreste variando desde N50ºE hasta N80ºE, también se identificaron anticlinales con una dirección oeste-este y N75ºO, siendo subparalelos entre ellos y exponiendo la columna sedimentaria del Mioceno. La parte central de la zona está representada principalmente por el anticlinal de Buena Vista y el sinclinal de Sanare, ambos con dirección suroeste-noreste (Fig. 6.48).

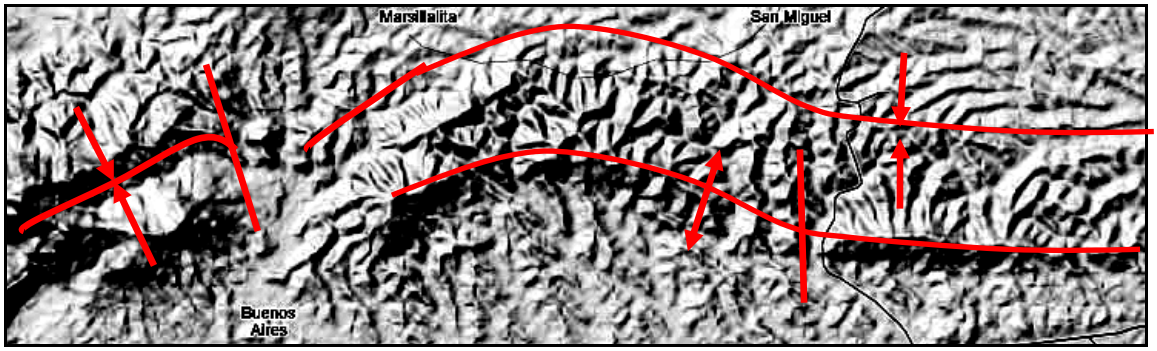


Figura 6.47 Imagen de radar, representada por las lomas bajas alargadas de la unidad topográfica II, al norte de la zona, donde se observa la correspondencia de los bajos y altos topográficos con los sinclinales y anticlinales, respectivamente.

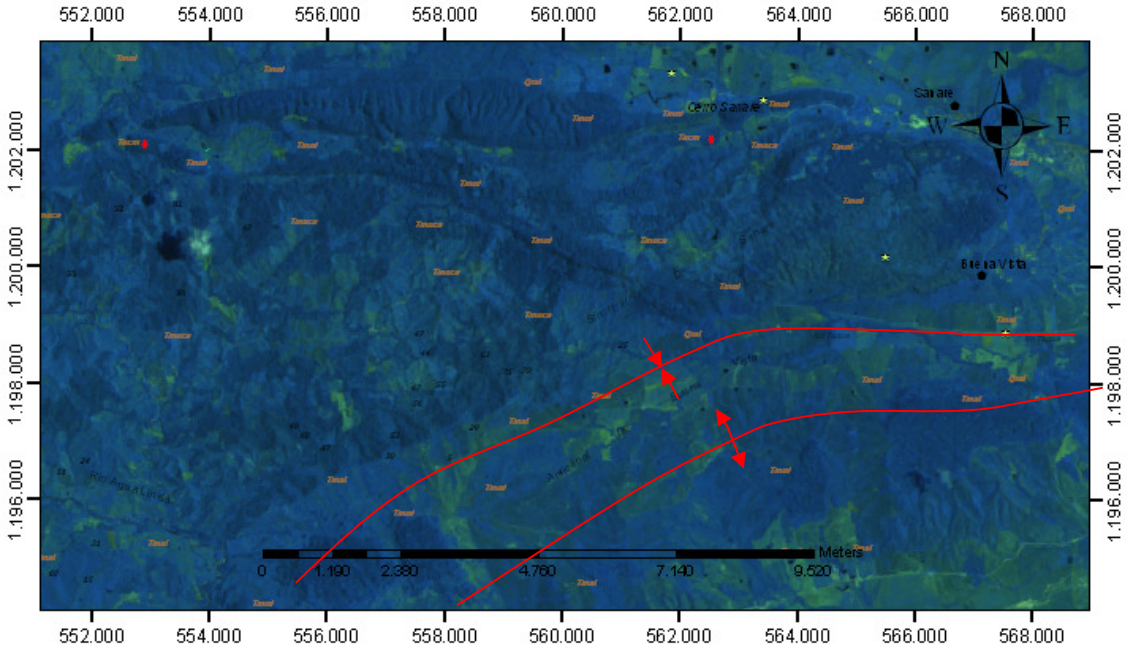


Figura 6.48 Imagen Satelital *Landsat* 7 ETM, bandas (R70, G 40, B50), donde se observa el Anticlinal de Buena Vista y el sinclinal de Sanare. Sector Sanare-Buena Vista.

Anticlinal

Sinclinal

Los sinclinales son suaves con variaciones en la pendiente de los flancos, los ejes son paralelos entre sí y presentan la misma orientación de los anticlinales. Están representados por la unidad de elevaciones bajas, principalmente por el tipo III de planicie aluvial descrito

en el capítulo V. Aunque, ocasionalmente hacia el noreste de la zona existen discrepancias ya que se observan tanto sinclinales como anticlinales en una misma unidad litológica, no mostrando correspondencia entre la litología y la topografía (Fig.6.49).

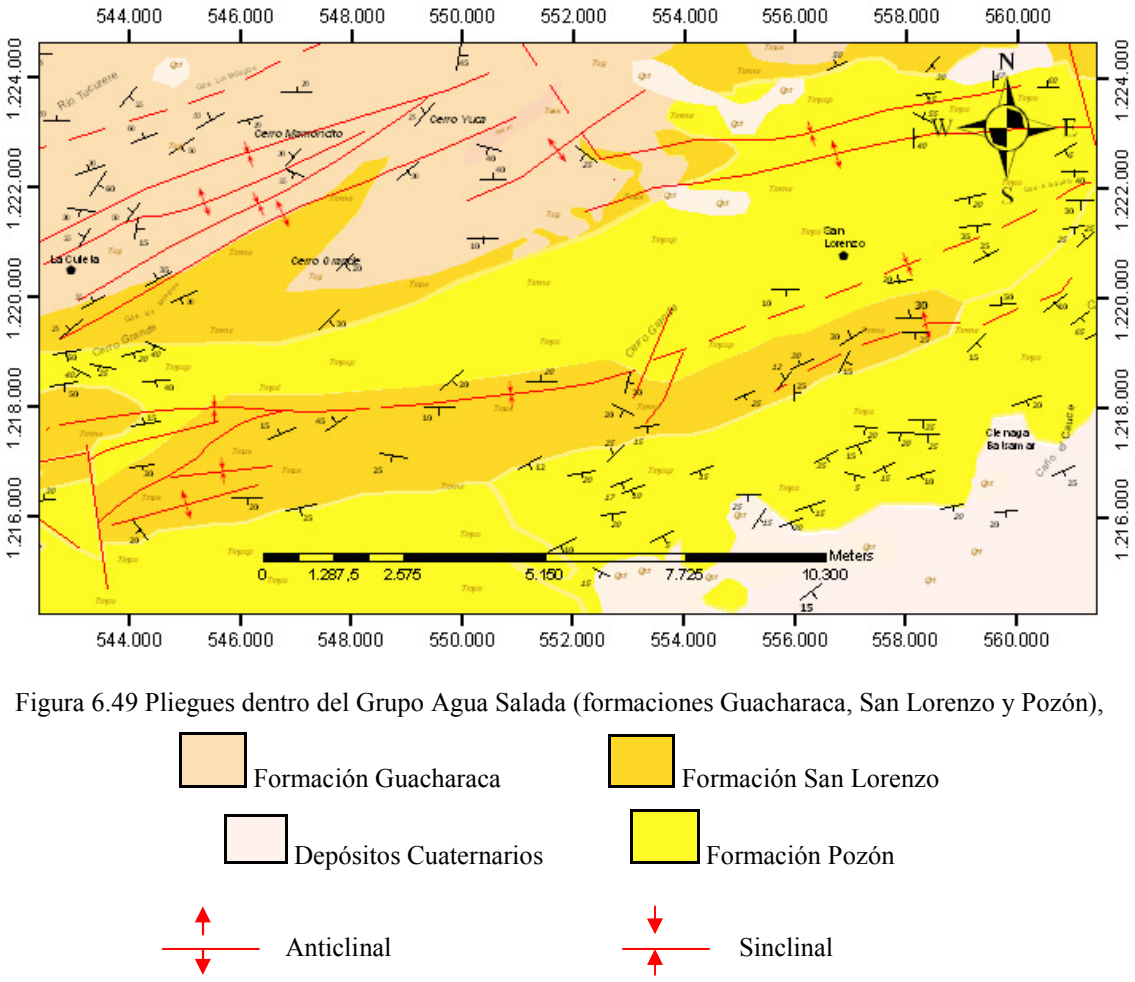


Figura 6.49 Pliegues dentro del Grupo Agua Salada (formaciones Guacharaca, San Lorenzo y Pozón),

6.4.1.2. Fallas

Las fallas se observan principalmente en el extremo norte de la zona con una orientación aproximada en dirección sureste-noroeste, con extensiones que no superan los 8 Km. Observando la dirección en que se desplazan los ejes de los pliegues se considera que la componente horizontal de las fallas es sinestral (Fig.6.50a, 6.50b).

La parte sur de la zona de estudio, se encuentra afectada estructuralmente por un anticlinal y un sinclinal con dirección aproximada este-oeste, un sistema de fallas con

orientación aproximada N18°O y un segundo sistema de fallas con orientación aproximada de N-S; las cuales corresponden con el patrón estructural regional.

En el margen sur del río Tocuyo, al norte de la zona donde afloran las rocas ígneo-metamórficas (cerros Salsipuedes, San Quintín, La Zurda y Tarana), se presenta una zona de fallas, que se extiende hacia el oeste, a lo largo del valle del río Tocuyo. Estas rocas ígneo-metamórficas aflorantes al sur de la zona de estudio y estudiadas por LOZANO & MUSSARI (2007), pertenecen al complejo orográfico de la región norte costera del país, formado por una superposición de napas (Figs. 6.51; 6.52).

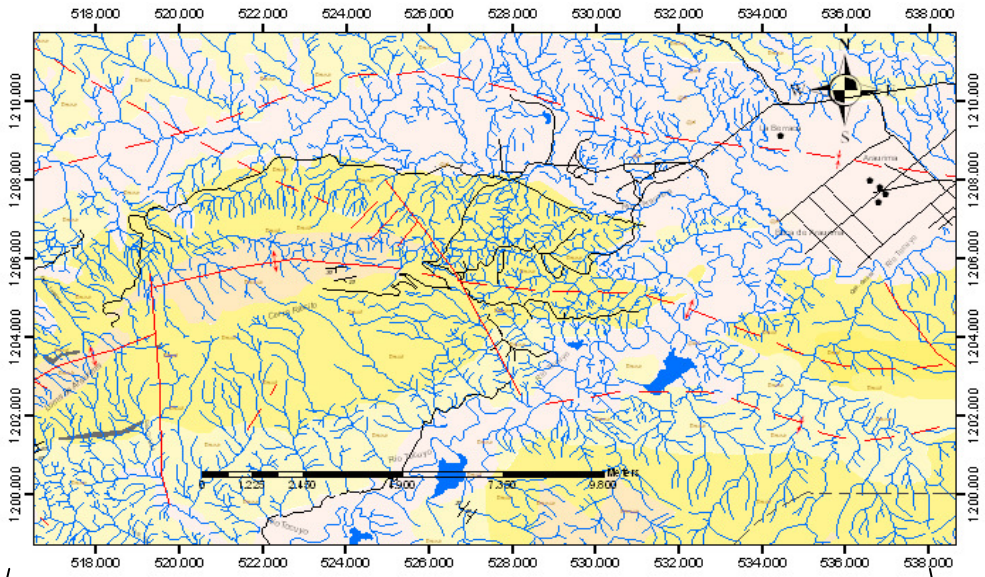


Figura 6.50a

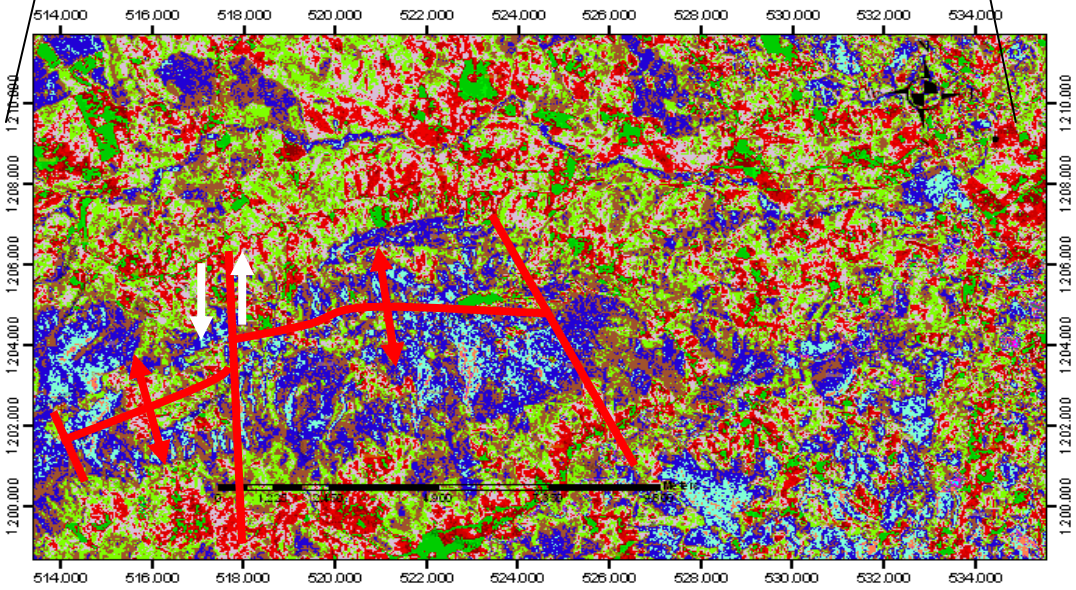
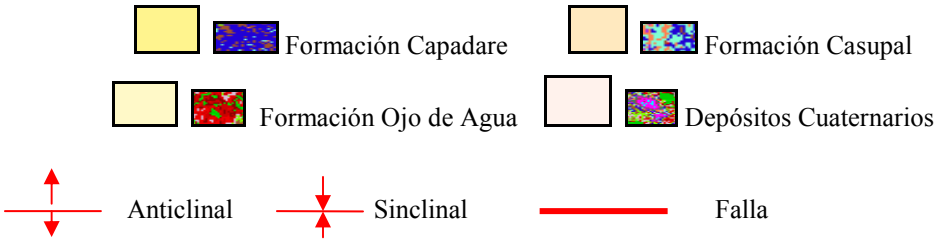


Figura 6.50b

Figura 6.50a Mapa geológico actualizado de la zona. Fig. 6.50b Imagen satelital con clasificación no supervisada, bandas (R10, G20, B30), donde se observa el cerro Riecito afectado por un sistema de fallas en dirección noroeste, la componente horizontal de las fallas es sinestral, con una extensión de 6 Km. aproximadamente.



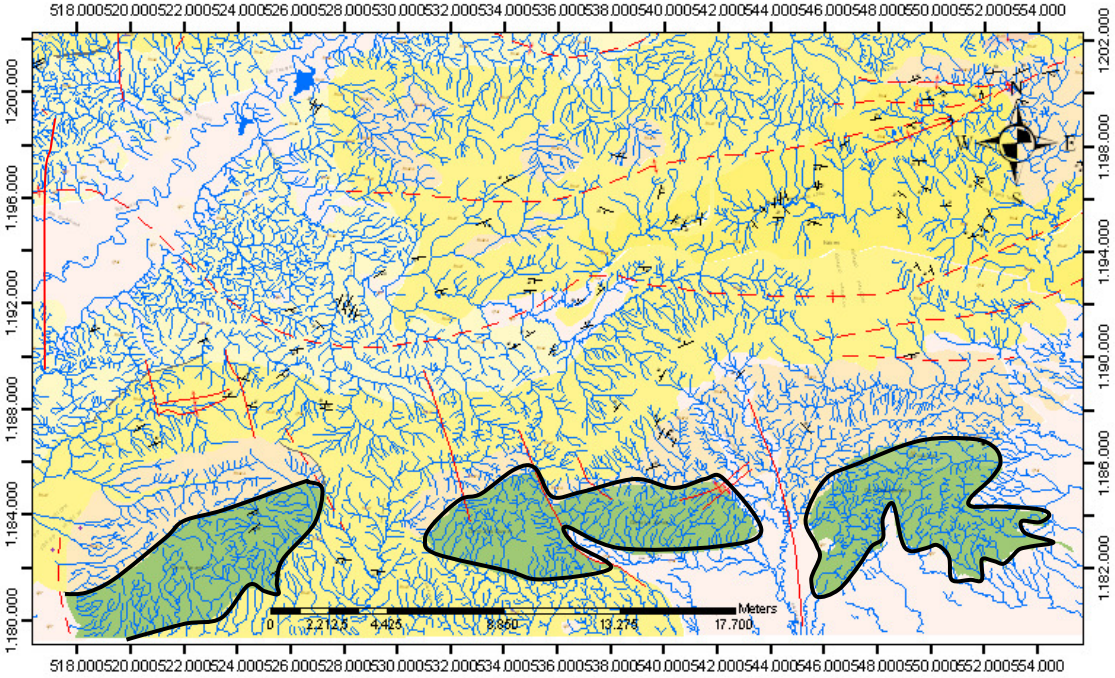


Figura.6.51. Mapa geológico actualizado de la zona en estudio, donde se observa la disposición de los cerros ígneos metamórficos, afectados por un sistema de fallas con dirección N18ºO.

Formación Capadare

Formación Casupal

Formación Ojo de Agua

Depósitos Cuaternarios

Rocas ígneo-metamórficas

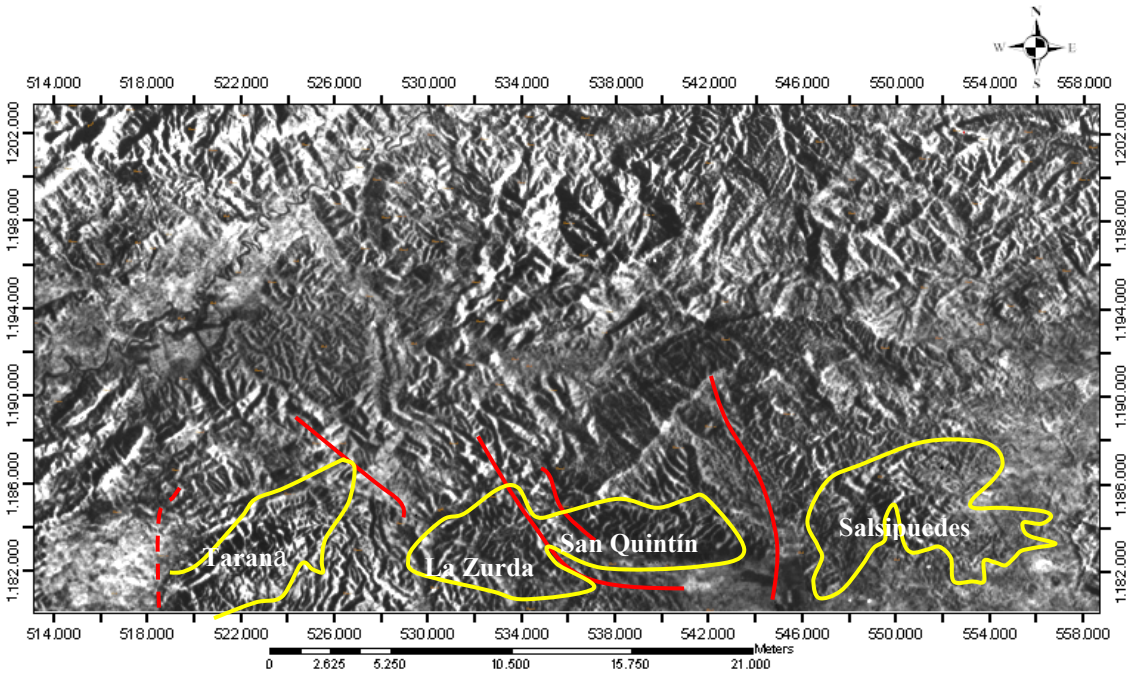


Figura 6.52 Imagen de radar, donde se observa el fallamiento de los macizos ígneos- metamórficos, al sur de la zona en estudio.

Fallas Contacto de los macizos

Tratando de relacionar el campo de esfuerzos con las estructuras observadas, se tiene que la dirección de los pliegues en general es SO-NE y O-E y están afectados por fallas con dirección sureste-noroeste, indicando que el esfuerzo principal de deformación en el área de estudio tiene una dirección NO-SE, tal como lo explica OSTOS (1990) como producto de la interacción entre la placa Caribe y la placa Suramericana.

Al observar los resultados obtenidos, se puede señalar que la zona de estudio está compuesta principalmente por un conjunto de fallas con movimiento sinestral y pliegues levemente asimétricos cartografiados en los mapas geológicos empleados y evidenciados, en su mayoría, en la imagen de radar y satelital mediante las distintas combinaciones de bandas realizadas.

Luego de realizar las comparaciones entre las distintas herramientas utilizadas en este estudio, se puede indicar que la interpretación de la radargrafía es de más precisión para la identificación de pliegues, ya que en la imagen las nubes pueden significar un aspecto engorroso en dicha interpretación y en cambio la radargrafía está libre de ese detalle que es muy importante.

CAPITULO VII

SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Sumario y Conclusiones

- La zona de estudio y zonas aledañas al área, se pueden subdividir fisiográficamente en dos conjuntos topográficos distintos: sierras y grabens. La sierra ubicada al norte de la cuenca del río Tocuyo, la parte oriental de la serranía de Agua Fría, definida por los cerros ígneo-metamórficos y sedimentarios (entre las cuencas del río Tocuyo y del río Aroa), la sierra de Aroa ubicada al suroeste de estos macizos ígneo-metamórficos, el graben del Tocuyo ubicado en la parte central de la zona, el graben de Aroa ubicado al sur del área de estudio.
- Desde el punto de vista topográfico, la zona está caracterizada por dos unidades bien diferenciadas. Una primera unidad de elevaciones medias, donde se aprecian filas elongadas con crestas pseudoparalelas y de carácter ligeramente sinuoso, colinas con disectación incipiente y mesetas degradadas disectadas, todas ellas correspondientes con las litologías más competentes. Estas formas poseen una orientación general este-oeste, con asimetría en sus pendientes y se alternan con patrones de valles encajados, que están adaptados a la topografía. La segunda unidad de elevaciones bajas corresponde con litologías menos competentes, está representada por lomas alargadas, colinas lobulares e irregulares y una extensa planicie aluvial generada principalmente por los valles de los ríos Tocuyo y Aroa.
- Los pliegues representan las estructuras más resaltantes de la zona, con mayor cantidad de plegamientos apretados hacia el margen norte del río Tocuyo y plegamientos más suaves hacia el sur del área Los anticlinales corresponden principalmente con las unidades de elevaciones medias y con las litologías más competentes aflorantes en la zona. Mientras que los sinclinales están representados por la unidad de elevaciones bajas y litologías menos competentes.
- Los ejes de los anticlinales tienen una dirección general suroeste-noreste variando desde N50ºE hasta N80ºE, también se identificaron anticlinales con una dirección oeste-este y N75ºO, afectados por fallas con orientación N18°O y otras con orientación aproximada N-S, por lo que se infiere que el esfuerzo principal de deformación en la zona de estudio tiene

dirección noroeste al sureste, confirmando la dirección de esfuerzos propuesta por OSTOS (1990), quien indicó que el esfuerzo principal de deformación en la zona tiene dirección NO al SE, debido a la interacción entre la placa Caribe y la placa Suramericana.

- Las fallas poseen una orientación aproximada N-S, con extensiones que no superan los 8 Km. Debido a la dirección en que se desplazan los ejes de los pliegues se considera que la componente horizontal de las fallas es sinestral.
- La utilización de imágenes satelitales es una herramienta a nuestra disposición que ayuda a realizar estudios geológicos de una forma eficiente y más económica al mostrar localidades de interés para resolver problemas estratigráficos y/o estructurales. De otra manera, estas localidades pueden pasar desapercibidas para el geólogo, o requerir de una mayor inversión de horas en trabajo de campo.
- Las combinaciones de bandas realizadas en las distintas correcciones obtenidas y la información bibliográfica recopilada, fueron de gran importancia para la interpretación geológica de la zona, especialmente para el análisis hidrológico, topográfico, litológico y estructural. Adicionalmente a esto, la clasificación supervisada y no supervisada realizada a las imágenes satelitales, proporcionó un apoyo para corroborar la correspondencia entre las formas topográficas y las unidades litológicas.
- Las imágenes satelitales arrojaron distintos resultados en la zona de estudio, donde influyó la composición litológica de las unidades. Siendo las formaciones Casupal y Capadare las unidades más competentes y distintivas (por la concentración de pixeles y uniformidad de color). A diferencia de las litologías menos competentes (Formación Agua Linda) y poco competentes (Formación Cerro Misión, Grupo Agua Salada), que no proporcionaron información alguna para delimitar sus contactos formacionales.
- Las formaciones Capadare y Ojo de Agua representan dos unidades cuyas características litológicas son diferenciables fácilmente con el uso de las imágenes satelitales con clasificación no supervisada debido a la uniformidad del color y persistencia del color, respectivamente.
- Los mapas geológicos Creole Petroleum Corporation (1962) y H.G.K. modificado por J.A.G. (1967) presentaron discrepancias con las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela en la documentación de formaciones, los cuales demostraron los siguientes resultados:

- De acuerdo con las características litológicas observadas en campo, la Formación Cueparo (no existente en ninguna de las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela) referida en los mapas geológicos, corresponde con la Formación Capadare.
- La Formación Riecito (informal), referidas en los mapas geológicos, corresponde con las calizas fosfáticas de la Formación Capadare**.**
- De acuerdo con las características litológicas observadas en campo, la Formación Guaidima (no reconocida en las ediciones del Léxico Estratigráfico de Venezuela) referida en los mapas geológicos, corresponde a las Arenas de Guaidima. Este nombre informal fue empleado por MENCHER *et al*. (1951) para designar la Formación Ojo de Agua.
- La Formación Bachacal invalidada en el Léxico Estratigráfico de Venezuela del año 1970, referidas en los mapas geológicos, fue establecida como la Formación Casupal para este mismo año.

7.2. Recomendaciones

Luego de haber expuesto las conclusiones, se esbozan las siguientes recomendaciones:

- Los mapas geológicos deben actualizarse regularmente con la finalidad de obtener una visión clara y objetiva de la geología de cada zona y así evitar la dispersión de información.
- Las imágenes satelitales aunque representan una importante herramienta para estudios geológicos, debe estar acompañada y apoyada de referencias bibliográficas, y de un trabajo de campo, para así obtener una buena actualización de la cartografía geológica, debido a que estas imágenes presentan detalles como nubes, que dificultan la visualización de algunos puntos de la zona.
- Las correcciones realizadas a las imágenes satelitales deben ser llevadas de manera consecutiva según la metodología utilizada, para que el estudio de la imagen sea lo más satisfactorio posible.
- La información cartográfica para la actualización de un mapa geológico deben siempre estar a una escala igual o menor, para que el resultado sea un mapa con un detalle mayor y mejor distribuido.
- Realizar un estudio bioestratigráfico en el domo la Esperanza ya que en los mapas geológicos empleados en este trabajo se encuentra cartografiada la Formación Cerro

Misión, pero no aflora en esta localidad, por lo que se necesita de un equipo de trabajo para poder realizar perforaciones y corroborar si existe o no dicha unidad.

- Para futuros trabajos se recomienda actualizar las vías de acceso que aparecen en los mapas empleados ya que el área es muy boscosa y requiere de personas aledañas con conocimientos de la zona.
- Se requiere de un estudio estratigráfico del Grupo Agua Salada (formaciones Pozón, San Lorenzo y Guacharaca) debido a que las imágenes satelitales empleadas en este trabajo no ayudaron a distinguir entre una formación y otra; por lo que es necesario realizar estudios con la finalidad de observar características litológicas determinadas que permitan diferenciar en formaciones o por el contrario determinar si corresponden a la continuidad estratigráfica de Formación Agua Salada definida así al norte de la zona de estudio por DÍAZ DE GAMERO (1982), ya que las características litológicas de campo no le permitieron hacer ninguna diferenciación.

BIBLIOGRAFÍA

ALZATE, M. (2001) *Imágenes espaciales de la superficie terrestre*. Procesamiento digital, análisis y extracción de la información geomática. Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geofísica. Universidad Nacional de Colombia, 328 pp.

ATLAS ENVI. LA TELEDETECCIÓN MÁS SENCILLA. *Mapping Interactivo ENVI*, el Entorno para la Visualización de Imágenes es uno de los más avanzados paquetes de procesado de imágenes de muy fácil manejo para trabajar con datos. 76 + 456 p. en CD.

AUDEMARD, F. (1993) *Néotectonique, sismotectonique et aléa sismique du nor-ouest Du Vénézuéla (Systéme de failles d'Oca-Ancón)*.Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. Tesis presentada para la optar al título de Doctor, inédito. 369 p.

AUDEMARD, F. (1995) *"La cuenca de Falcón, Venezuela Noroccidental, síntesis estratigráfica génesis e inversión tectónica.*" Ponencia presentada en el IX Congreso Latinoamericano de Geología, Caracas, pág. 132-150.

AUDEMARD F., A. SINGER, C. BELTRAN & J. A. RODRIGUEZ. (1992) *Failles actives Quaternaires de la région du Falcón*. Abstracts of the 2nd scientific meeting, 55th anniversary of the School of Geology, Mines and Geophysics, Caracas. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central, p. 21

BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ G. (1967) *Guía de la excursión a la región de Duaca-Barquisimeto-Bobare.* Bol. Geol. (Caracas) 8(16): 289-309.

BELLIZZIA A. & D. RODRÍGUEZ G. (1976) *Geología del estado Yaracuy*. Mem. IV Congr. Geol. Venezolano, Caracas 1969. Bol. Geol. Public. Esp. 5(6): 3317-3417.

BELLIZZIA A. (1985). *Sistema montañoso del Caribe*. Una cordillera alóctona en la parte norte de América del Sur. *Mem. VI Congr. Geol. Venezolano*, Caracas, 10: 6657-6836.

BLOW, W. H., (1959). *Age correlation and biostratigraphy of the Upper Tocuyo (San Lorenzo) and Pozón formations, eastern Falcón*, Venezuela, Bull. Amer. Paleont., 39(178): 67-252.

BONILLA, F (1980). *Plan de Explotación del Yacimiento de dolomita Sanare-Tucacas. Falcón Sur-Oriental.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero en Minas, inédito, pág. 91-93.

BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. (1986) *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, 327 pp.

CAMACHO, A & MIJARES, M. (1989). *Estudio Geológico de la Zona de Sanare Buena Vista, sector Agua Linda, distrito Silva, estado Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 55-57.

CAMPBELL, J. G. (1981) *The used of Landsat MSS data for geological mapping*, en J.G. Campbell, Ed Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, London Remote Sensing Society, pp 143 - 162

CAMPOSANO L., URBANI F., VISCARRET P., FOURNIER H. & BARITTO I. (2003) *Rocas Volcánicas de la Zona de Sanare, Edo. Falcón*. GEOS 38. Caracas, Venezuela, pág. 15-16.

CHUVIECO E. (1995) Fundamentos de Teledetección Espacial. Rialp, S.A. Madrid 2da Edición. 450 p.

COPLANARH. (1974) *Regiones Centro Occidental y Occidental.* Coplanarh, Venezuela. Pub. 35. 415 pp.

COULMAN, R. (2001 - present) Numerous GIS White Papers.

http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap140/p140.

CREOLE PETROLEUN CORPORATION (1962). *Mapa de Geología de Superficie*, Hoja *C-6.* Escalas 1:50.000, 1:100.000.

DELGADO, J. (1997) *Caracterización de Sedimentos Recientes Comprendidos entre Chichiriviche y San Juan de los Cayos, estado Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 92-98.

DÍAZ DE GAMERO, M. L., (1970). *Contribución al estudio de los foraminíferos de la Formación Punta Gavilán, Estado Falcón*, Asoc. Venez. Geol., Min. y Petrol., Bol. Inf., 13(2): 47-94.

DIAZ DE GAMERO, M.L. (1982) *Estratigrafía y Micropaleontología de la parte norte de la Subcuenca de Agua Salada, Falcón Oriental*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo de Ascenso de la categoría de Profesor Asociado a Profesor Titular. 226pp.

DIAZ DE GAMERO, M.L. (1985). *Estratigrafía Paleontología y Sedimentación*. VI Congreso Geológico Venezolano, Memoria Tomo I. Caracas, Venezuela. 1: 454-502.

DÍAZ DE GAMERO, M. L.; G. GIFFUNI Y M. CASTRO MORA, 1997. *Las formaciones Caujarao y Turupía al este de Cumarebo, Falcón nororiental*, Sociedad Venezolana de Geólogos, Bol., 22(1).

DÍAZ DE GAMERO, M.L. (1997) *Tabla de correlación de la Cuenca de Falcón*. Código Geológico de Venezuela. http:/www.pdvsa.com/lexico/correlac/falcon1.jpg. Consulta 25 de Abril de 2009.

DUNHAM R. J. (1962). *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*. *En* HAM W. E. Edr. Classification of carbonate rocks. Memoir of the American Association of Petroleum Geologists. 1: 108-121.

ESPAILLAT,J & GUTIERREZ, M. (2008). *Actualización de la Cartografía Geológica de la zona noroccidental de la Sierra de Perija estado Zulia entre el rio Guasare y el rio Lajas mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 110-112.

ESPARIS, J & HERNÁNDEZ, G. (2005). *Integración y Actualización Geológica del área comprendida entre las poblaciones de Churuguara y Piedra Grande, estados Falcón y Lara.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 72-73.

FREILE, A. (1968) *Regiones Climáticas de Venezuela.* Bol. Geol. (Caracas), 10 (19): 3 – 158.

GHOSH, S., PESTMAN, P., MELÉNDEZ, L., LORENTE, M.A. & ZAMBRANO E. (1997). *Evolución Tectonoestratigráfica y Sistemas Petrolíferos de la Cuenca de Falcón, Venezuela noroccidental.* Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Soc. Venezolana de Geólogos, Tomo I, pág. 317-329.

GONZÁLEZ, E. (1979). Rocas volcánicas en Falcón suroriental, Venezuela. *Mem. IV. Congr. Latinoamericano de Geología, Trinidad y Tobago*, p. 459-461.

GONZÁLEZ, J., ITURRALDE, J., PICARD, J. (1980) *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*, Tomo I y II. Caracas, Venezuela. 405 páginas.

H.G.K. Modified by J.A.G. (1967). *Districts Acosta & Zamora State of Falcon, Geological Maps.* Escala 1:100.000.

HOLDRIDGE, L. (1982). Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José. Costa Rica. 342pp

HUNTER, V. F. (1972) *A middle Eocene Flysch From Eeast Falcón*, Venezuela, VI Conf. Geol. Del Caribe, Porlamar, estado Nueva Esparta, p. 126-130.

IGVSB. INSTITUTO GEOGRÁFICO VENEZOLANO SIMÓN BOLÍVAR. 2008. *Curso Introductorio a la Geomática.*Proyecciones Cartograficas.Caracas, pág. 5-12.

LA CRUZ. N. (2000) *Relaciones estratigráficas entre las secuencias sedimentarias aflorantes en los Cerros Chichiriviche y Sanare - Buena Vista del distrito Silva, estado Falcón.* Universidad de Oriente. Núcleo Bolívar, Escuela de Ciencias de la Tierra. Trabajo de Ascenso, pág. 72-74.

LAMUS, A. & LA CRUZ, N. (1986). *Estudio Geológico y de ubicación de depósitos de fosfatos al norte de Tucacas, distrito Silva, estado Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 54-59.

LAMUS, A., N. LA CRUZ Y W. SCHERER, (1989). *Estudio geológico y ubicación de depósitos de fosfatos al norte de Tucacas, Distrito Silva, Estado Falcón*. En: *Jornadas 50 Aniversario Escuela de Geología, Minas y Geofísica*, Caracas.

LIDDLE, R. A., (1946). *The Geology of Venezuela and Trinidad,* 2nd. Ed., Paleont. Res. Inst., Ithaca, N.Y., 890 p.

LONGLEY, P. (2005) *Geographic Information Systems and Science*. Chichester: Wiley. 2nd edition, 180pp.

LÓPEZ, I. (2005) *Integración y actualización geológico-cartográfica de una zona ubicada al noreste del estado Falcón entre los distritos Zamora, Acosta, Miranda y Colina.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 43-47.

LORENTE M. A (1978). *La Caliza de Capadare y sus relaciones con la cuenca de Agua Salada, Edo. Falcón*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 33-101.

LOZANO F. & MUSSARI A. (2007) *Geología de los Macizos Ígneo-Metamórficos del Norte de Yumare, Estados Yaracuy y Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 23-54.

MACELLARI, C. (1995) *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pullapart basin, Venezuela and Colombia.* In Tankard, A.J., Suárez, R. and Welsink H.J. (editors) Petroleum basins of South America, AAPG Memoir 62, pp. 757-780.

MAGUIRE, D.J. (1997) "Geographic Information Systems: principles, and applications" Longman Scientific and Technical, Harlow, pág. 62-78.

MENCHER, E.;H. J. FICHTER; H. H. RENZ; W. E. WALLIS; J. M. PATTERSON Y R. H. ROBIE, (1951). *Resumen geológico* cap. I., p. 1-80, en: Texto de las monografías presentadas en la Convención Nacional de Petróleo. Ofic. Técn. Hidrocarb. Min. Minas e Hidrocarburos, Caracas (en español e inglés).

MÉNDEZ, J. G. (1967) Definición de la Formación Agua Linda, Sección de referencia de la Formación Casupal y descripción litológica de algunas secciones de esta formación en la parte sur-oriental de la sub-cuenca de Falcón. *Soc. Ven. Geol. Min. y Petr.*, Bol. Inform., 10(4): 111-119.

MÉNDEZ, L. (2002). Curso de Geomática, Nivel Intermedio. Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar.

MENDOZA, V. (2005) *Geología de Venezuela, Tomo II. Rocas Sedimentarias*. Ciudad Bolívar, Venezuela. 67 páginas.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (1956) *Léxico Estratigráfico de Venezuela*. Dirección General Sectorial de Servigeomin, Dirección de Geología, Boletín de Geología, Publicación Especial No. 1, Tomos I y II, 728 pp.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (1970) *Léxico Estratigráfico de Venezuela*. Dirección General Sectorial de Servigeomin, Dirección de Geología, Boletín de Geología, Publicación Especial No. 4, Tomos I, 756 pp.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (1997) *Léxico Estratigráfico de Venezuela*. Dirección General Sectorial de Servigeomin, Dirección de Geología, Boletín de Geología, Publicación Especial No. 12, Tomos I y II, 827 pp.

MUESSIG, K. (1984) *Structure and Cenozoic Tectonics of the Falcon basin, Venezuela and adyacent areas* Bonini, W.E., Hangraves, R.B., Shagam, R. (editors) *The Caribbean-South American plate boundary and regional tectonics*, Geological Society of America, Memoir 162, pp. 217-230.

NATERA B. R. (1957a). *Geology of the lower rio Tocuyo basin*. Creole Petroleum Corp. Informe inédito no. 4330.11-42.

NICHOLS, G. (1999) *Sedimentology & Stratigraphy*. USA, 303p.

OSTOS M. (1990). Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basado en datos geoquímicos. *Geo*s (Caracas) (30): 1-294.

PENIN, J. & VILLARROE (2005). *Integración y Actualización Geológica del área de Jacura y Capadare, estado Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 43-47.

PICCOLI, L. & HARAL, S. (1991). *Ambientes carbonaticos modernos en las áreas de Cayo Sombrero-Punta Tucacas y Chichiriviche, estado Falcón.* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 39-56.

PINDELL, J. L. (1990). *Mesozoic – Cenozoic tectonic and stratigraphic development of the Eastern caribbean and northern south.* 38 p

PORRAS, L. (2000) *Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcón y Bonaire.* Ponencia Memorias VII del Simposio Bolivariano, exploración petrolera en las cuencas subandinas, Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas, pág. 279-292.

RENZ, H.H. (1948) *Stratigraphy and fauna of the Agua Salada, Group, state of Falcón*, *Venezuela*. G.S.A. Mem. 32, pág. 37-48.

RODRÍGUEZ. C. (2003) *Proyecto de Evaluación Geológica y Geotécnica de la zona Morón-Mirimire, estado Falcón*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 53-65.

RODRIGUEZ, S. (1977) *Dolomitización y Fosfatificación en el Mioceno de Falcón Suroriental.* V Congreso Geológico Venezolano, Memoria Tomo III. Caracas, Venezuela, pág. 1176-1198.

SENN, A., (1935). *Die Stratigraphische Verbreitung der Tertiaren Orbitoiden, mit spezieller Berücksichtigung ihres Vorkommens in Nord-Venezuela und Nord- Marocco.* Eclog. Geol. Helv. 28(1): 51-113 y 369-373.

SORIANO, C. & VALENZUELA, J. (2008). *Actualización de la geología a escala 1:100.000 de un sector de la Sierra de Perijá mediante la utilización de imágenes satelitales Landsat 7* ETM. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito, pág. 65-72

SUTER, H. H., (1947). *El Mene de Acosta field, Falcón, Venezuela*, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 31(12): 2193-2206.

THORNTHWAITE, C. (1949). *Sistema de Clasificación Climática*

http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_clim%C3%A1tica_de_Thornthwaite

WHEELER, C. B., (1960). *Estratigrafía del Oligoceno y Mioceno Inferior de Falcón Occidental y Nororiental.* III Cong. Geol. Venez., Tomo 1 Bol. Geol. Public Espc. (3): 407-465.

WHEELER, C. B. (1963) *Oligocene and Lower Miocene stratigraphy of western and northeastern Falcón Basin,* Venezuela. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 47(1): 35-68.

WIEDENMAYER C. (1924) *Zur Geologie von Ost-Falcon (Nordwest Venezuela)*. Eclog. Helv. 18(4):508-512.

Referencias Electronicas:

ARCVIEW GIS 9.2. Disponible en:
www.espectral_imagen/arc_gis

ENVI. *Software Empleado para el Procesamiento de Imágenes*. Disponible en:
www.envi_ser/esd_pol

ERDAS IMAGINE. Disponible en
www.geospatial.cl/.../procesamiento_imagenes)

ESRI. CHILE (2000). *Landsat 7 ETM+*. Disponible en:
www.landsat7etm.pdf

JORBA, O. *Resolucion Espacial* (2004).Disponible en:
www.resolucionespacial.pdf

MAPA EN RELIEVE DE VENEZUELA (*modelo digital de elevación*) (2009). Disponible en:
http://earth.google.es/

SATÉLITE LANDSAT 7 ETM. Disponible en:
www.lanero.net/.../Satelites-Cartografia.jpg.

UNESCO-RAPCA. SENSORES REMOTOS. (2002). *Introducción a los Sensores Remotos y Satélites*. Disponible en:
www.introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf).

ANEXOS

APENDICE I

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

i.1 Generalidades

A continuación se realiza la interpretación geológica de las imágenes mediante *Landsat* 7, en la parte oriental de Falcón al sur del Alto la Esperanza-Guacharaca.

i.1.1 Corrección atmosférica de banda

Metodología utilizada para la realización de corrección de bandas en imágenes satelitales, realizada en el *software* ENVI 4.2.

i.1.1.1 Calibración de la imagen en radiancia (realizada a cada una de las bandas)

El procedimiento que se siguió se describe a continuación:

Paso 1. Seleccionar *Basic Tools* en el menú principal del programa, luego hacer clic en *Preprocessing*--*Calibration Utilities*--*Landsat 7* ETM (Fig. i.1).

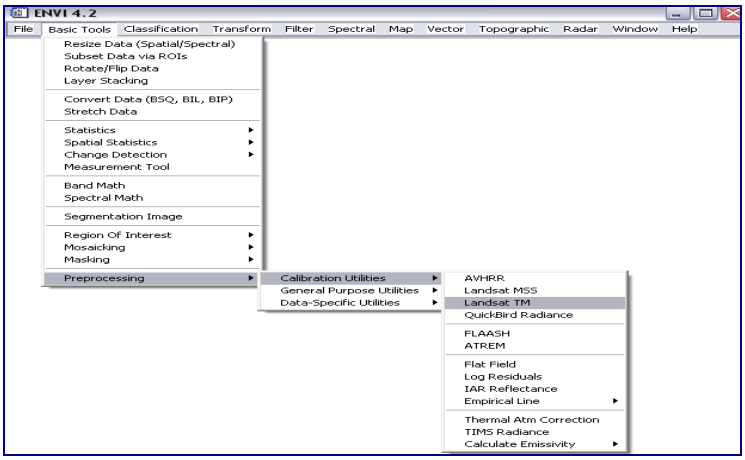


Figura i.1 Se despliega la ventana indicativa *Basic Tools*

Paso 2. En la ventana *Calibration Input File*, buscar la banda (**Open**), marcar *OK* para la calibración (Fig. i.2).

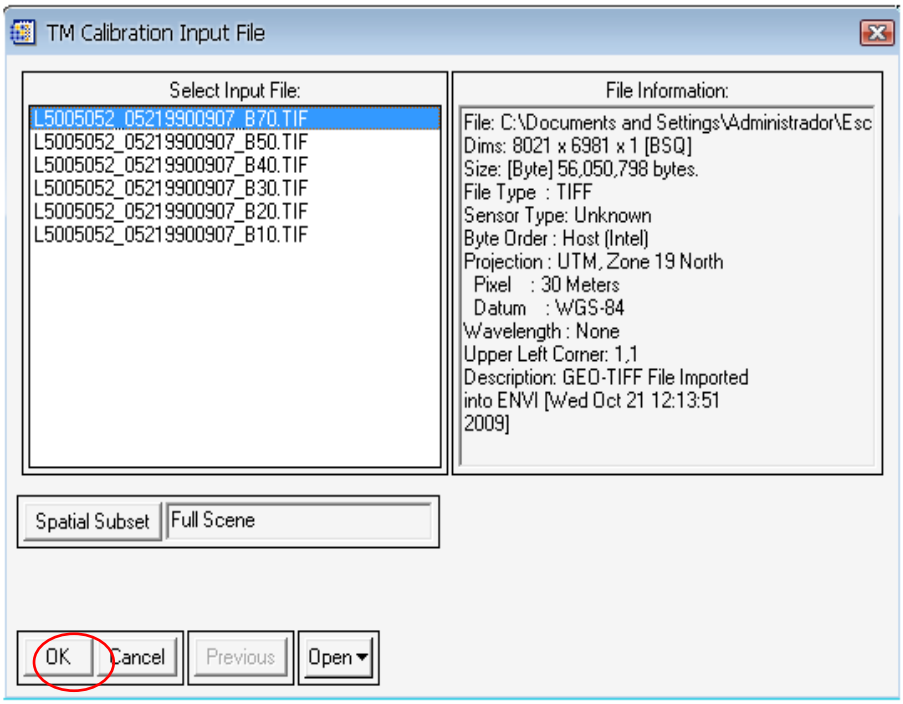


Figura i.2 Ventana indicativa de la calibración, se observa a la derecha los datos del archivo y las coordenadas.

Paso 3. Se reactiva una tabla que refleja los parámetros de calibración de cada banda (mes, día y año de adquisición, elevación del sol, escala mínima y máxima de la banda, el tipo de calibración), los cuales se encuentran en el archivo original Metadata**.** Seleccionar *Choose* e ingresar un archivo de salida para guardar la calibración de banda (Fig. i.3).

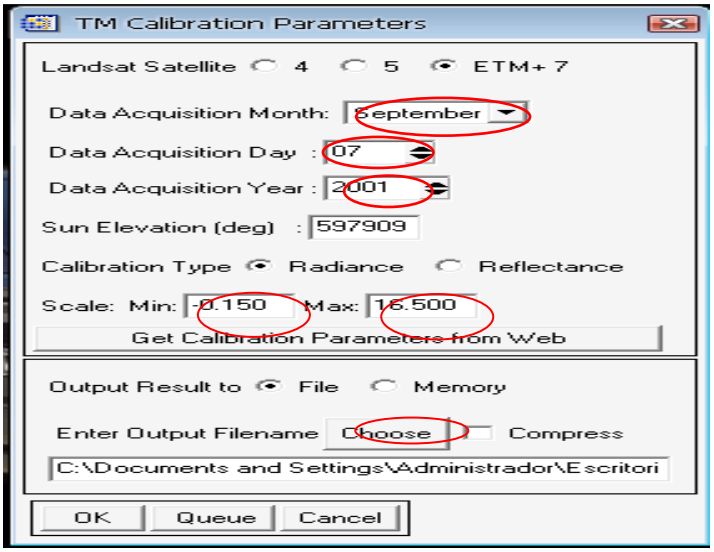


Figura i.3 Calibración de cada banda, donde se coloca todos los datos referentes a su adquisición.

Resultados (Bandas 10, 20, 30, 40, 50 y 70)

Para 1 Banda

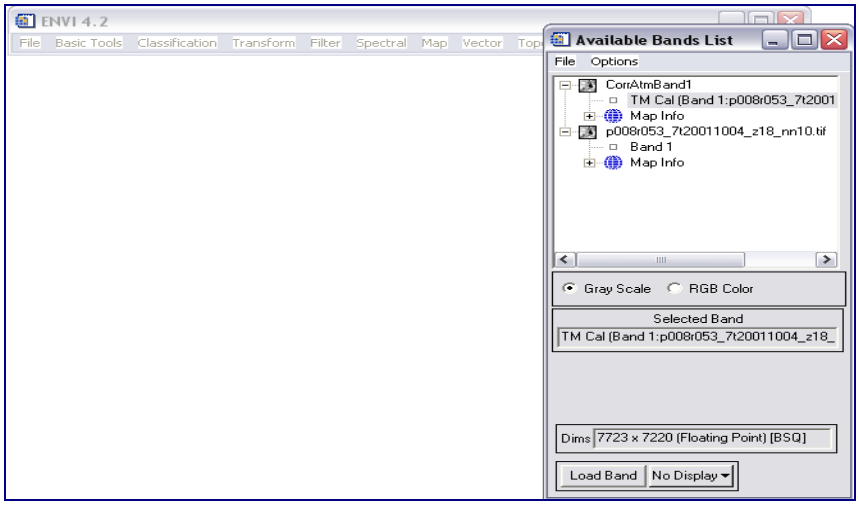


Figura i.4 Ventana donde se observa el resultado de la calibración.

Para Todas las Bandas (Fig. i.5).

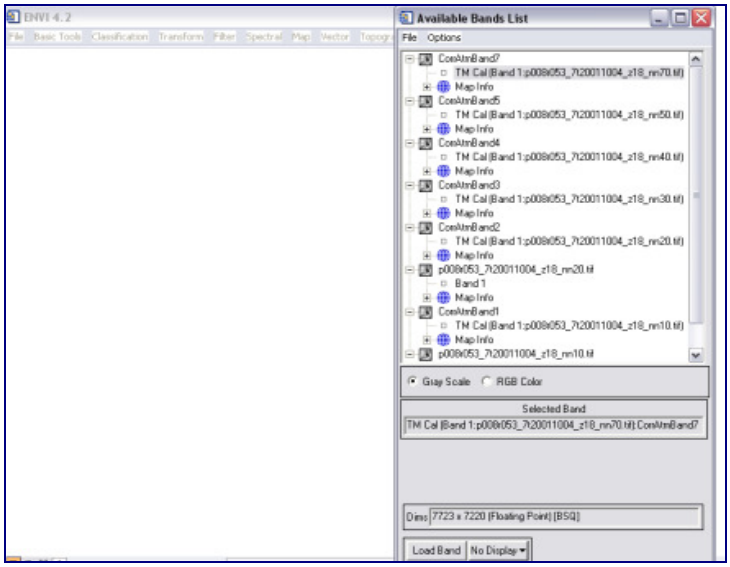


Figura i.5 Calibración de todas las bandas.

Resultado de Calibración de Bandas

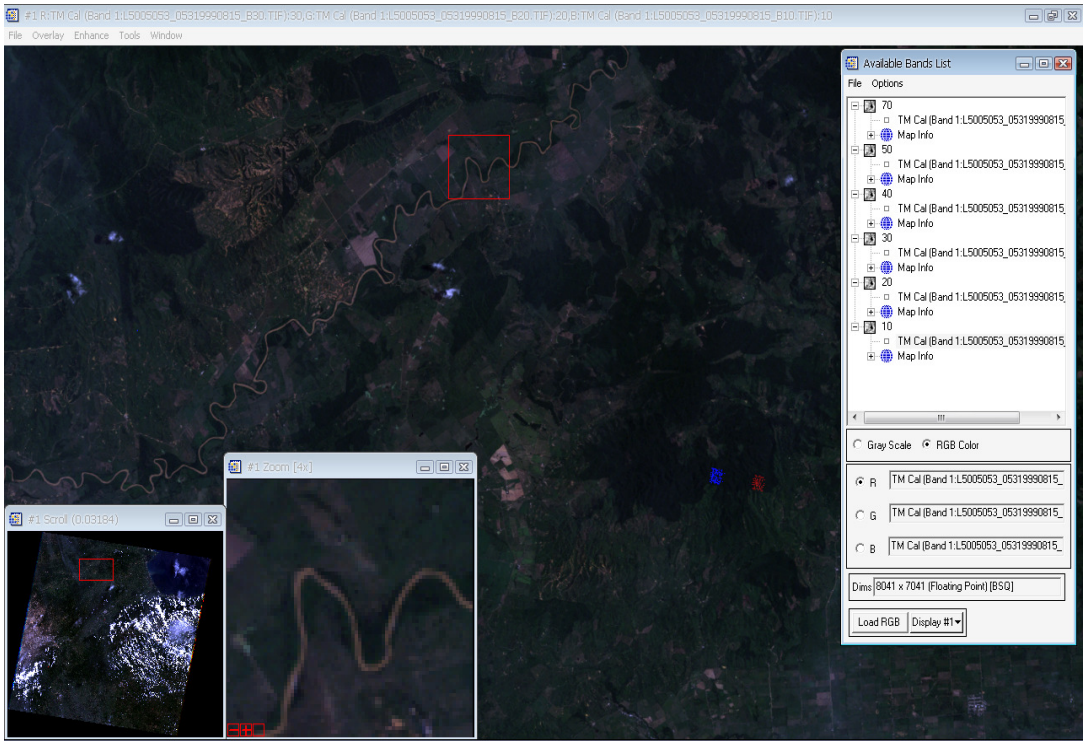


Figura i.6 Resultado de la calibración de todas las bandas.

i.1.1.2 Calibración en *Layer Staking*

Paso 1. Seleccionar *Basic Tools* y abrir la ventana *Layer Staking***.** (Fig. i.7).

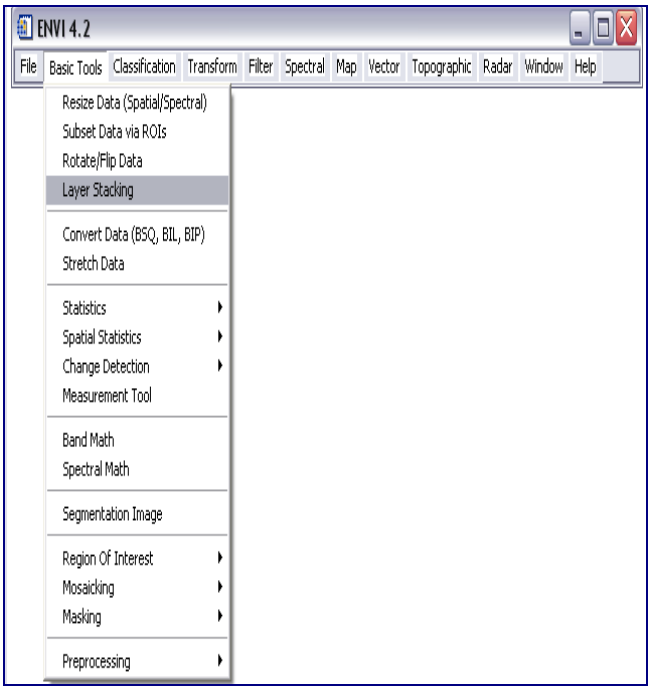


Figura i.7 Calibración en *Layer Staking*.

Paso 2. Seleccionar *Import File*, para extraer las imágenes de bandas corregidas, las cuales serán extraídas desordenadas. (Fig. i.8).

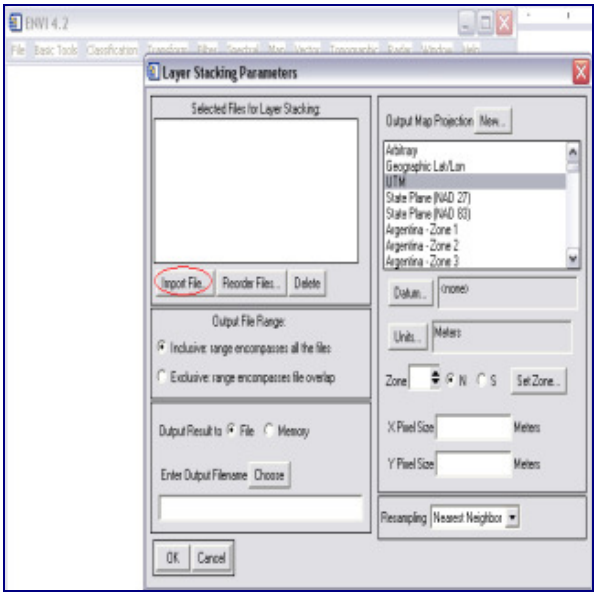


Figura i.8 Parámetros de *Layer Staking*, donde se extraen las imágenes de bandas corregidas desordenadas.

Paso 3. Una vez extraídas todas las imágenes de bandas, se selecciona de abajo hacia arriba para guardar en orden el procedimiento. Todo esto con el propósito de obtener una corrección de bandas ordenadas (Fig.i.9).

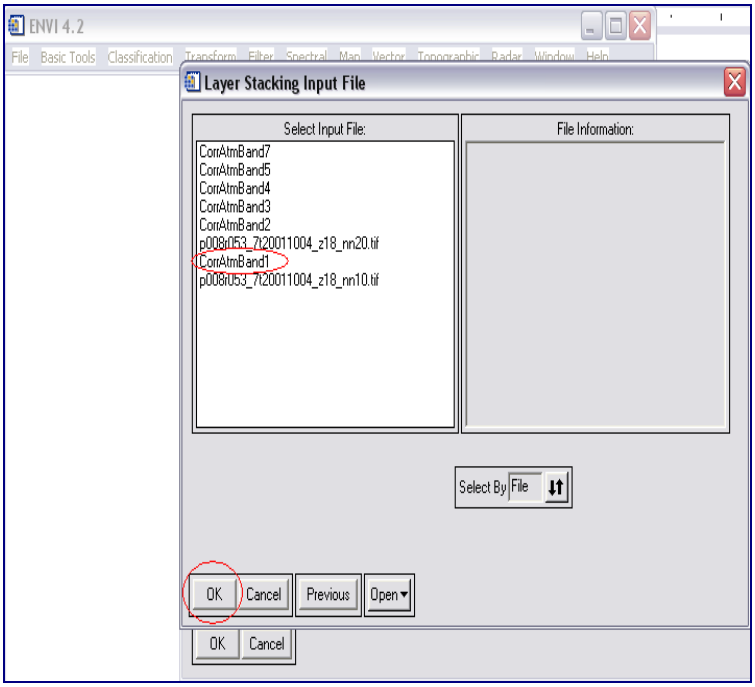


Figura i.9 Parámetros de *Layer Staking*, donde se obtienen las imágenes de bandas corregidas y ordenadas.

Paso 4. Seleccionar *Choose* para guardar el procesamiento y luego en una carpeta seleccionada (Fig. i.10).

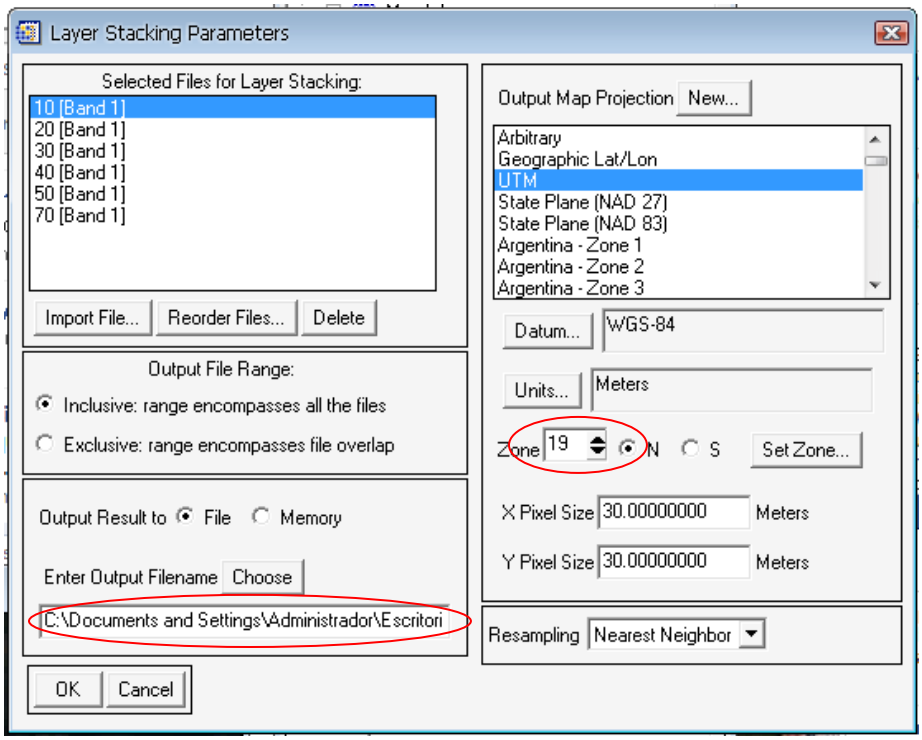


Figura i.10 Seleccionar *Choose*, y guardar el procedimiento realizado.

Resultado de la imagen en *Layer Staking*

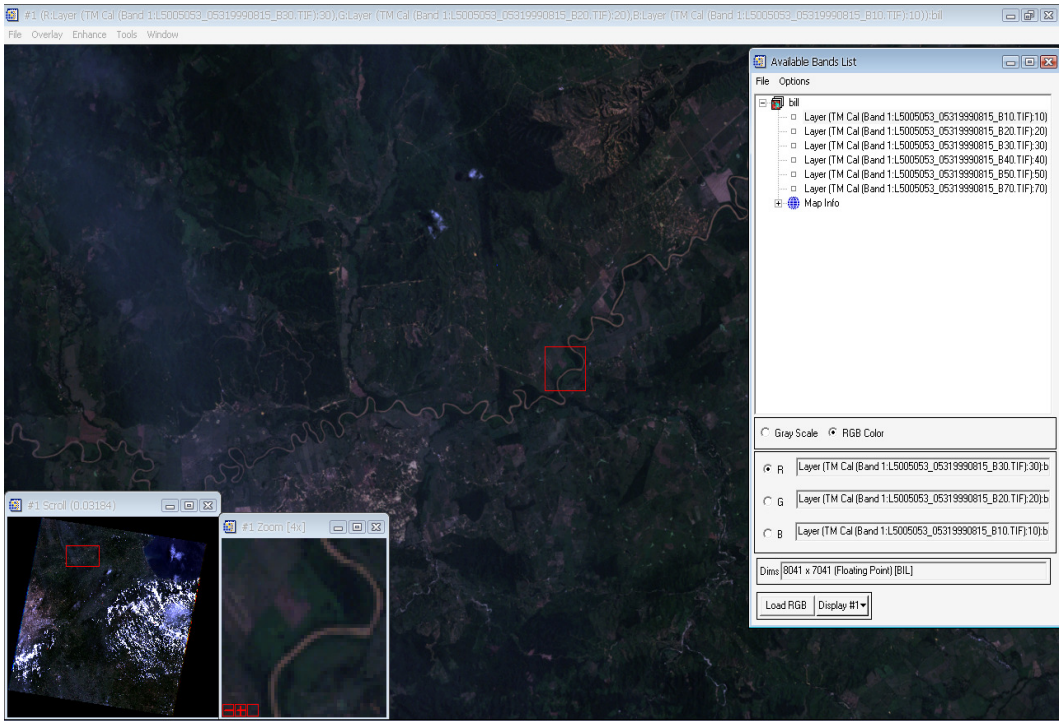


Figura i.11 Resultado de la imagen en la Calibración en *Layer Staking*

i.1.1.3 Calibración en Formato Bill

Paso 1. Seleccionar *Basic Tools*. (Fig. i.12).

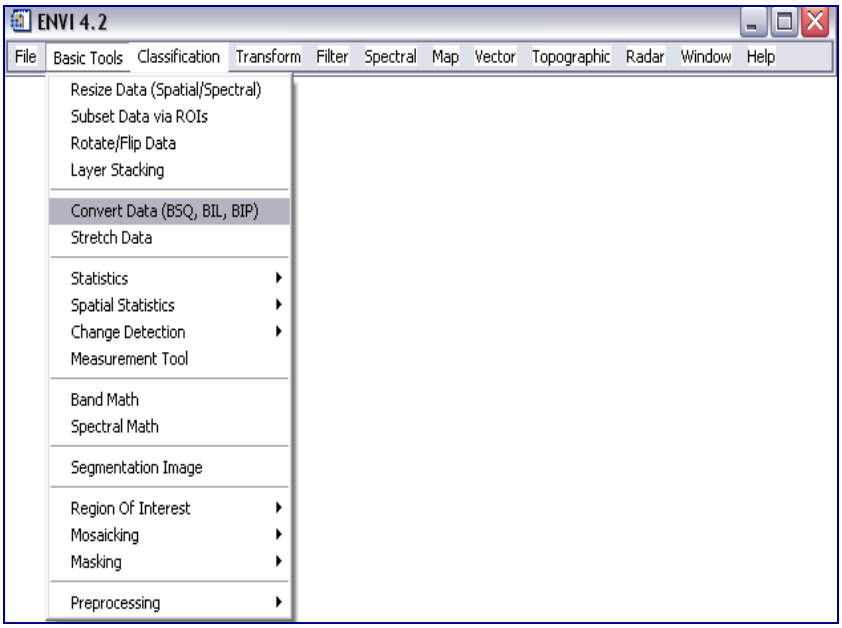


Figura i.12 Proceso para la calibración en formato *Bill.*

Paso 2. Abrir la ventana llamada *Convert File Input File*, seleccionar la corrección del Archivo *Layer Staking* y hacer clic en *OK*, luego aparecerá una ventana *Convert File Parameters* (Fig. i.13).

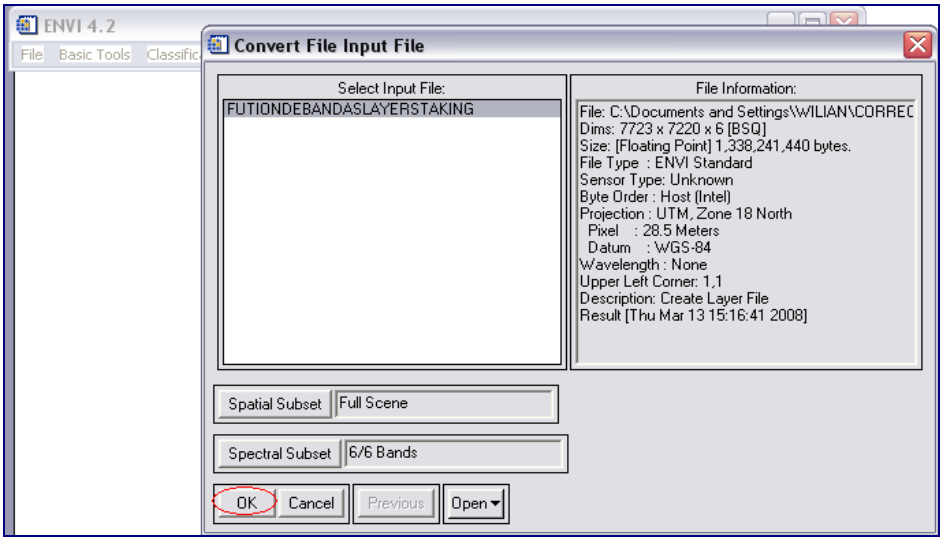


Figura i.13 Ventana para el proceso de corrección del archivo *Layer Staking*

Paso 3. Convertir los parámetros a *Bill*. (Fig. i.14).

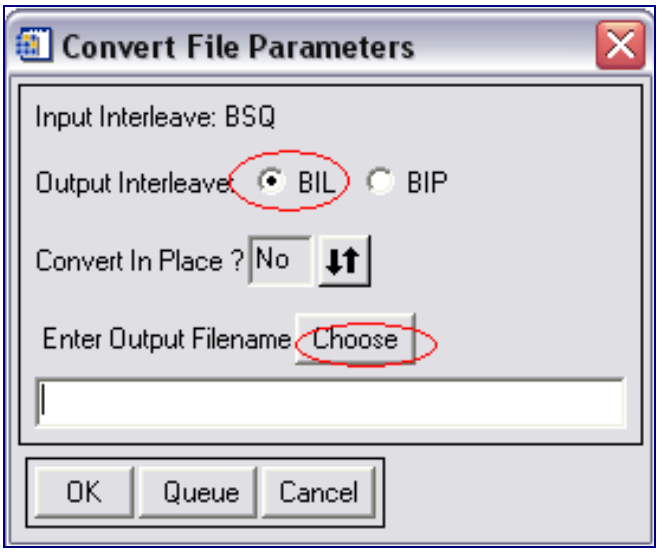


Figura i.14 Ventana donde se convierte los parámetros *Bill.*

Paso 4. Guardar en una carpeta y aparecerán los resultados. (Fig. i.15).

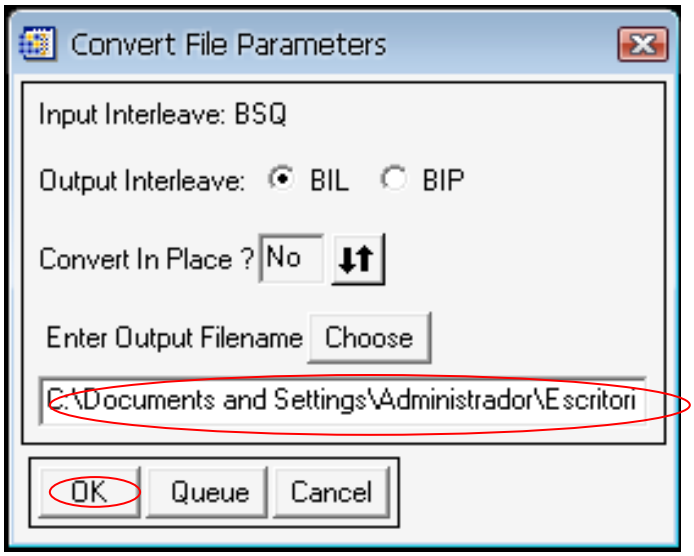


Figura i.15 Ventana donde se observa como guardar los parámetros.

Resultados en *Bill*

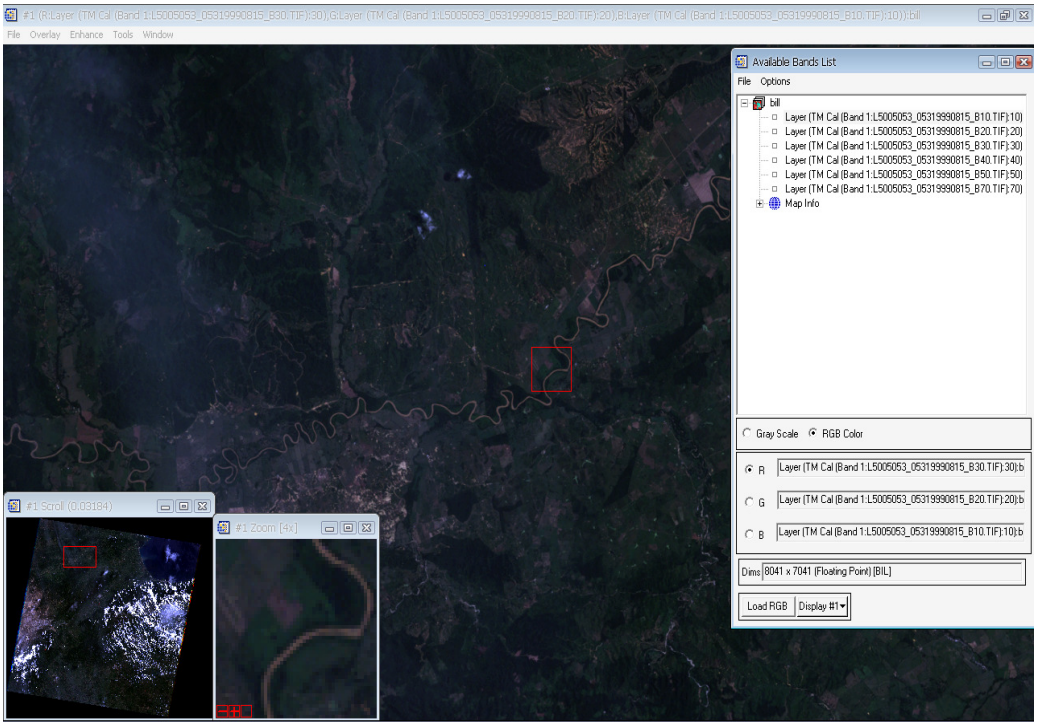


Figura i.16 Resultados de la imagen en *Bill*.

i.1.1.4 Corrección atmosférica de la imagen en *Flaash*

Paso 1. Seleccionar *Basic Tools*, hacer clic en *Preprocessing* → *Calibration Utilities* → *Flaash* (Fig. i.17).

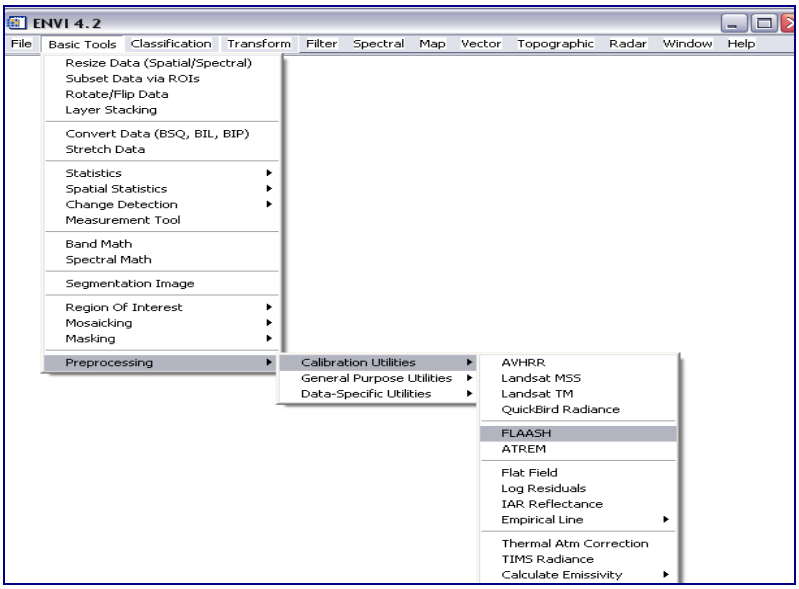


Figura i.17 Ventana donde aparece los puntos a seleccionar para la corrección.

Paso 2. Abrir una ventana llamada *Flaash Atmospheric Correction Model Input Paso Parameters* (Fig. i.18).

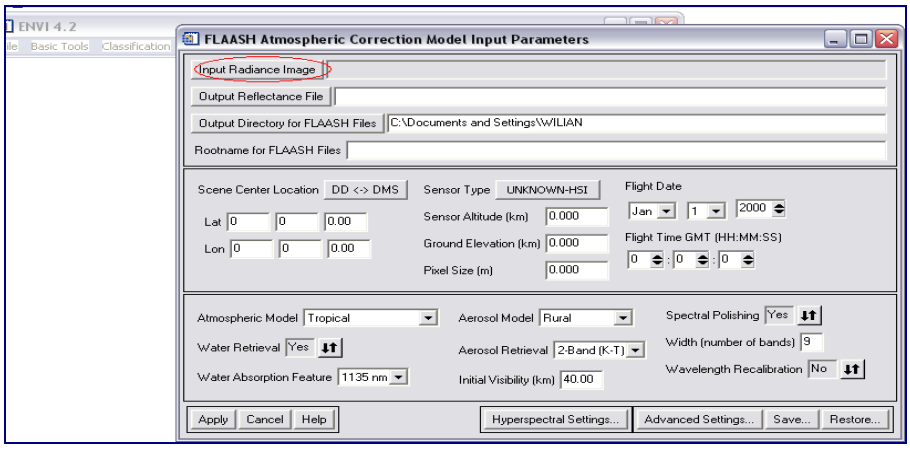


Figura i.18 Ventana para la corrección atmosférica

Paso 3. Seleccionar el archivo *Bill Espectral*, seguidamente abrir la carpeta ondas, donde se tomarán una serie de datos que sirven para la corrección. Elegir una carpeta llamada factor escala de radiancia y seleccionar los datos observados. Por último, hacer clic en *OK***.** (Fig. i.19).

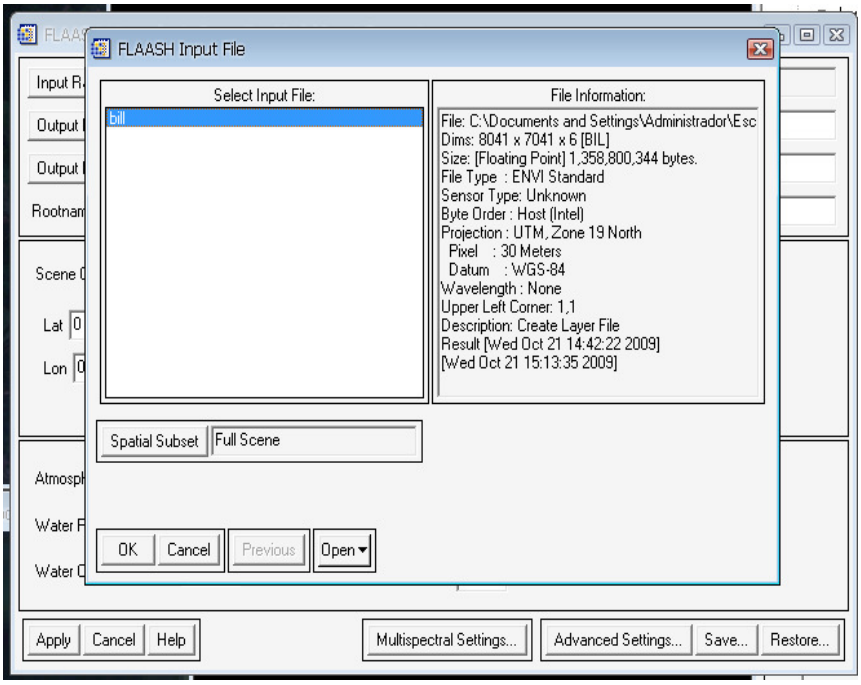


Figura i.19 Ventana indicativa, donde se tomarán una serie de datos que sirven para la corrección.

Paso 4. Guardar la imagen de radiancia en las carpetas seleccionadas junto con la hora de adquisición, con todos los archivos realizados en esta corrección, para culminar con la selección del Sensor *Type*, donde se seleccionara el tipo de sensor que género la imagen (en este caso *Landsat* 7). (Fig. i.20).

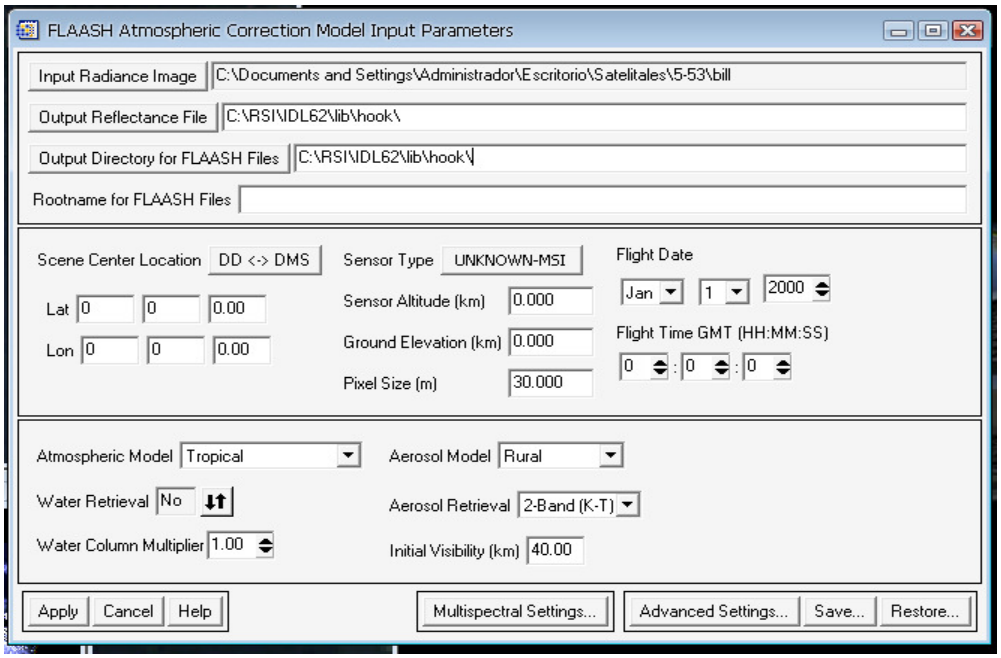


Figura i.20 Ventana donde se guarda la imagen de radiancia y el tipo de sensor que género la imagen.

Paso 5. Agregar la latitud, longitud, sensores de altitud, elevación y píxeles. (Fig. i.21)

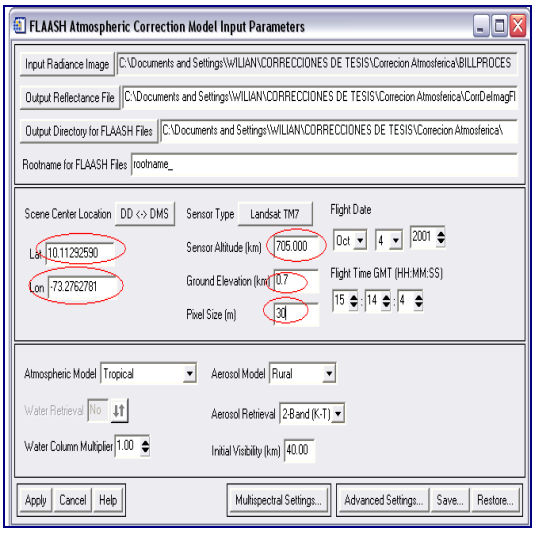


Figura i.21 Ventana donde agrega las coordenadas y datos de la imagen.

Paso 6. Seleccionar *Multispectral Setting*, anotar las bandas correspondientes y guardar. (Fig. i.22).

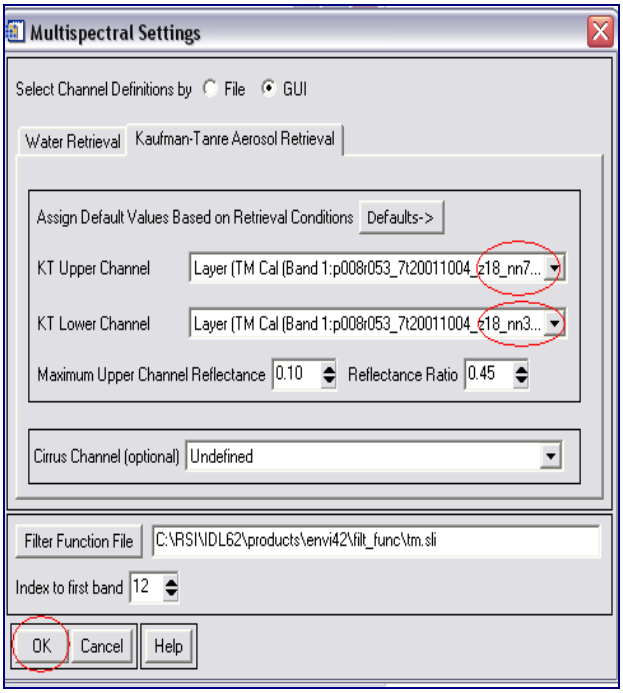


Figura i.22 Ventana donde se observa cómo se debe anotar las bandas y luego guardar.

Resultados imagen en *Flaash*

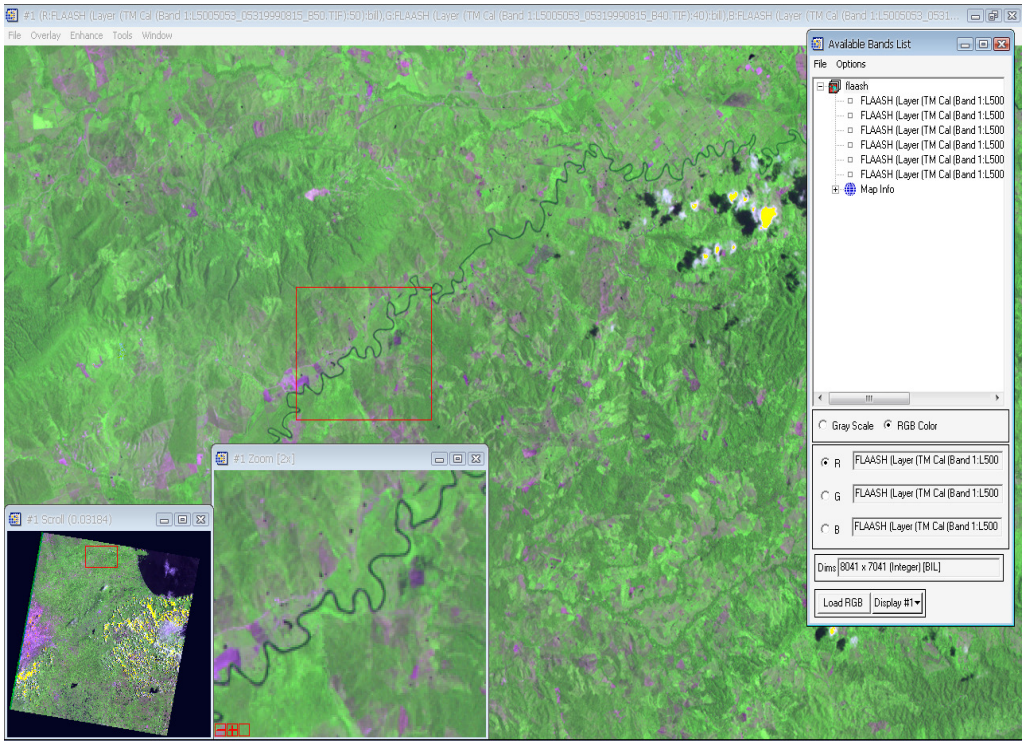


Figura i.23 Resultado de la imagen en *Flaash*

i.1.1.5 Construcción de máscara para el uso en la extracción de nubes y sombra de nubes

Utilizando el programa *ArcGis* 9.2, realizar una vectorización (digitalización) de la imagen, donde delimitaremos nubes y sombras de nubes, este proceso es importante ya que se generara un *shapefile* para un proceso posterior de filtrado y obtener la imagen pura y sin estos elementos.

i.1.1.6 Extracción de los píxeles relacionados con la máscara y sombra de nubes en imágenes hiperespectrales.

Para generar una imagen pura, utilizando la máscara realizada en el programa *ArcGis* en formato *shapefile* para transformarla a formato *ROIs.*

Paso 1. Seleccionar *Basic Tool –Open Vector File***.** (Fig. i.24).

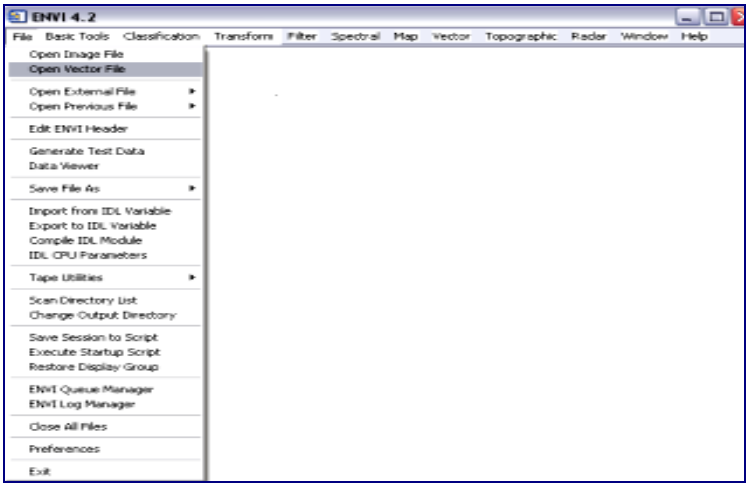


Figura i.24 Ventana donde se despliega las opciones para generar una imagen pura.

Paso 2. Activar una ventana llamada *Import Vector File Parameters*, seleccionar *Ok*, despliegar *Available Vectors List*, hacer clic en *Select All Layers* (Fig. i.25).

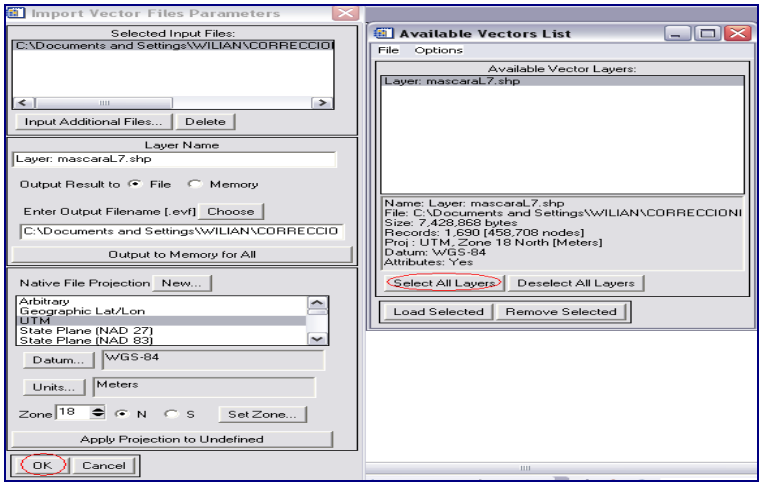


Figura i.25

Paso 3. Hacer clic *Load Selected*. Este *Shapefile* es la vectorización obtenida en el programa *ArcGis* descrito en el apartado i.1.1.6.

Paso 4. Aparece la ventana *Windows* #1 donde se abre el *shapefile* realizado, hacer clic en *OK* (Fig. i.26)

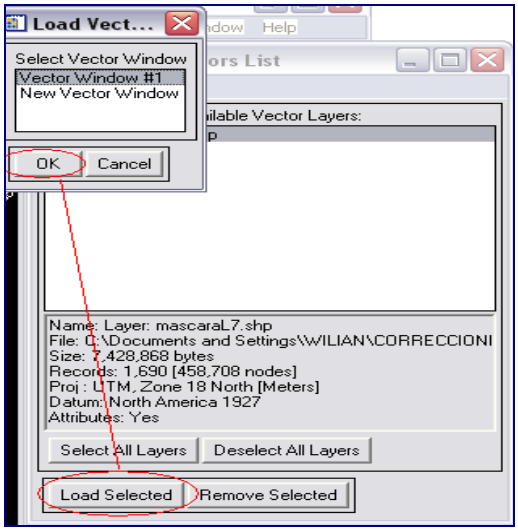


Figura i.26 Ventana donde se selecciona la vectorización obtenida en *ArcGis*

Paso 5. Seleccionar *File - Export Active Layer to ROIs,* luego seleccionar la máscara para convertir en el método de corrección a formato *ROIs* presionar *OK* (Fig. i.27).

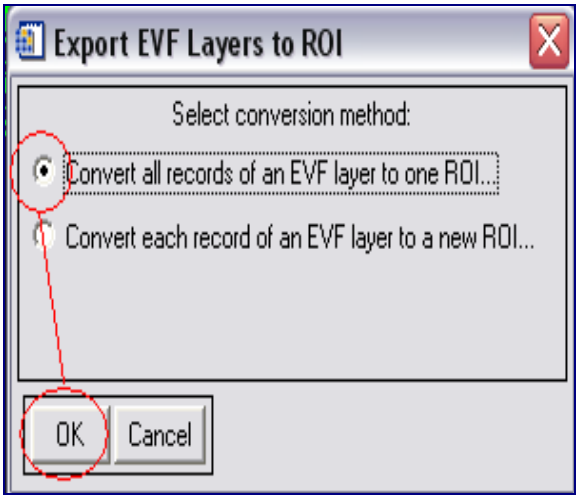


Figura i.27

5.1.1.6 Construcción de la máscara de nubes

Paso 1. Seleccionar *Basic Tools* → *Masking Build Mask*, (Fig. i.28)

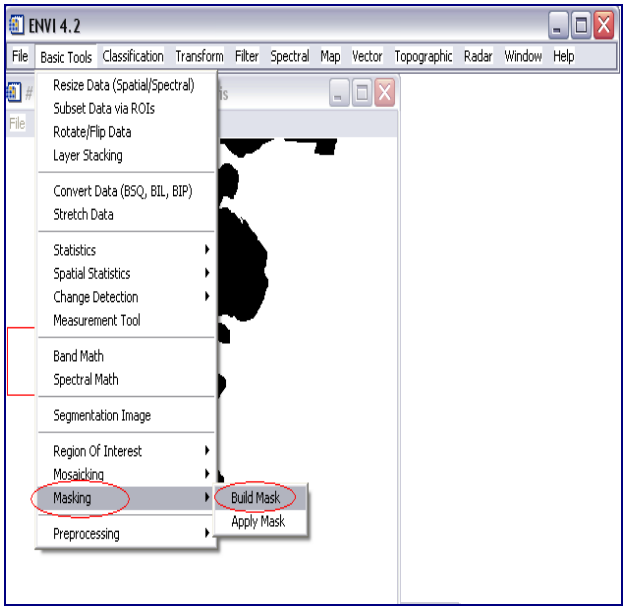


Figura i.28 Ventana donde se despliega las opciones Basic Tool-Masking-Buid Mask, para la construcción de la máscara de nubes.

Paso 2. Desplegar una ventana, seleccionar *Display* # 1, hacer clic en *OK* (Fig.i.29).

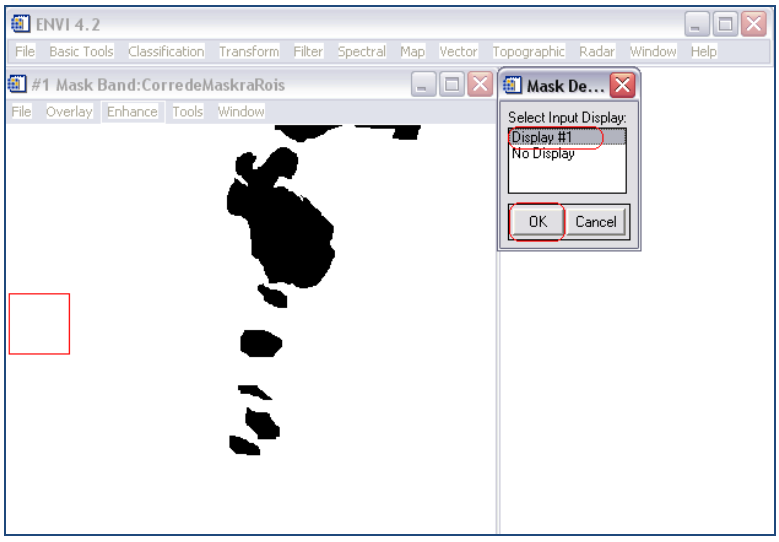


Figura i.29 Selección del *Display.* Selección del *Display* # 1

Paso 3. Desplegar la referencia de *Mask Definition,* seleccionar *Option* → *Import ROIs*. (Fig. i.30)

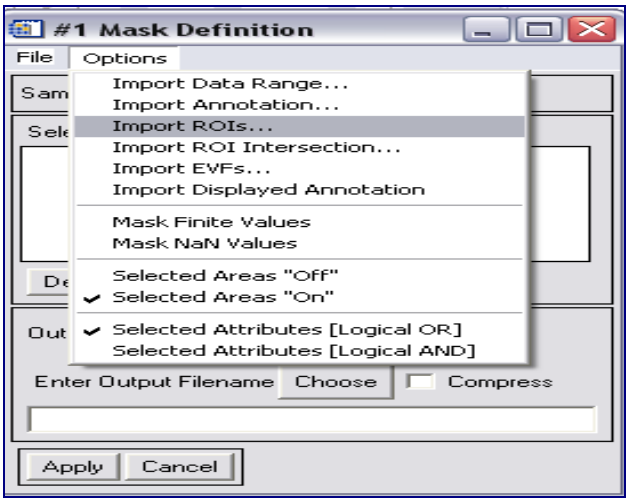


Figura i.30 Ventana donde se observa la selección de *Mask Definition*

Paso 4. Seleccionar la máscara en *ROIs*, hacer clic en *OK*. (Fig. i.31)

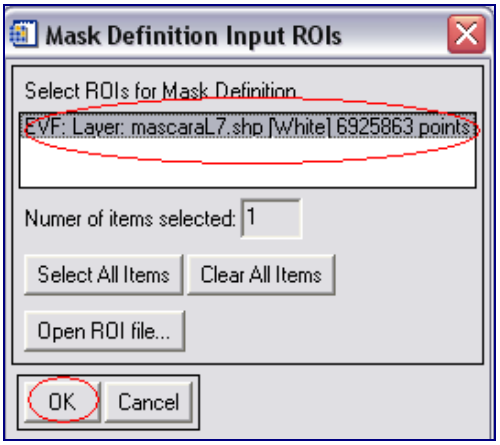


Figura i.31 Ventana donde se selecciona la máscara en *ROIs*, color blanco.

Paso 5. Seleccionar la máscara en *ROIs*, luego la carpeta donde se guardo la corrección de la construcción de la máscara (Fig. i.32).

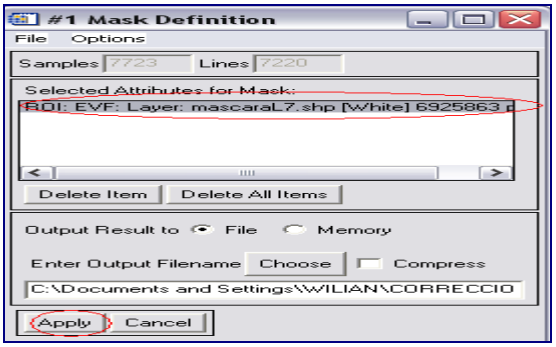


Figura i.32 Ventana donde se debe guardar la corrección de mascara.

i.1.1.7 *Spatial Subset* (Delimitación de Zona de estudio) de la imagen

La imagen completa resulta demasiada pesada para el proceso de corrección, se debe delimitar una zona de estudio más pequeña para poder aplicar las correcciones, así el tamaño de la imagen se hace manejable por los equipos de computación empleados.

Paso 1. Seleccionar la corrección de la imagen en flash. (Fig. i.33).

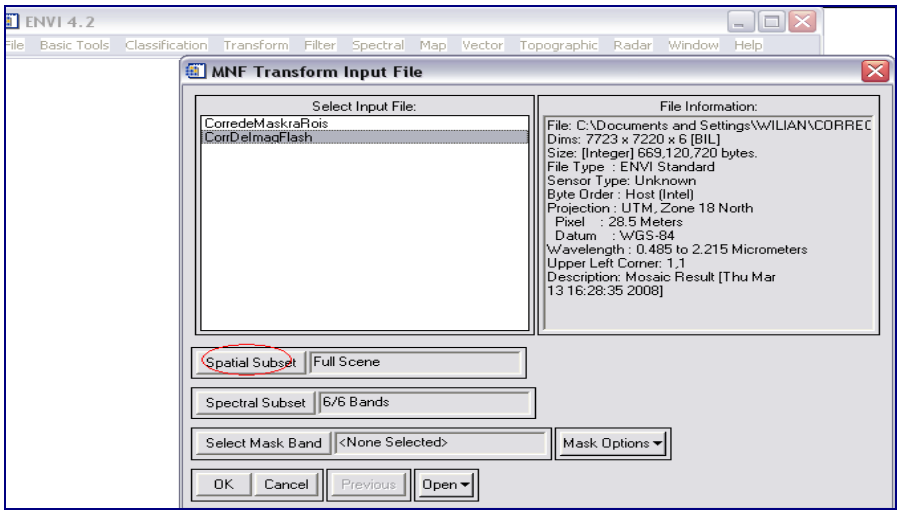


Figura i.33 Ventana donde se despliega para la corrección de imagen flash.

Paso 2. Desplegar una ventana llamada *Select Spatial Subset*, seleccionar *Image* (Fig. i.34).

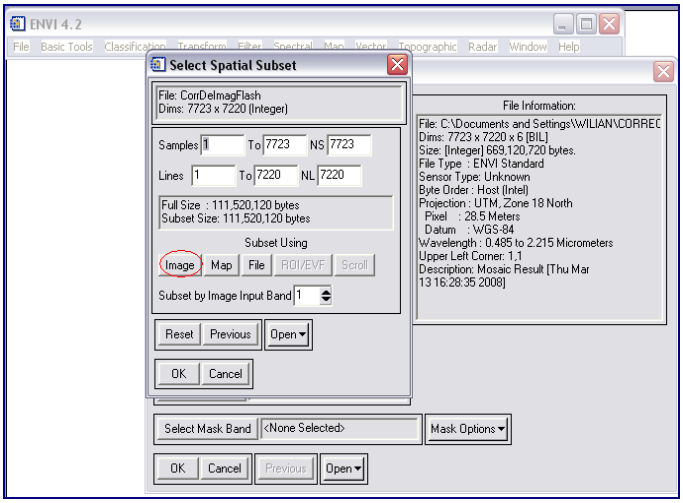


Figura i.34 Ventana donde se despliega *Selet Spatial Subset*, luego *Image.*

Paso 3. Delimitar la zona de estudio que se quiere, con este paso se obtiene el resultado del subset de la zona y desde ahora las correcciones realizadas se harán al *subset*. (Fig. i.35)

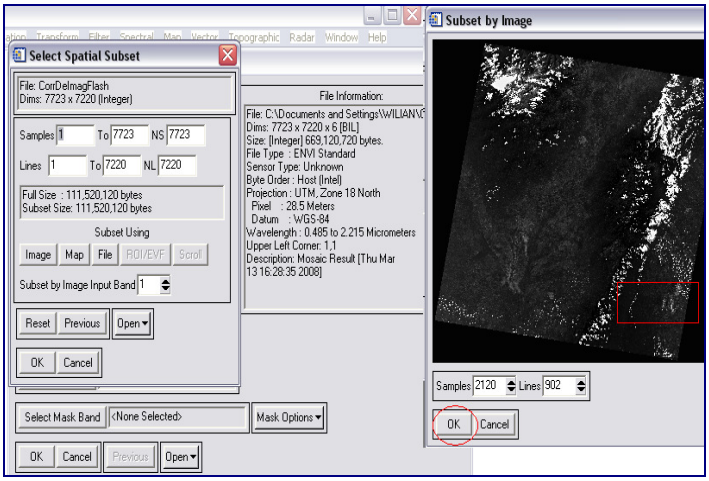


Figura i.35 Ventana donde se delimita la zona de estudio, obteniéndose como resultado el *subset* de la zona.

i.1.1.8 Transformación de la Fracción Mínima de Ruido (MNF)

Paso 1. Seleccionar en el menú principal *Spectral* → *MNF Rotación* → *Forward MNF* → *Estimate Noise Statistics From Data*. (Fig. i.36).

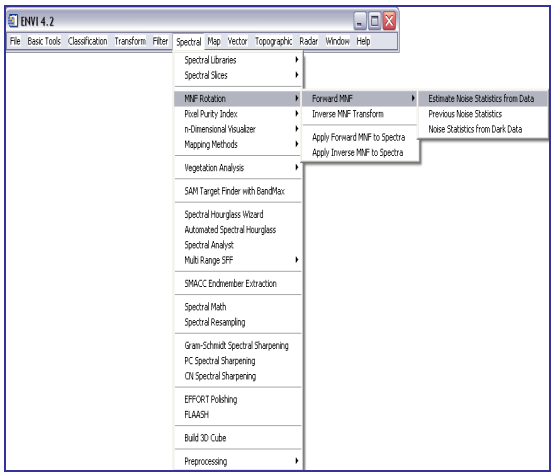


Figura i.36 Ventana *Spectral-MNF Rotación-Forward MNF-Estimate Noise Statistics From Data* y demás, donde se realizara la transformación de fracción mínima de ruido.

Paso 2. Activar una ventana llamada *MNF Transform Imput File*, seleccionar el archivo antes realizar el *subset* de la imagen → Corrección de la Mascara en *ROIs*"→ presionar *OK*. (Fig. i.37).

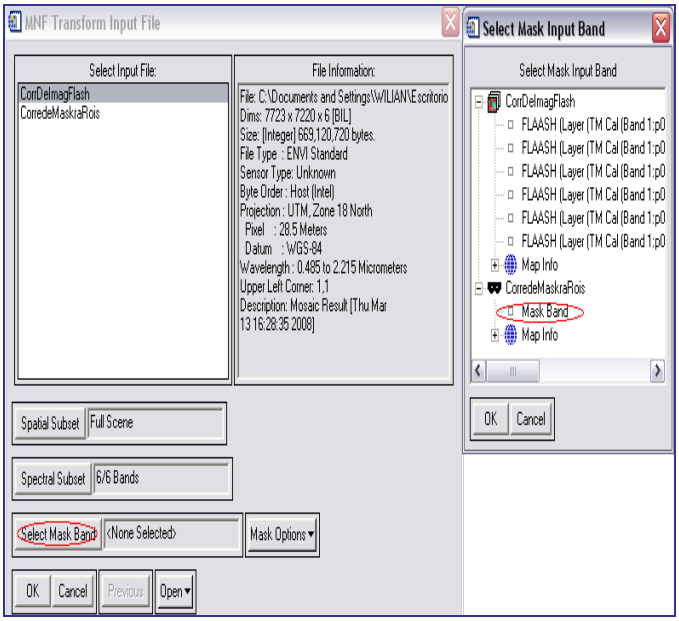


Figura i.37 Activación de la ventana *MNF Transform Imput File*, para la corrección de la imagen.

Paso 3. Desplegar otra ventana *Forward MNF Transform Parameters*" en la cual se guardan los tres archivos respectivos, presionar *OK* (Fig. i.38).

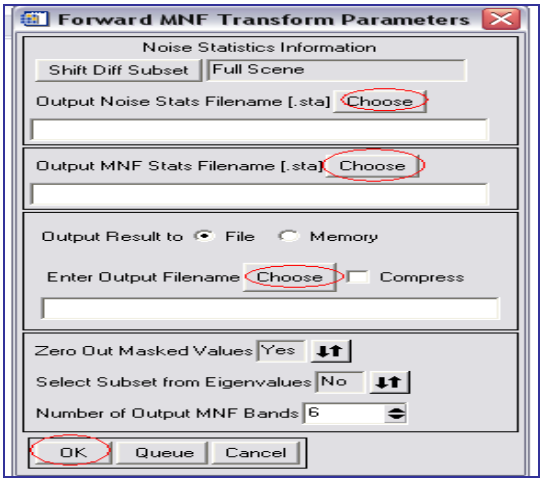


Figura i.38 Ventana desplegada *Forward MNF Transform Parameters*, donde se guardan los archivos respectivos.

Paso 4. Generar los resultados del *MNF* (Fig. i.39).

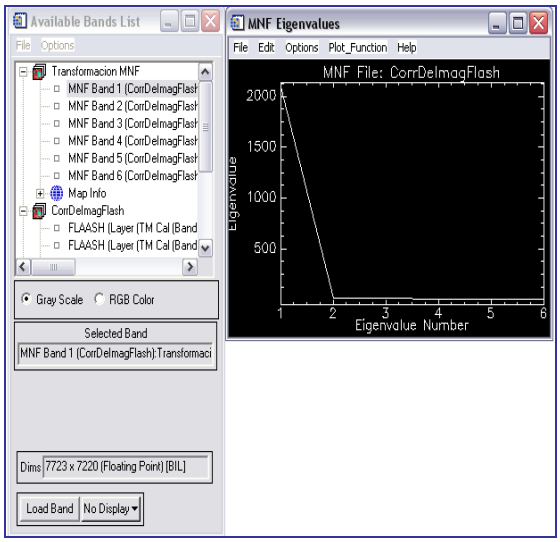


Figura i.39 Ventana mostrando los resultados del *MNF*.

i.1.1.9. Corrección del índice de pureza del píxel (PPI)

Paso 1. Seleccionar en el menú principal *Spectral-Pixel Purity Index-[Fast] New Output Subset*. (Fig. i.40)

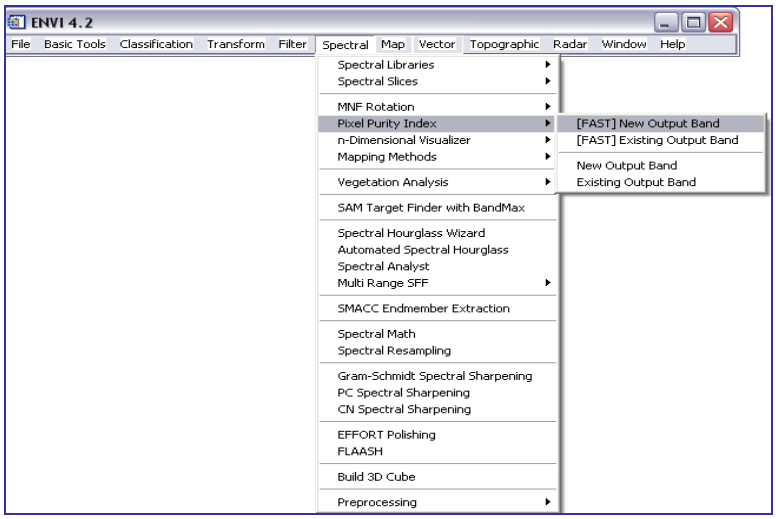


Figura i.40 Ventana desplegada para la corrección del índice de pureza del pixel

Paso 2. Activar la ventana *File Spectral Subset*, seleccionar *Subset MNF* y las 3 primeras bandas del *Spectral Subset*. (Fig. i.41).

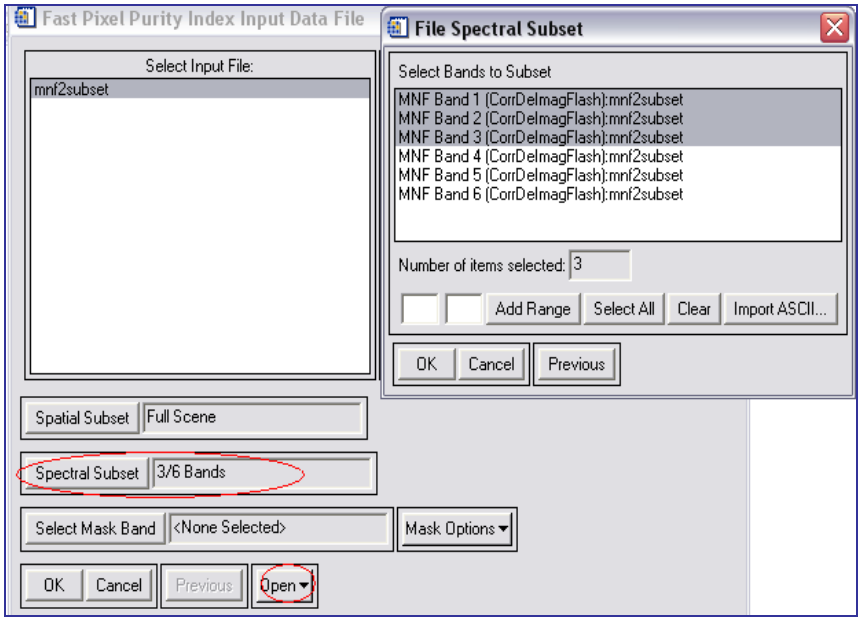


Figura i.41 Ventana *File Spectral Subset*, donde se selecciona *Subset MNF* y las 3 primeras bandas del *Spectral Subset.*

Paso 3. Seleccionar la máscara en *ROIs*. (Fig. i.42)

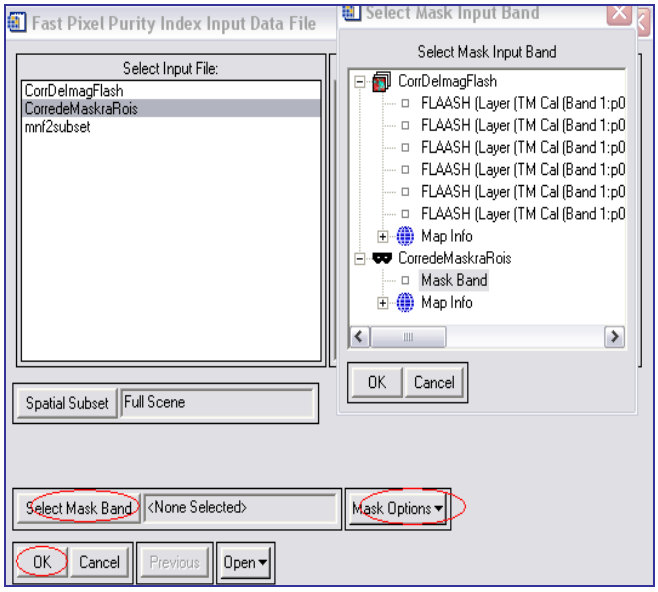


Figura i.42 Ventana donde se selecciona la máscara de ROIs

Paso 4. Desplegar la ventana *Fast Pixel Purity Index Parameters* escoger la carpeta donde se va a guardar y se tiene la corrección en *PPI***.** (Fig. i.43)

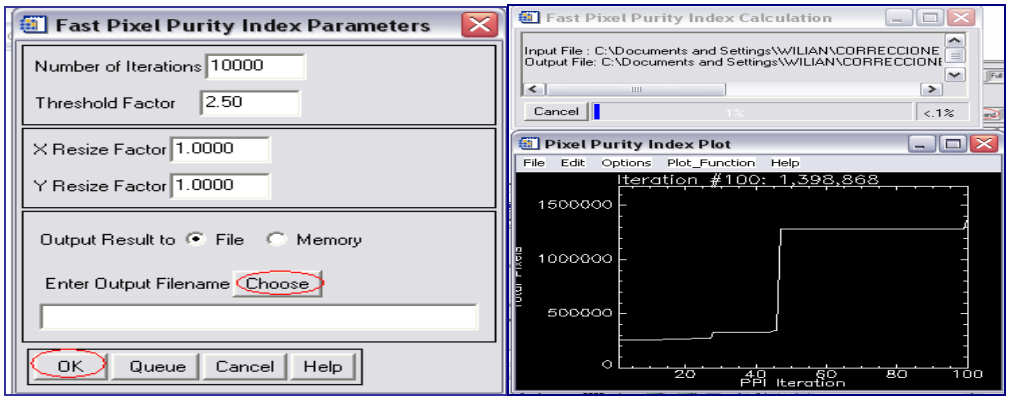


Figura i.44 Ventana donde se despliega *Fast Pixel Purity Index Parameters***,** se guarda y se tiene la corrección en *PPI.*

Paso 5. Con la corrección Del *PPI*, Seleccionar, hacer clic en *Load Band*, desplegar el *PPI* Transformado (i.45).

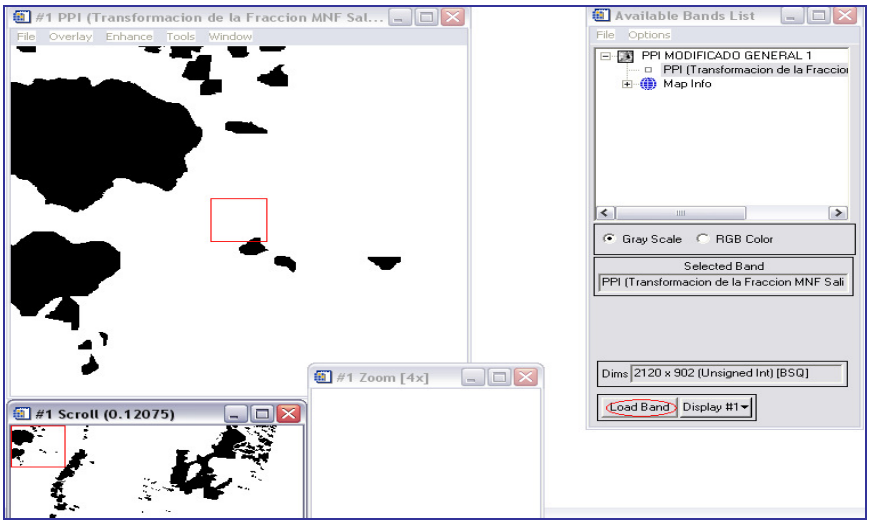


Figura i.45 Ventana donde se selecciona *Load Band*, desplegándose el *PPI* transformado.

Paso 6. Click en *Overlay* → *Density Slice***.** (Fig. i.46).

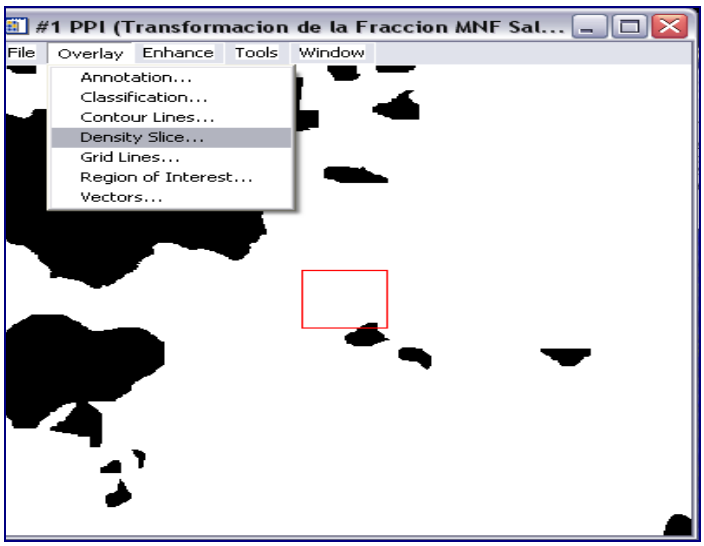


Figura i.46 Ventana desplegada donde se muestra seleccionado *Overly-Density Slice*

Paso 7.Se tiene el *PPI* Transformado hacer Clic en *OK***.** (Fig. i.47).

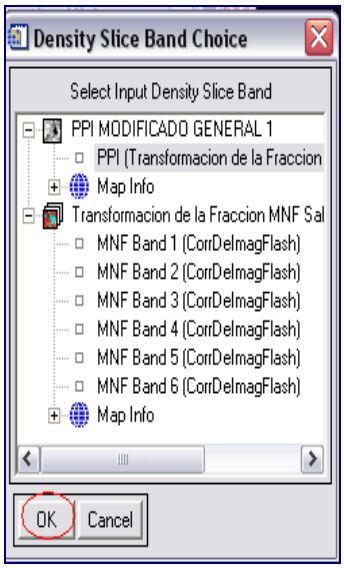


Figura i.47 Ventana desplegada, donde se muestra el *PPI* transformado

Paso 8. Esta ventana muestra unos valores de rango de la cantidad de píxeles existentes

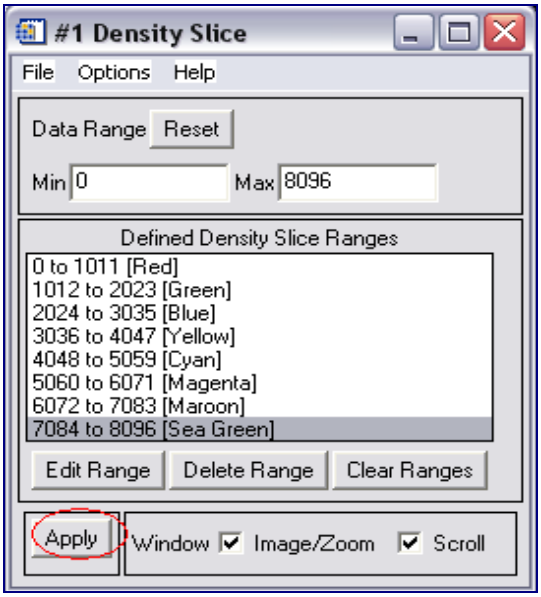


Figura i.48 Ventana de valores de rango de pixeles.

Paso 9. Con la ventana de valores antes desplegadas, volvemos al PPI Transformado, se despliega *Tools → Region Of Interest B →and Threshold To ROIs*. (Fig. i.49)

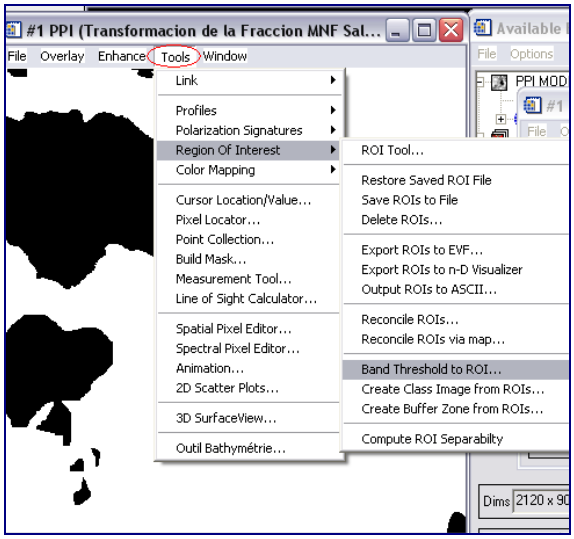


Figura i.49 Ventana desplegando el *Tools → Region Of Interest B →and Threshold To ROIs*, con el *PPI* transformado.

Paso 10. Con la ventana anteriormente abierta se selecciona el *PPI* Transformado. (Fig. i.50).

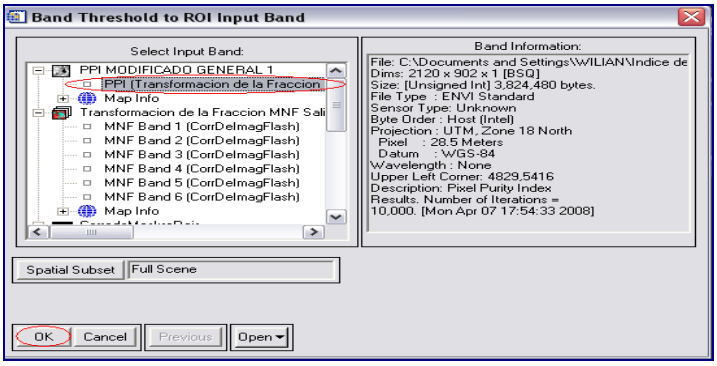


Figura i.50 Ventana desplegada con el PPI transformado.

Paso 11. Abrir una ventana y en forma manual seleccionar aquellos píxeles extremos que estén cercanos a los 10.000 (Fig. i.51).

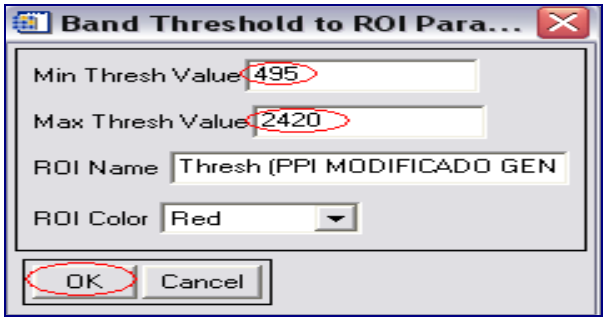


Figura. i.51Ventana *Band Threshold to ROIs*, donde se seleccionan los pixeles extremos.

Paso 12. Resultados de los píxeles (Fig. i.52).

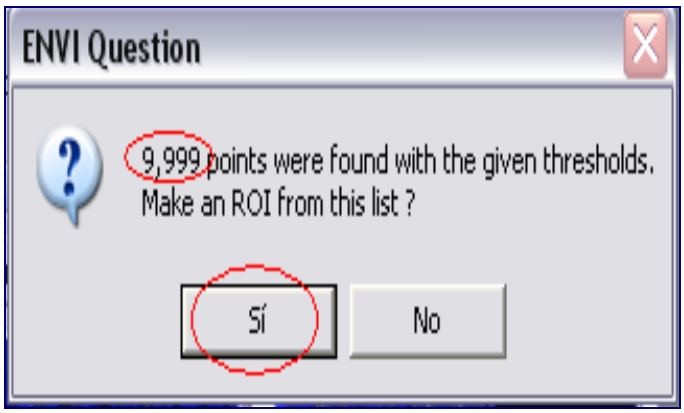


Figura i.52 Ventana desplegada, donde muestra el resultado de los pixeles.

Paso 13. Con el resultado anterior. (Fig. i.53)

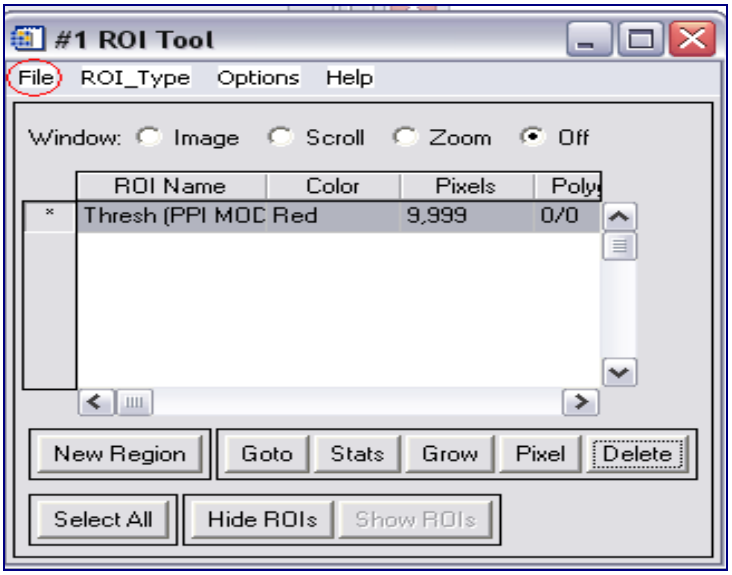


Figura i.53 Ventana desplegada, donde se muestra el resultado anterior.

Paso 14. Desplegar una ventana llamada #1 *ROI Tool* → *File* → *Save ROIs* (Fig. i.54).

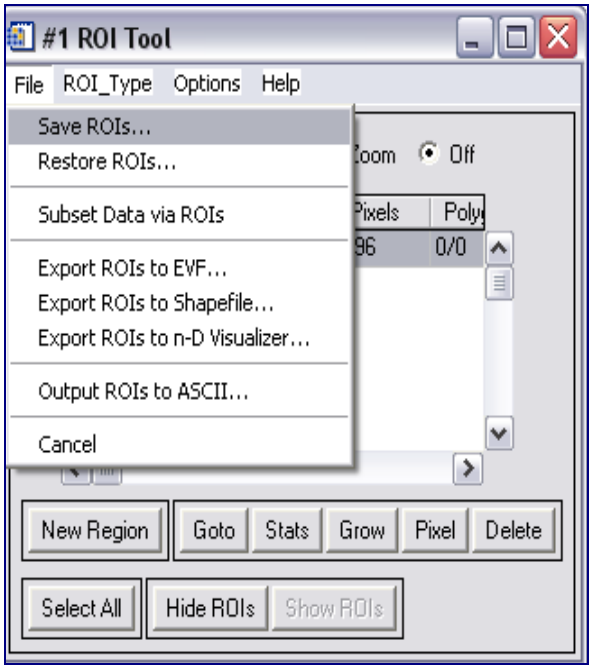


Figura i.54 Ventana #1 *ROI Tool* → *File* →*Save ROIS* desplegada.

Paso 15. Guardar en la carpeta seleccionada (Fig. i.55).

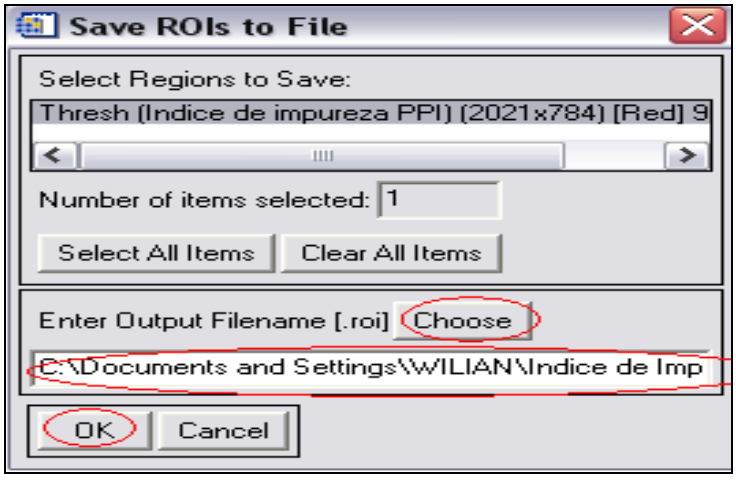


Figura i.55 Ventana desplegada, donde se muestra como guardar la carpeta seleccionada.

Paso 16. Luego de guardar, abrir *File* y se exportar al próximo procedimiento al *Export ROIs to n- D Visualizer* (Fig. i.56).

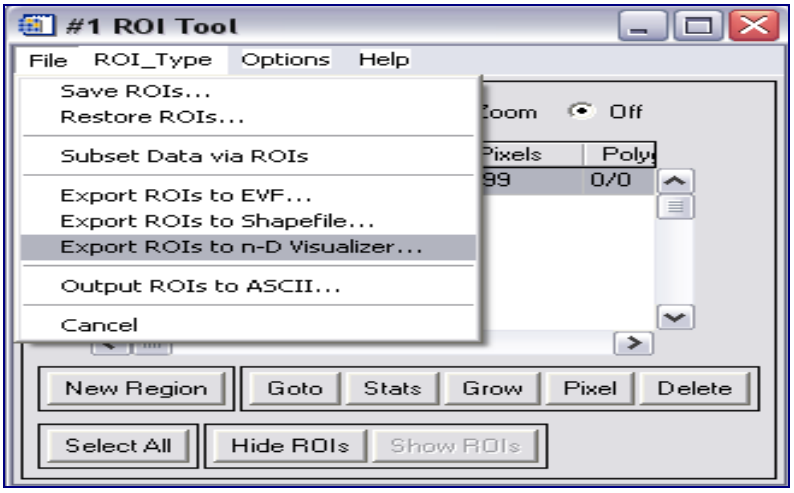


Figura i.56 Ventana desplegada, donde se abre *File* y se exporta al próximo procedimiento *Export ROIs to n- D Visualizer.*

i.1.1.10 Corrección n-D Visualizador

Al exportar los píxeles mediante el paso anterior.

Paso 1. Hacer clic en la ventana *n-D Control--- File--- Save State* (Fig. i.57).

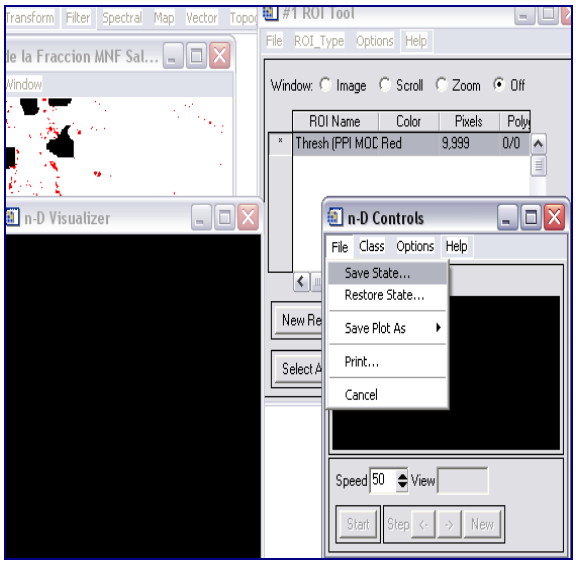


Figura i.57 Ventana desplegada para la Corrección n-D Visualizador.

Paso 2. Seguidamente *Options* → *Show Axes*, esto para que aparezcan los ejes en 3D. (Fig. i.58).

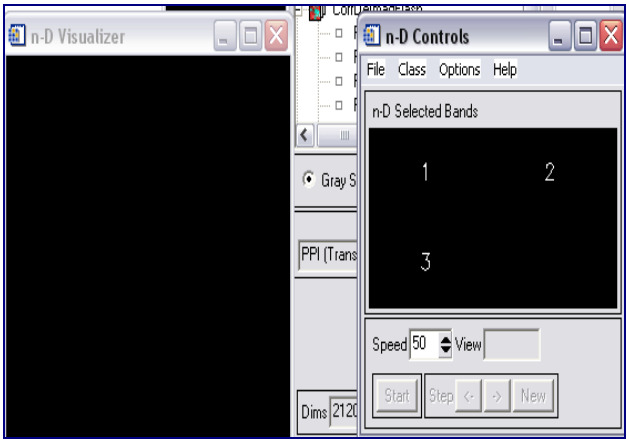


Figura i.58 Ventana desplegada, donde se observa los ejes en 3D.

Paso 3. Una vez ya visualizados los 3 ejes, abrir *File* → *Save State* y posteriormente guardar. (Fig. i.59).

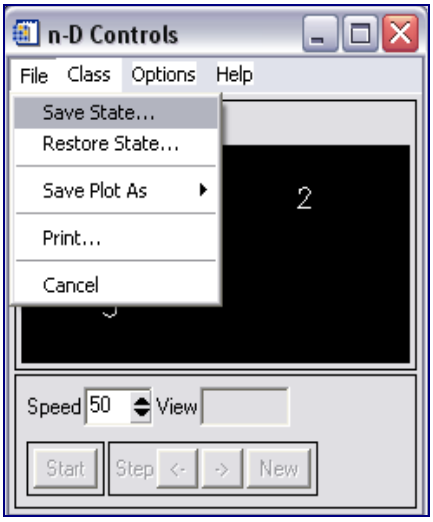


Figura i.59 Ventana desplegada, donde se muestra los 3 ejes para luego guardar.

Paso 4. Luego de guardar y teniendo las ventanas N- D Visualizador y n-D Control con las tres coordenadas abiertas y los píxeles de la imagen. (Fig. i.60).

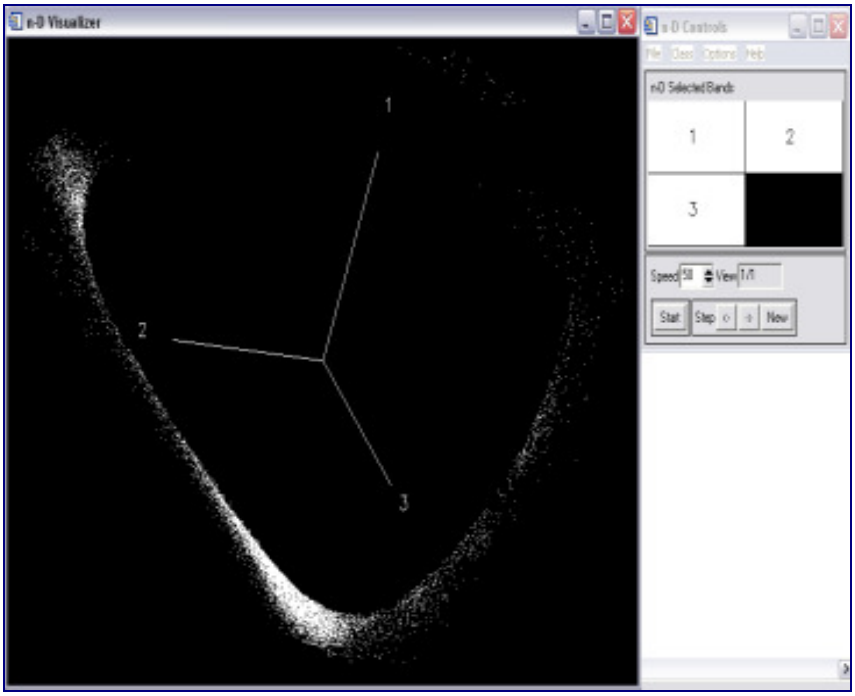


Figura i.60 Ventana desplegada, donde muestra las 3 coordenadas abiertas y los pixeles de la imagen.

Paso 5. Seleccionar los extremos con distintos colores denominadas clases. (Fig. i.61).

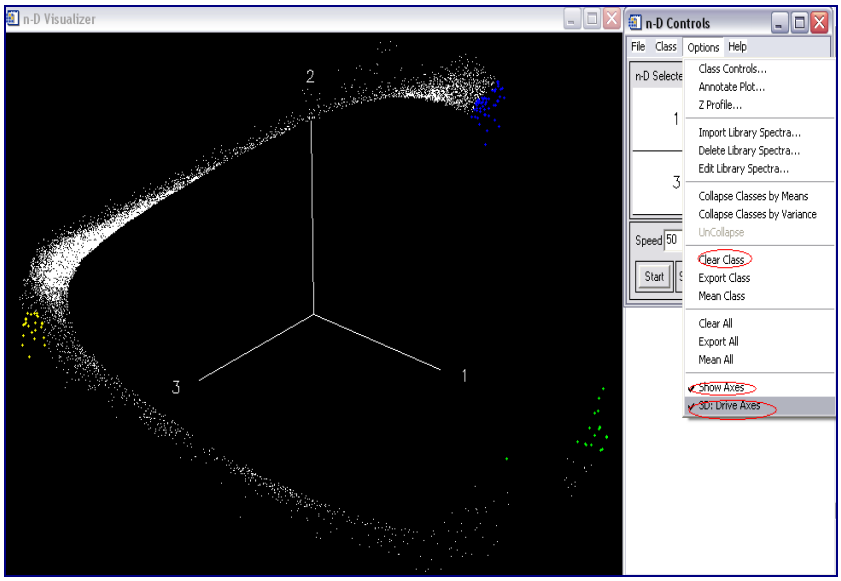


Figura i.61 Ventana desplegada, donde se selecciona los extremos con distintas clases

Paso 6. Al tener listos las clases hacer clic en *File* de la ventana **n- D Control---Save State,** para mostrar el número de clases seleccionado. (Fig. i.62).

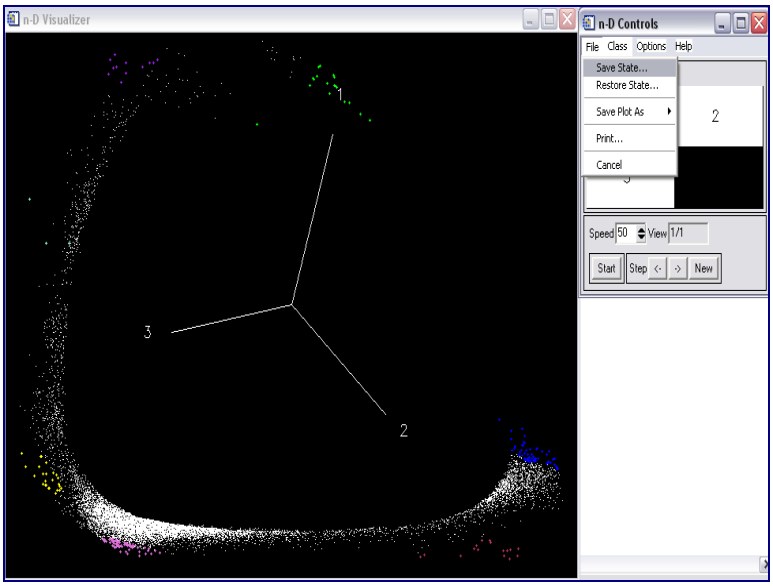


Figura i.62 Ventana desplegada, donde se muestra el número de clase seleccionado.

Paso 7. Observado el número de clases escogidas seleccionar ***File---Save ROIs.*** (Fig. i.63). Seleccionar las clases escogidas y guardar en la carpeta.

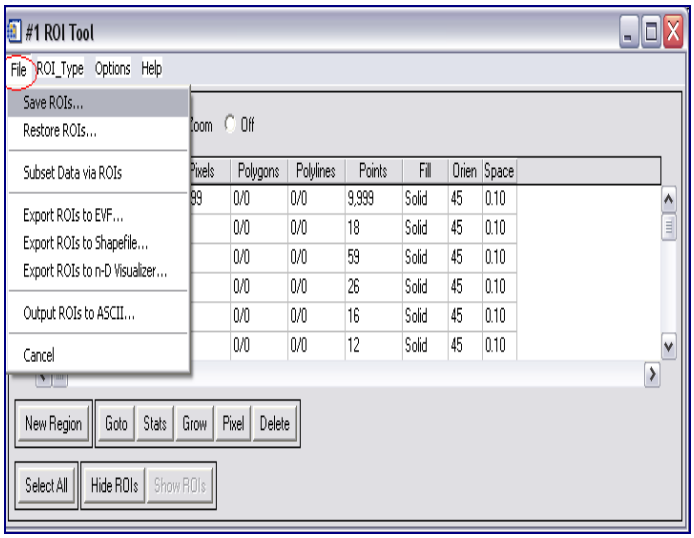


Figura i.63 Ventana desplegada, donde se seleccionan las clases escogidas para luego guardar.

i.1.1.11 *Spectral Angle Mapper (SAM)*

Paso 1. Seleccionar ***Spectral →Mapping Methods → Spectral Angle Mapper.*** (Fig. i.64).

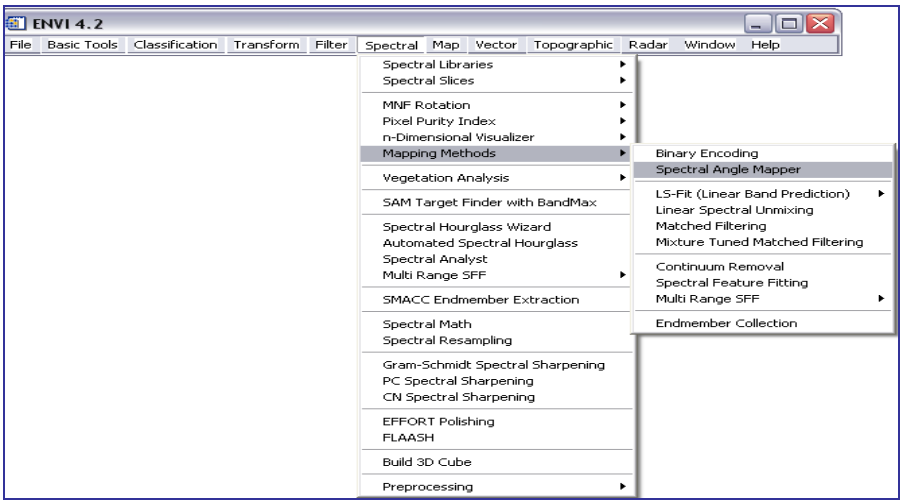


Figura i.64

Paso 2. Desplegar la ventana *Classification Imput File* seleccionar *mnf subset*, en el *Spectral Subset*, seleccionar las tres primeras bandas (1, 2, 3), ya que en este procedimiento tiene que repetirse también para las 3 bandas restantes (4, 5, 6) hacer clic en *OK***.** (Fig. i.65).

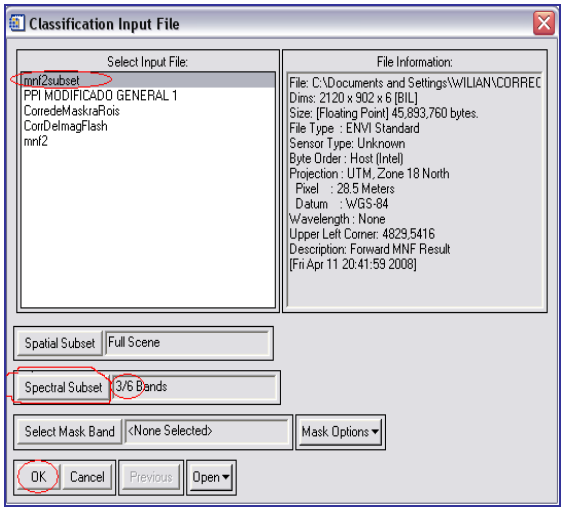


Figura i.65 Ventana desplegada, donde se selecciona las tres primeras bandas (1, 2, 3), luego para (4, 5, 6).

Paso 3. Abrir la ventana *Endmember Collection: SAM*, presionar *import--From ROI/EVF from Impud File***.** (Fig. i.66).

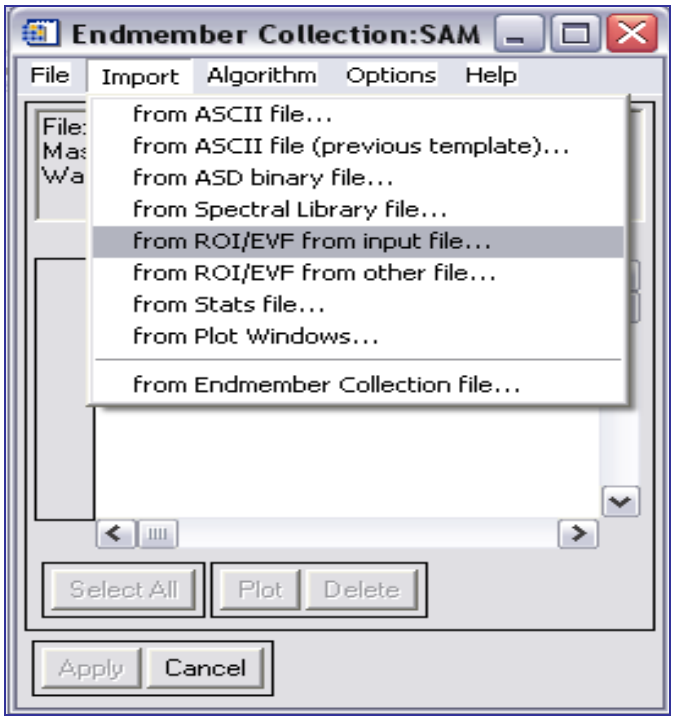


Figura i.66 Ventana desplegada, mostrando la selección *Endmember Collection: SAM*, luego *From ROI/EVF from Impud File***.**

Paso 4. Desplegar *Select Regions for Stats Calculat***,** seleccionar las clases obtenidas en el procedimiento anterior, presionar *0K*, volver a remarcar las clase, seleccionar *Apply.* (Fig. i.67). Guardar los cambios realizados, hacer clic en *OK* y culminar la corrección.

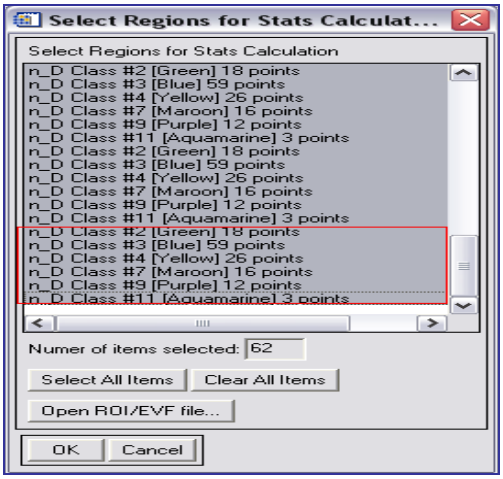


Figura i.67 Ventana desplegada, donde se seleccionara las clases obtenidas.

i.1.1.12 Clasificación no supervisada

Paso 1. Seleccionar *Clasification-Unsupervised-Isodata***.** (Fig. i.68).

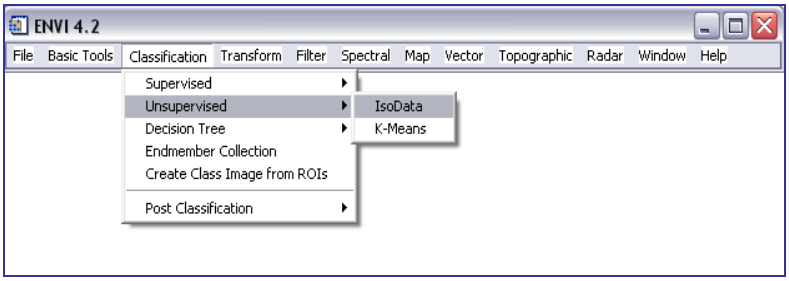


Figura i.68 Ventana desplegada, donde se selecciona la clasificación no supervisada.

Paso 2. Abrir la ventana *Classification Input File*--seleccionar corrección de imagen en *flaash*, se hace Clic en *OK***.** (Fig. i.69)

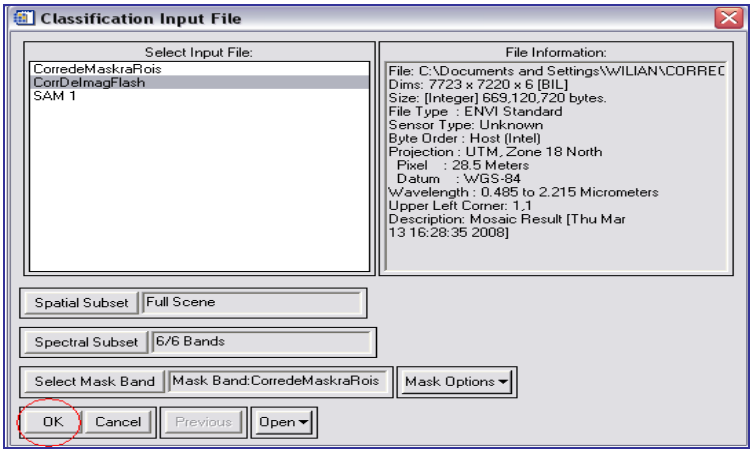


Figura i.69 Ventana desplegada, donde se realiza la corrección de la imagen en *flaash*.

Paso 3. Selecciona un rango mínimo y un máximo de clases para la clasificación, hacer Clic en *OK* (Fig. i.70)

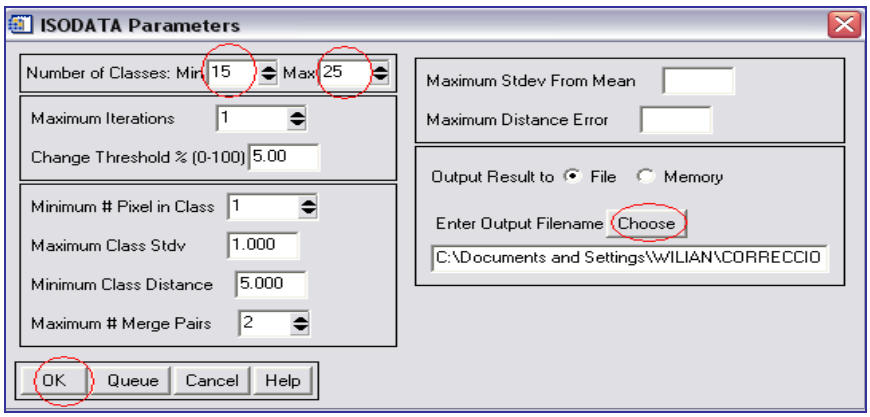


Figura i.70 Ventana desplegada, donde se debe seleccionar un rango mínimo y uno máximo de clases.

Paso 4. Resultado

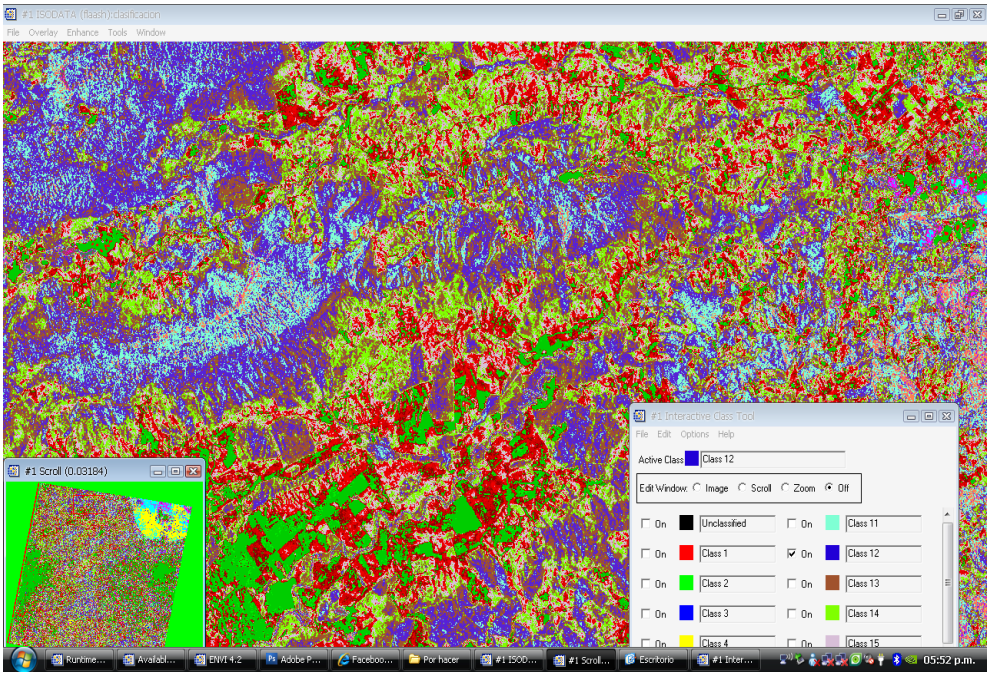


Figura i.71 Resultado de la Clasificación no supervisada.

i.1.1.13 Clasificación No Supervisada en ERDAS

Paso 1. Seleccionar *Viewer* para mostrar la imagen. (Fig. i.72).

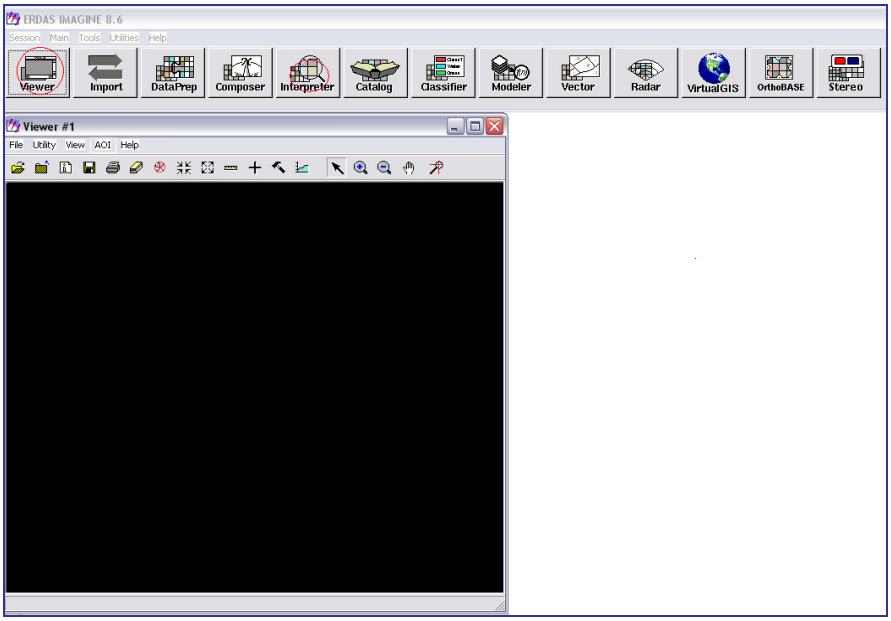


Figura i.72 Ventana desplegada, donde se selecciona *Viewer* mostrando la imagen.

Paso 2. Con el *Viewer* abierto seleccionar *interpreter→utilidades →layer stack* (Fig. i.73).

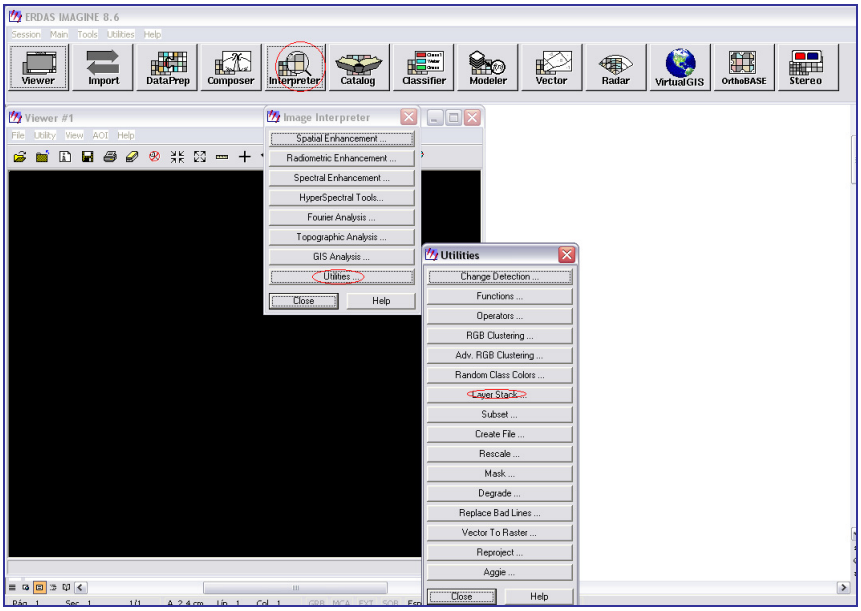


Figura i.73 Venta desplegada, donde muestra el *Viwer* abierto, seleccionado las opciones para *layer stack.*

Paso 3. Con el *Layer Stack* guardar la corrección de imagen *flaash* para las primeras 3 (1-2-3) bandas y luego hacerlo con las siguientes 3 bandas (4-5-6) todo esto para tener la imagen corregidas en *.Img del 1-6. (Fig. i.74).

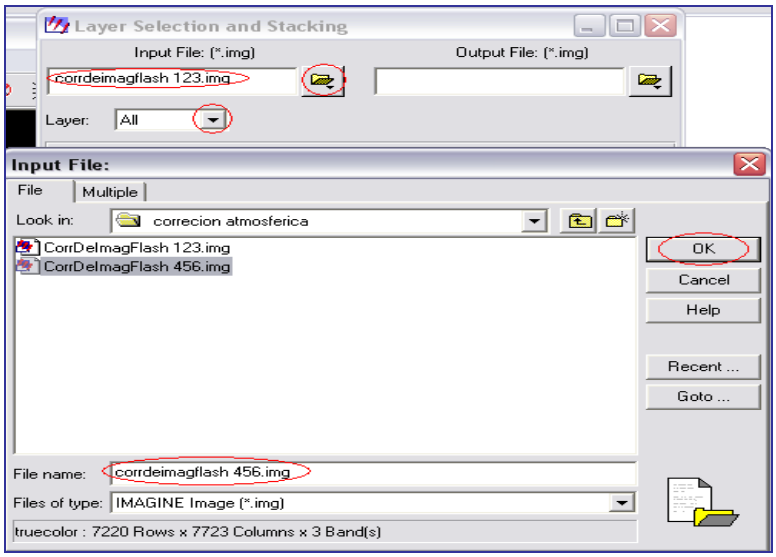


Figura i.74 Ventana desplegada, indicando como guardar la corrección de imagen flash para las bandas.

Paso 4. Obtener la corrección de las 6 imágenes a punto *image*, guardar. (Fig. i.75).

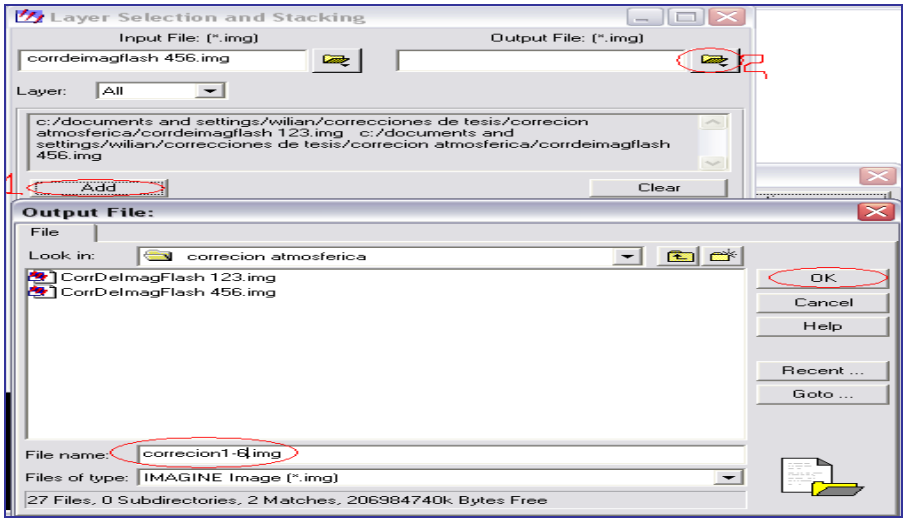


Figura i.75 Ventana desplegada, donde se obtiene la corrección de las 6 imágenes.

Paso 5. Guardar la 6 imágenes hacer clic en *OK* para corrección. (Fig. i.76)

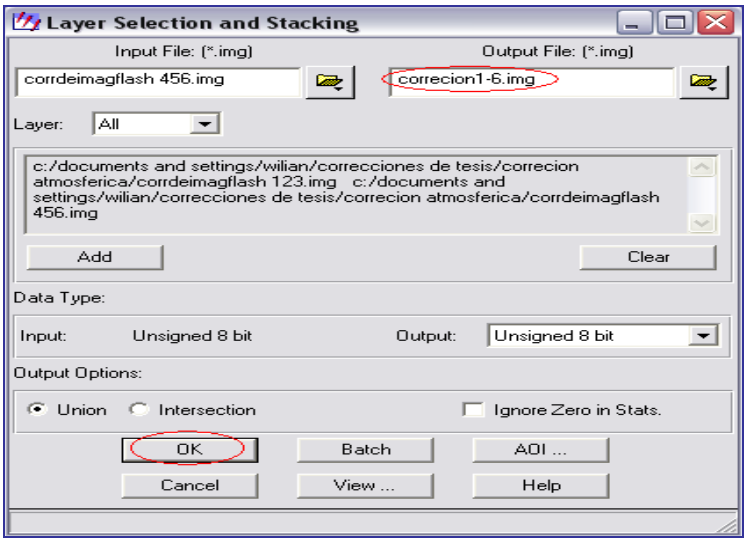


Figura i.76 Ventana desplegada, donde se guardan las 6 imágenes para su corrección.

Paso 6. Corrección

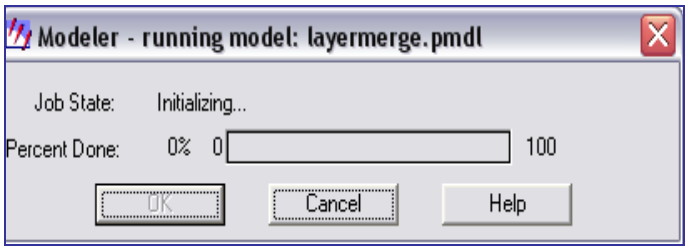


Figura i.77 Ventana desplegada, donde se realiza la corrección.

Paso 7. Abrir *Erdas* nuevamente y hacer clic a *classifier*, Clasificación no supervisada. (Fig. i.78).

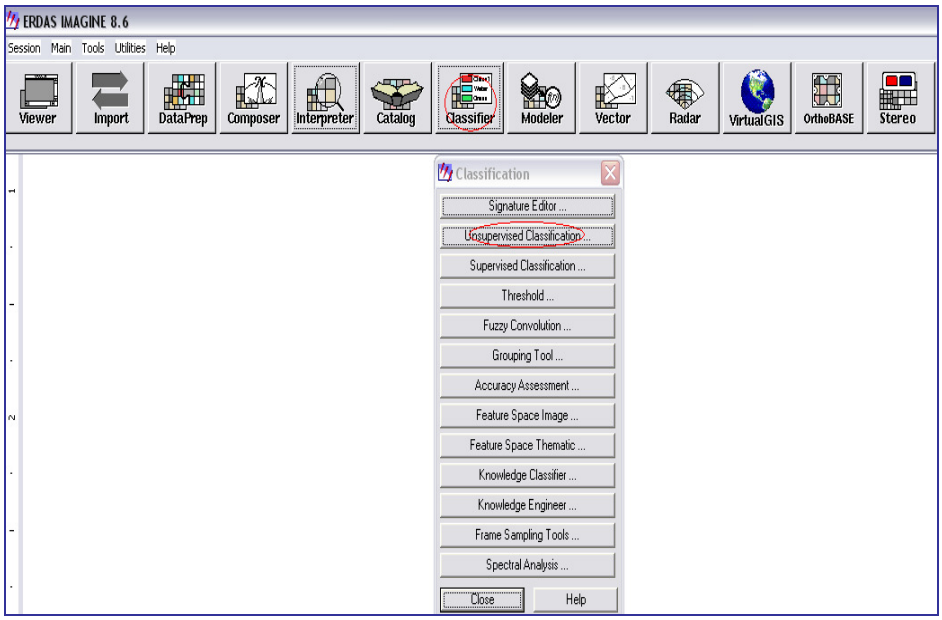


Figura i.78 Ventana desplegada para realizar la clasificación no supervisada en *Erdas.*

Paso 8. Abrir el *Recent*, obtener el archivo guardado anteriormente en *Envi* y así poder tener la clasificación no supervisada en *Erdas*.

i.1.1.14 Índice de Vegetación

Paso 1. Seleccionar *Interpreter---Spatial Enhancement---Índice*. Buscar la imagen corregida en *Flaash* de 1-6 (Fig. i.80).

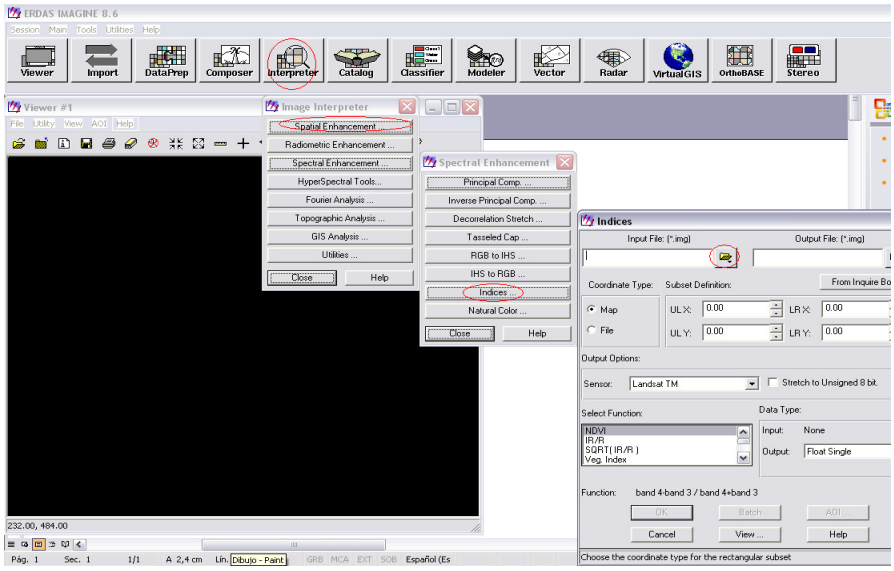


Figura i.80 Ventana desplegada para determinar el índice de vegetación.

Paso 2. Seleccionar la imagen corregida en *Flaash* 1-6 como archivo de entrada. Generar una de salida llamado índice. (Fig. i.81). El resultado será el índice de vegetación.

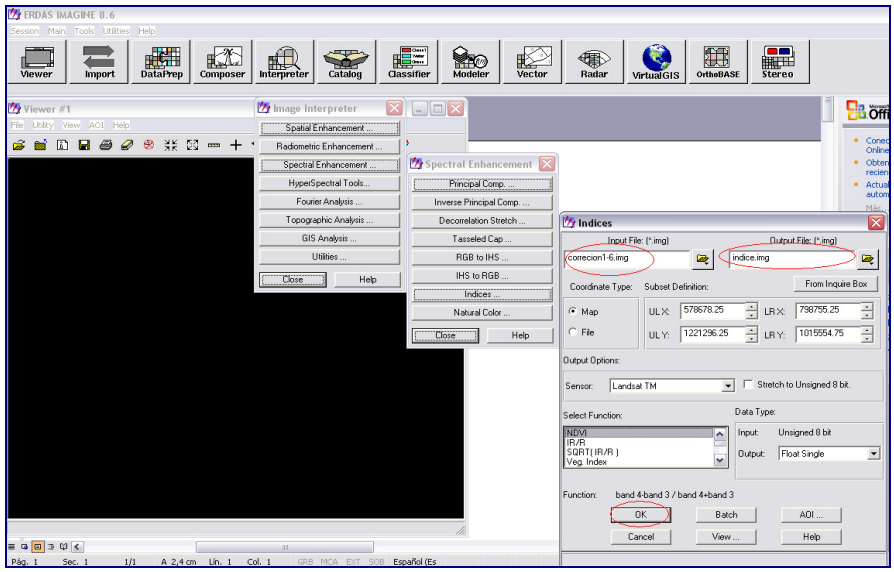


Figura i.81 Ventana desplegada, donde se selecciona la imagen corregida en *Flaash* 1-6.

i.1.15. Clasificación supervisada

Se trabaja con el programa *Erdas*, mediante los siguientes pasos:

Paso 1. Seleccionar el *VIEWER*. (Fig. i.82).

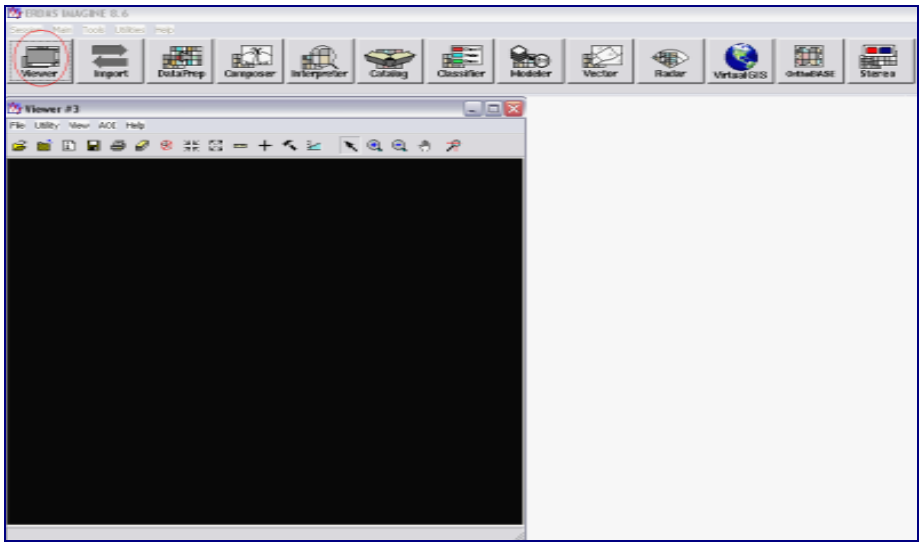


Figura i.82 Ventana *Viewer* desplegada mediante *Erdas.*

Paso 2. Abrir la carpeta *Open File* seleccionar la *Imagen en Flash 1-6.Imag*, antes corregida, hacer clic en *OK*. (Fig. i.83).

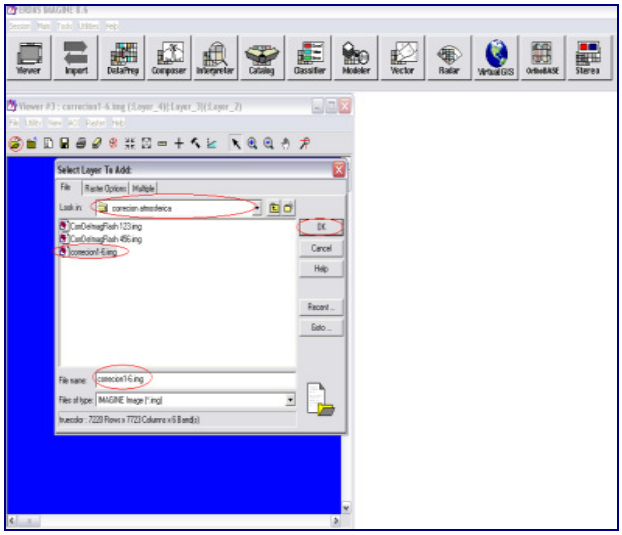


Figura i.83 Ventana desplegada, donde se abre la carpeta seleccionada en *Flaash*.

Paso 3. Seguidamente hacer clic derecho del *Mouse*, seleccionar *Fit Image To Window* (Fig. i.84). Desplegar la imagen a corregir.

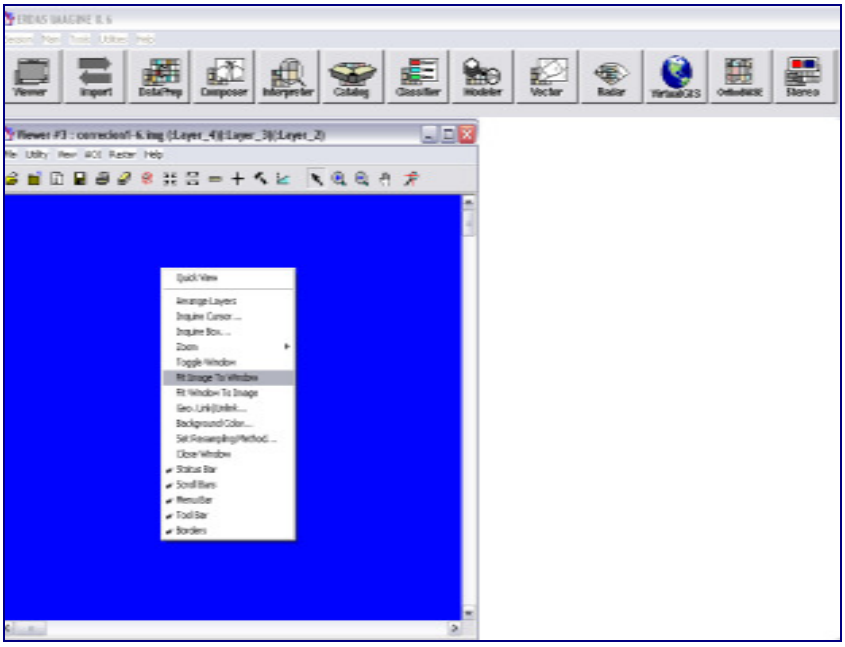


Figura i.84 Ventana donde se despliega la imagen a corregir.

Paso 4. En el menú principal del *Viewer* seleccionar *Raster* → *Tools*. (Fig. i.85). Luego en el menú del Programa *Classifier* → *Signature Editor*, ya seleccionadas estas herramientas

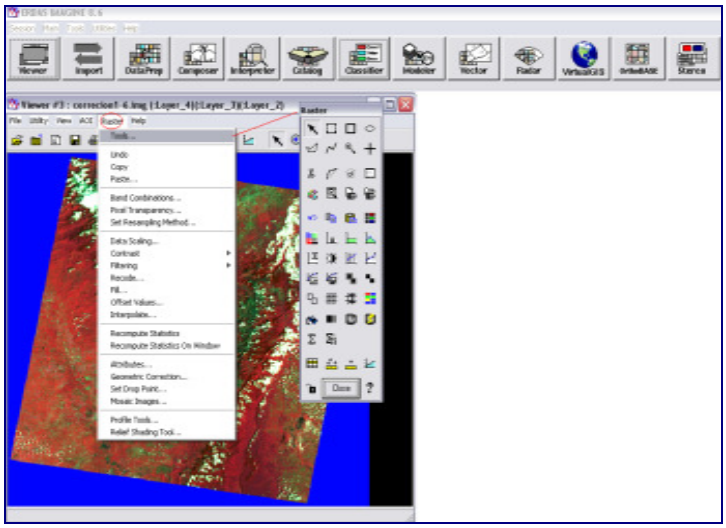


Figura i.85 Ventana desplegada de *Viewer*, donde se selecciona *Raster*.

Paso 5. Marcar la clase que se quiere en la imagen con la herramienta del Tools, envíar al *Signature Editor*, donde se va guardando la cantidad de clase q se escojan, ya seleccionadas las clases se guardan en el *Signature Editor* en un archivo **.sig* (Fig. i.86).

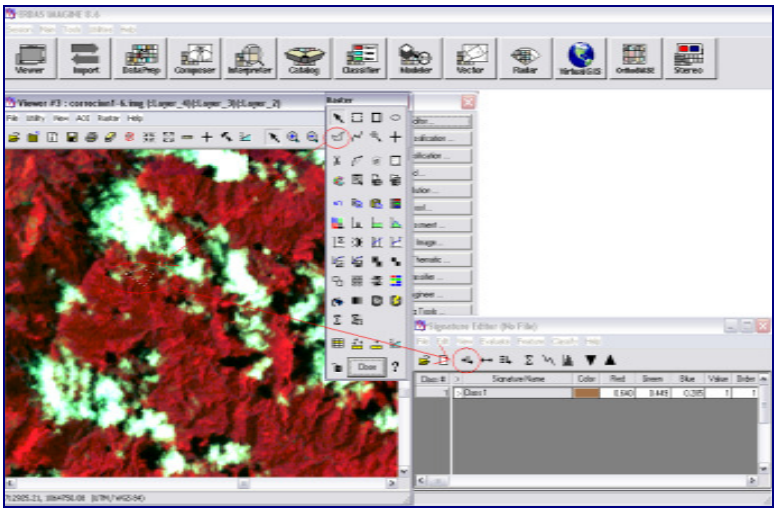


Figura i.86 Ventana desplegada, donde se marca la clase de la imagen que se desea obtener.

Paso 6. Luego de guardar el archivo.sig, seleccionar en el menú *Classifier* → *Supervised Classification*, despliegar la ventana *Supervised Classification*, donde primero se va guardar la Imagen en Flash 1-6.Imag, segundo el *Signature Editor.Sig*, y por último el archivo de clasificación de salida, luego se hace clic en *OK* y se guarda la corrección. Seguidamente para realizar el cambio de colores en los pixeles de la clases.

Paso 7. Abrir la Clasificación Supervisada anteriormente guardada, desplegar la imagen con un color grisáceo dado el cambio, seleccionar *Raster* → *Attributes* (Fig.i.87).

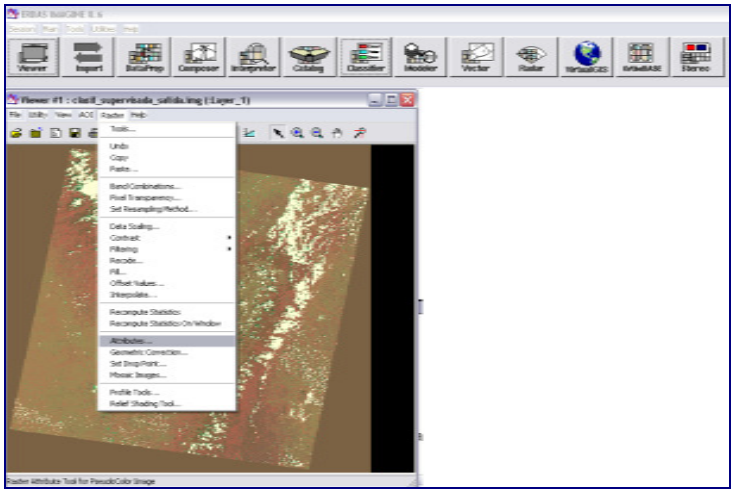


Figura i.87 Ventana desplegada, donde se abre la clasificación supervisada, luego desplegar la imagen

Paso 8. Desplegar el *Raster Signatura*, con las clases antes seleccionadas, se cambia de color los píxeles. Realizado el cambio en los colores, la imagen comenzara a cambiar los píxeles de acuerdo a las clases tomadas en el *Signature Editor*, se selecciona *File*→*Save*, y se guarda la corrección realizada.

i.1.1.16 Firmas Espectrales – Programa ERDAS

Paso 1. Abrir el archivo Clasificación supervisada.*imag*→*Raster*→*Signature Editor*, con estos componentes abiertos seleccionar clases para hacer la comparación entre píxeles de la imagen y así poder obtener los resultados. (Fig. i.88)

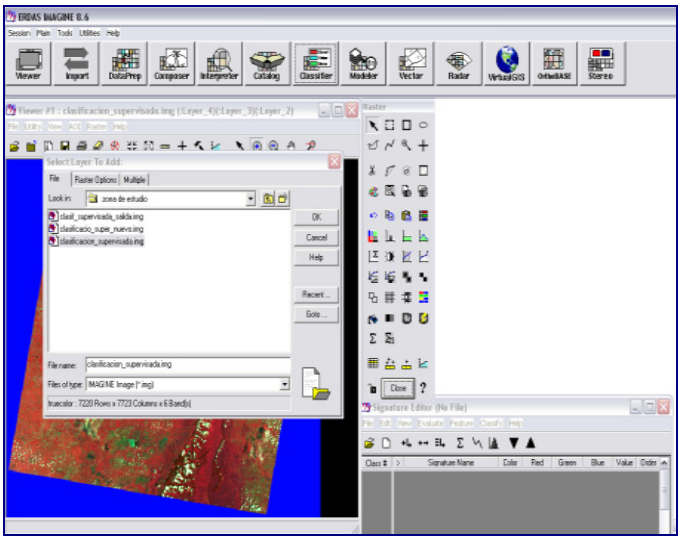


Figura i.88 Ventana desplegada para realizar la comparación entre pixeles

Paso 2. Seleccionar las clases, se toma el Paso 3 de esta imagen ( ) agregar un histograma (X, Y) el cual nos muestra la interpretación de cada clase seleccionada. (Fig. i.89)

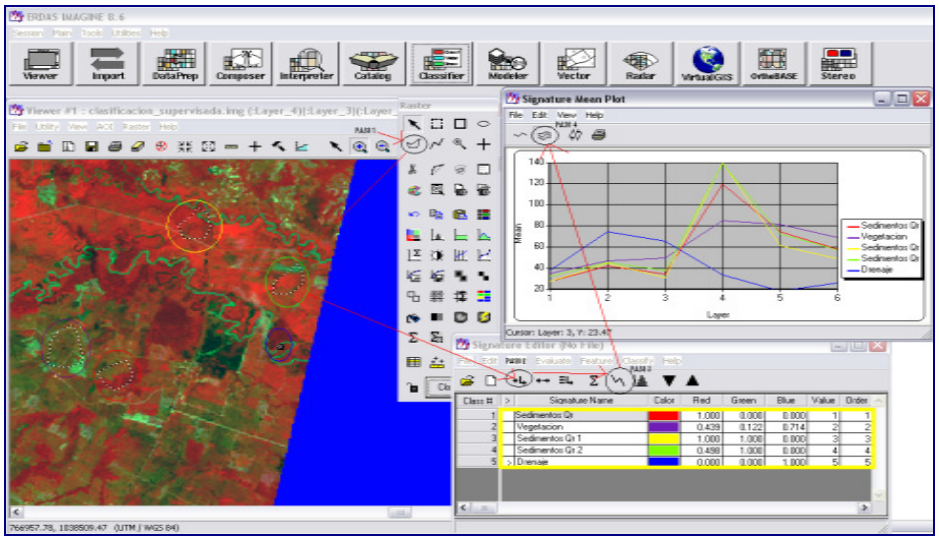


Figura i.90 Ventana desplegad, donde se muestra el histograma (X, Y) mostrando la interpretación de cada clase seleccionada.

i.1.1.17 Cociente de Banda

Paso 1. Hacer clic en *File* → *Open Image File*, seleccionar la corrección 1-6 en *Flash.* (Fig. i.91).

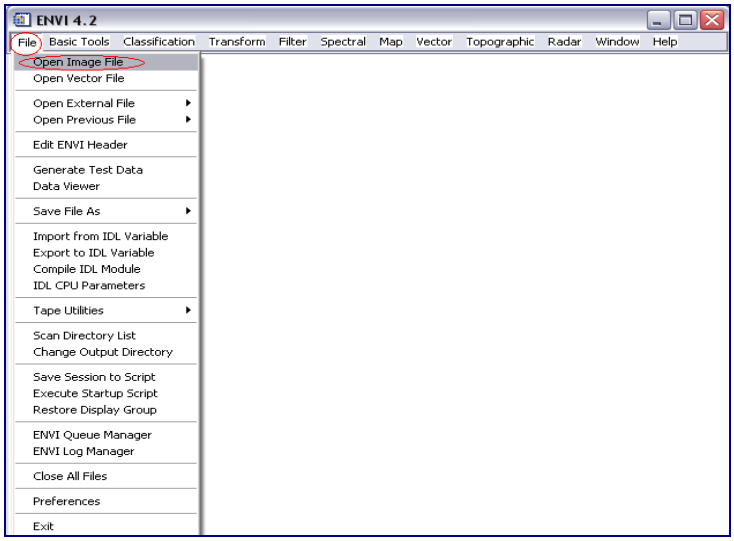


Figura i.91 Ventana desplegada para el cociente de bandas.

Paso 2. Seleccionar *Basic Tool---Band Math*. Desplegar la ventana Band Math, aquí se realizara una operación matemática con bandas (b1+b3/b5) →Clic→*OK*. (Fig. i.92)

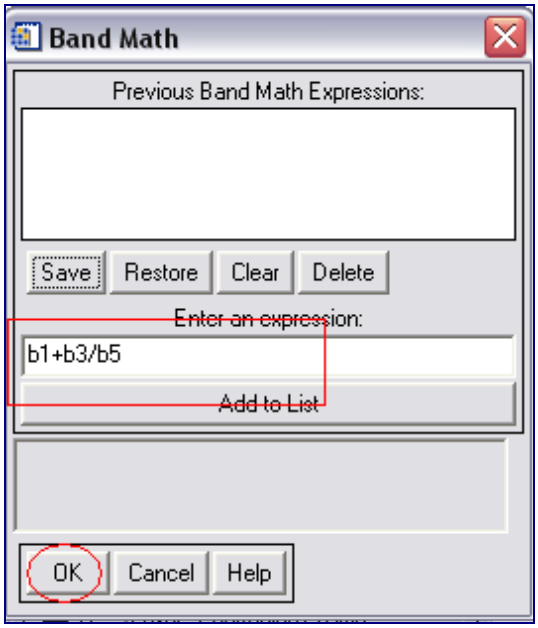


Figura i.92 Ventana desplegada, donde se realiza una operación matemática con las bandas.

Paso 3. Definir los parámetros de cada banda seleccionada, hacer Clic→*Choose*, buscar la carpeta donde se va a guardar → *OK*. (Fig. i.93).

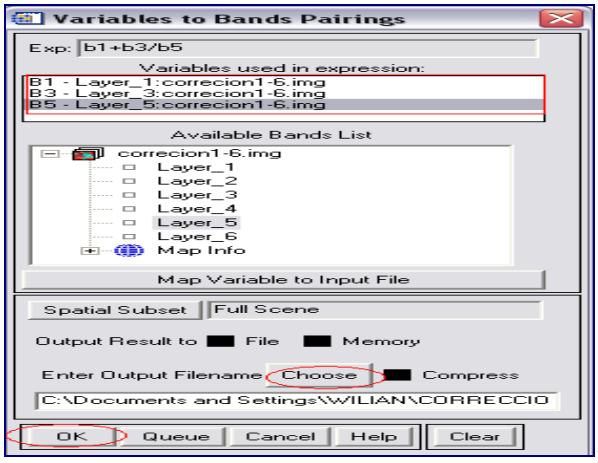


Figura i.93 Ventana desplegada, donde se definen los parámetros para cada banda.