

**DETERMINACION DE LA PRESENCIA DE HIDROCARBUROS EN SUPERFICIE  
EN LA ZONA LLANO SUR, CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES,  
MEDIANTE SENSORES REMOTOS ESPACIALES APOYADOS EN  
GEOQUIMICA DE SUPERFICIE**

**LILIANA MARIA PLATA SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DETERMINACION DE LA PRESENCIA DE HIDROCARBUROS EN SUPERFICIE  
EN LA ZONA LLANO SUR, CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES,  
MEDIANTE SENSORES REMOTOS ESPACIALES APOYADOS EN  
GEOQUIMICA DE SUPERFICIE**

**LILIANA MARIA PLATA SARMIENTO**

**Director**

JORGE EDUARDO PINTO VALDERRAMA  
Geólogo M.Sc

Trabajo de Grado para optar el título de  
Magister en Geología

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA  
ESCUELA DE GEOLOGIA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

A Alexander

A mi familia

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los funcionarios de Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), y a los profesores de la escuela de geología, quienes en conjunto llevaron a cabo el convenio entre las dos instituciones para la realización de este y otros trabajos de maestría.

También agradezco a los estudiantes de pregrado Laura, Nelly y José por el aporte que realizaron a este proyecto.

Especial agradecimiento a todas aquellas personas que aportaron sus conocimientos para realizar este trabajo.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION .....	19
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	21
2. GENERALIDADES .....	22
2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO .....	22
2.2 SUELOS Y SUS USOS .....	25
2.3 CLIMA .....	27
3. MARCO GEOLOGICO.....	27
3.1 ESTRATIGRAFÍA.....	31
3.1.1 Formación Mirador.....	32
3.1.2 Formación Carbonera.....	34
3.1.3 Formación León.....	34
3.1.4 Formación Guayabo .....	35
3.2 ESTRUCTURAL.....	38
4. MARCO TEORICO .....	40
4.1 GEOQUÍMICA DE SUPERFICIE.....	40
4.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTROMETRÍA.....	43
4.3 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN .....	45
4.4 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DEL SUELO.....	52

5. ANTECEDENTES .....	54
6. METODOLOGIA .....	59
6.1 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	60
6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES .....	63
6.2.1 Imágenes LANDSAT .....	63
6.2.2 Imágenes ASTER .....	66
6.2.3 Imágenes RAPIDEYE .....	69
6.3 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	71
6.3.1 Corrección Geométrica .....	72
6.3.2 Corrección Radiométrica .....	74
6.3.3 Corrección atmosférica .....	76
6.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES .....	77
6.4.1 Clasificación de imágenes .....	78
6.4.2 Ratio de bandas e índices de vegetación .....	78
6.4.3 Análisis de componentes principales (PCA) .....	78
6.4.4 Calculo de temperatura superficial .....	79
6.5 ESPECTROMETRIA DE CAMPO .....	79
7. RESULTADOS.....	87
7.1 DATOS GEOQUIMICA DE SUPERFICIE .....	87
7.2 ANÁLISIS VISUAL DE IMÁGENES.....	92
7.2.1 Densidad de drenajes .....	95
7.2.2 Interpretación Geológica.....	100
7.2.3 Interpretación Geomorfológica.....	105
7.3 RATIO Y ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).....	109

7.3.1 Imágenes Landsat .....	111
7.3.2 Imágenes Aster.....	126
7.4 CALCULO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL .....	133
7.4.1 Algoritmo Monowindow.....	134
7.4.2 Algoritmo Split Window (SWA) .....	139
7.5 ESPECTROMETRÍA DE CAMPO .....	144
7.6 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	160
7.6.1 Extracción de endmembers .....	160
7.6.2 Clasificación SAM.....	163
8. INTEGRACION Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	170
8.1 POLIGONO LLANOSSUR.....	170
8.2 POLIGONO GUEJAR.....	179
9. CONCLUSIONES .....	183
10. RECOMENDACIONES.....	186
BIBLIOGRAFIA.....	187

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización de los polígonos Guejar y LlanoSur. ....	24
Figura 2. Mapa de vías de acceso a los polígonos Guejar y LlanoSur .....	25
Figura 3. Distribución de las cuencas sedimentarias en Colombia .....	30
Figura 4. Contexto estratigráfico general hacia el sur de la cuenca de los Llanos Orientales, mostrando la disposición de las formaciones sedimentarias. ....	32
Figura 5. Segmento de columna estratigráfica de la Formación Caja dentro de la plancha 306 Puerto Lleras. ....	37
Figura 6. Marco estructural de la cuenca de los Llanos Orientales .....	40
Figura 7. Modelos de alteración de los suelos y sedimentos inducida por las microfiltraciones de hidrocarburos. ....	42
Figura 8. Espectro electromagnético .....	43
Figura 9. Firmas espectrales de la vegetación según su estado de estrés.....	47
Figura 10. Firma espectral de los suelos según su contenido de humedad. ....	53
Figura 11. Firma espectral del suelo según el tamaño de las partículas .....	54
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología seguida.....	62
Figura 13. Distribución de los path y row de las imágenes LANDSAT para Colombia. Resaltado en rosa el path 7, row 58 que cubre el área de interés.....	65
Figura 14. Quicklook de las imágenes ASTER obtenidas para el área de interés. Combinación RGB 321. ....	69
Figura 15. Quicklook de la imagen Rapideye adquirida para la zona del polígono LlanoSur .....	70
Figura 16. Introducción de los parámetros para corrección atmosférica en el módulo FLAASH en el software ENVI 5.1.....	77

Figura 17. Distribución de puntos con mayor contenido de gases totales para la toma de firmas espectrales en campo. ....	81
Figura 18. Toma de firmas espectrales en campo, a) Equipo Field Spect ASD; b) Calibración de fibra óptica con espectralon (blanco de referencia); c) Accesorio Contac Probe para toma de firmas en suelos y rocas. ....	82
Figura 19. Trazado de transectas para la toma de firmas espectrales .....	83
Figura 20. Firma espectral de vegetación tomada en campo, a) Firma con ruido; b) firma espectral luego del suavizado.....	84
Figura 21. Procedimiento para generar una librería espectral en el software ENVI .....	85
Figura 22. Transformación de una firma hiperespectral a una firma multiespectral según las bandas del sensor de interés. Procedimiento en el software ENVI 5.1. ....	86
Figura 23. Malla de muestreo de suelos para gasometría a) puntos de muestreo para el polígono Guejar; b) Puntos de muestreo para el polígono LlanoSur .....	89
Figura 24. Contenido de gases en suelos para los polígonos .....	91
Figura 25. Distribución general de los drenajes .....	93
Figura 26. Apariencia de los drenajes sub-dendríticos presentes en el área.....	94
Figura 27. Drenajes retorcidos o meandriformes del área general, formando los ríos principales de la región. ....	95
Figura 28. Imagen Rapideye del área correspondiente al polígono LlanoSur .....	98
Figura 29. Densidad de drenaje según estadísticas focales de la red de drenajes del polígono LlanoSur, A) Distribución de densidad según 10 categorías; B) Distribución de densidad según 2 categorías. ....	99
Figura 30. Mapeo de unidades litológicas de acuerdo a las características visuales, a) unidad Umd, b) Unidad Usc2, c) Unidad Usc1, d) Unidad Ua2, e) Unidad Ua1, f) Unidad Qal, g) Unidad Qpr, h) Unidad Qtz .....	103
Figura 31. Mapa de distribución de unidades litológicas identificadas a través del análisis visual de imágenes Landsat.....	104

Figura 32. Distribución de unidades geomorfológicas en un área general que contiene los polígonos Guejar y LlanoSur. ALL-LLSO (Altillanura); ALL-AS (Abanico Sub-creciente); ALL-CF (Cauce fluvial principal); ALL-LLI (Llanura de Inundación); ALL-MTA (Mesetas y terrazas agradacionales); ALL-TFA (Terrazas fluvio-aluviales); SM-CE (Crestas estructurales); SM-MCO (Mesetas, Cuestas y superficies onduladas); SM-MMR (Mesetas y montañas ramificadas).....	108
Figura 33. Imágenes falso color RGB para el polígono LlanoSur a) RGB PC1, PC5, PC6; b) PC1, PC2, PC5.....	113
Figura 34. Imagen IMG_8011 falso color RGB para el polígono Guejar a) RGB PC3, PC4, PC5, b) RGB PC2, PC4, PC5. ....	114
Figura 35. Espectro de absorción de la clorofila a y b y pigmentos .....	115
Figura 36. Imagen IMG_8011 para el polígono LlanoSur luego de aplicado PCA sobre los ratios, a) RGB PC5, PC6, PC8; b) RGB PC1, PC6, PC8. ....	117
Figura 37. Imagen IMG_8011 del polígono Guejar luego de aplicar PCA sobre los ratios a) RGB PC1, PC6, PC8; b) RGB PC1, PC2, PC6.....	118
Figura 38. Imagen IMG_1062 del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA sobre los ratios del área Llano Sur, a) RGB PC4, PC5, PC8 y b) PC1, PC2, PC5.....	119
Figura 39. Imagen IMG_1062 del área Guejar luego de aplicar PCA en una combinación RGB PC1, PC2, PC5 .....	120
Figura 40. Imagen IMG_4090 del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA a) RGB PC4, PC5, PC6, b) RGB PC1, PC2, PC6 .....	122
Figura 41. Imagen IMG_4090 del polígono Guejar luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC2, PC6, b) RGB PC4, PC5, PC4. ....	123
Figura 42. Imagen DATASET de LANDSAT del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC5, PC6, b) RGB PC1, PC2, PC5.....	125
Figura 43. Imagen DATASET de LANDSAT luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC4, PC5, b) RGB PC1, PC2, PC5. ....	126
Figura 44. Imagen ASTER IMG_1 para el polígono Guejar luego de aplicar ratios sobre las bandas a) ratio B3/B1,b) ratio B3/B2,c) ratio B3/B4, d) ratio B3/B5,e) ratio B3/B6,f) ratio B3/B7,g) ratio B3/B8, h) ratio B3/B9.....	128

Figura 45. Grafica tipo ScatterPlot a) ratio B3/B6 Vs B3/B7, b) ratio B3/B8 Vs B3/B7, mostrando la correlación existente entre las bandas .....	129
Figura 46. Imagen IMG_1 del área Guejar luego de aplicar PCA sobre la imagen de los ratios, a) PC1, PC 2, PC3 y b) PC 3, PC4, PC 5.....	130
Figura 47. Imagen ASTER IMG_2 del área LlanoSur luego de aplicar ratios sobre las banda, a) ratio B3/B1,b) ratio B3/B2, c) ratio B3/B4, d) ratio B3/B5 e) ratio B3/B6, f) ratio B3/B7,g) ratio B3/B8, h) ratio B3/B9.....	132
Figura 48. Imagen ASTER IMG_2 para el área LlanoSur luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC2, PC3 b) RGB PC1, PC6, PC7.....	133
Figura 49. Pasos para obtener los valores de temperatura de superficie siguiendo el algoritmo Monowindow. ....	138
Figura 50. Mapa de distribución de temperaturas sobre el polígono LlanoSur tomando la imagen Landsat IMG_8011, aplicando el algoritmo Monowindow. ...	141
Figura 51. Mapa de distribución de temperaturas sobre el área LlanoSur tomando la imagen LANDSAT IMG_7347, aplicación de algoritmo Monowindow.....	142
Figura 52. Mapa de distribución de temperaturas sobre el área LlanoSur tomando la imagen LANDSAT IMG_1062, aplicación de algoritmo Monowindow.....	143
Figura 53. Vista de los puntos visitados para la toma de firmas espectrales a) punto 1, b) punto 13, c) punto 3, d), e) punto 11, f) punto 4, g) punto 14, h) punto 15.....	149
Figura 54. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto1. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	150
Figura 55. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto2. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	151
Figura 56. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto3. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y	

corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	152
Figura 57. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto11. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	153
Figura 58. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto13. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	154
Figura 59. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto14. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	155
Figura 60. Aplicación de índices de vegetacion sobre la transecta del punto15. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda. ....	156
Figura 61. Grafica de firmas espectrales del suelo tomadas en algunos puntos de las transectas muestreadas. ....	159
Figura 62. Distribución de endmembers con mayor presencia dentro del polígonos LlanoSur. ....	161
Figura 63. Endmembers extraídos de la imagen Aster del polígono Guejar. Las firmas espectrales corresponden en su mayoría a vegetación. ....	162
Figura 64. Distribución de endmembers con mayor abundancia dentro del polígono Guejar. ....	163
Figura 65. Clasificación supervisada por el método SAM de la imagen ASTER IMG_1 del área Guejar, a) imagen clasificada a partir de las firmas espectrales de vegetación estresada (7 clases), b) imagen clasificada a partir de firmas espectrales de vegetación sana (3 clases). ....	165

Figura 66. a) Firma espectral de la vegetación mostrando sus picos de absorción característicos, b) firmas espectrales extraídas de la imagen de vegetación estresada, c) detalle de pico de absorción presentes en la firma de vegetación extraídas. ....	167
Figura 67. Clasificación supervisada por el método SAM de la imagen ASTER IMG_2 del área LlanoSur, a) imagen clasificada a partir de las firmas espectrales de vegetación sana, b) imagen clasificada a partir de firmas espectrales de vegetación estresada, c) Clasificación de tres clases de vegetación; sana, estresada y disminuida, d) firmas espectrales de vegetación sana, e) firmas espectrales de vegetación estresada, f) firmas espectrales de las coberturas representativas del área. ....	169
Figura 68. Comparación densidad de drenajes con la distribución de unidades presentes en el área. A) Densidad de drenaje, B) Unidades geológicas presentes en el área, obtenidas a través de fotointerpretación. ....	171
Figura 69. A) Distribución de drenajes y unidades litológicas mostrando la tendencia de lineamiento de los drenajes, los triángulos rojos representan los puntos con mayor contenido de gases en suelo b) Aplicación de PCA sobre los ratios calculados sobre la imagen Landsat IMG_8011. ....	173
Figura 70. Calculo de temperatura de superficie (LST) en imágenes Landsat, a) Imagen Landsat IMG_8011, b) Imagen IMG_7347, c) Imagen IMG_ 1062. ....	176
Figura 71. Comparación contenido de gases vs clasificación, a) Geología del área y distribución de puntos con alto contenido de gases; b) Resultado de la clasificación de la imagen a partir de la extracción de endmembers de la vegetación. ....	178
Figura 72. Lineamiento del Rio Ariari, esta estructura controla los patrones de drenaje a nivel local y regional. ....	180
Figura 73. Relación entre los parámetros encontrados en la zona Guejar, a) distribución de drenajes y puntos con alto contenido de gases; b) distribución de unidades litológicas; c) resultado de la clasificación a partir de endmembers de vegetación con estrés. ....	182

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Espesor de las formaciones presentes en la zona sur de la cuenca de los Llanos Orientales .....	31
Tabla 10. Unidades litológicas y sus características principales encontradas a través del análisis de imágenes Landsat. ....	100
Tabla 11. Matriz eigenvector para los polígonos de la imagen IMG_8011 de las áreas LlanoSur y Guejar de la imagen en valores de reflectancia. ....	112
Tabla 12. Matriz eigenvector de los ratios de la imagen IMG_8011 de los polígonos LlanoSur y Guejar. ....	116
Tabla 13. Matriz eigenvector de la imagen IMG_1062 para el área LlanoSur. ....	118
Tabla 14. Matriz Eigenvector de la imagen IMG_1062 para el área Guejar .....	120
Tabla 15. Matriz Eigenvector del para la imagen IMG_4090 para los polígonos LlanoSur y Guejar. ....	121
Tabla 16. Imágenes LANDSAT seleccionadas para realizar data set y aplicar PCA .....	123
Tabla 17. Matriz Eigenvector del dataset de imágenes LANDSAT. ....	124
Tabla 18. Matriz Eigenvector de la imagen IMG_ DATASET para el área del polígono Guejar. ....	126
Tabla 19. Matriz Eigenvector de la imagen ASTER IMG_1 del área Guejar.....	129
Tabla 20. Matriz Eigenvector de la imagen ASTER IMG_2 para el área LlanoSur. ....	131
Tabla 21. Constantes de calibración para cálculo de temperaturas de brillo en las imágenes LANDSAT .....	135
Tabla 22. Valore de transmitancia en función de la variable w .....	137
Tabla 23. Observaciones generales de las áreas donde se encuentran localizados cada uno de los puntos visitados para la toma de los datos de espectrometría.....	147

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACION DE LA PRESENCIA DE HIDROCARBUROS EN SUPERFICIE EN LA ZONA LLANO SUR, CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, MEDIANTE SENSORES REMOTOS ESPACIALES APOYADOS EN GEQUIMICA DE SUPERFICIE\*

**AUTOR:** LILIANA MARIA PLATA SARMIENTO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Sensores Remotos, Espectrometría, Microfiltraciones de gases, Firmas Espectrales

### DESCRIPCION

Los gases proveniente de yacimiento petrolífero migran hacia la superficie generando zonas de óxido-reducción, favoreciendo una amplia gama de cambios químicos y mineralógicos, incluyendo cambios biológicos como el aumento de bacterias que reducen el contenido de oxígeno en el suelo, lo cual conlleva un desarrollo en el estrés de la vegetación. Estos cambios han sido explicados por un modelo de alteración desarrollado por Shumacher 1996.

Los elementos en la superficie (minerales, rocas, vegetación, suelos), poseen rasgos espectrales particulares detectables a través de las imágenes satelitales, con las cuales se pueden cartografiar la distribución en la superficie del material de interés.

Las imágenes satelitales ASTER y RAPIDEYE son sometidas a pre-procesamiento, donde se realiza una corrección geométrica y corrección atmosférica para obtener valores de reflectancia. En la etapa de procesamiento se extraen las firmas espectrales de la vegetación en las zonas donde hay evidencia de altos contenidos de gases. Con las firmas espectrales se aplican métodos de clasificación de imágenes como SAM. Se analizan visualmente las imágenes para determinar rasgos físicos que estén relacionados con los contenidos anómalos de gases. Se aplican índices de vegetación. A través de una serie de imágenes LANDSAT se calculó la temperatura de la superficie.

Por medio de análisis visual se determinó la relación existente entre el mayor número de puntos con alto contenido de gases y el comportamiento y distribución de la red de drenajes.

Las áreas con alto contenido de gases en zonas homogéneas muestran bajo índice vegetativo debido al estrés. La clasificación espectral SAM arroja correlación entre la

---

\* Tesis de Maestría

\*\* Facultad de Ingeniería Físico Química. Escuela de Geología. Director Jorge Eduardo Pinto Valderrama, Geólogo M.Sc.

zona con más puntos con alto contenido de gases y las firmas espectrales de la vegetación que muestran mayor estrés.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** DETERMINE THE PRESENCE OF HYDROCARBON IN SURFACE IN LLANOSUR ZONE, LLANOS ORIENTALES BASIN, THROUGH SPATIAL REMOTE SENSING SUPPORTED BY SURFACE GEOCHEMISTRY\*

**AUTHOR:** LILIANA MARIA PLATA SARMIENTO\*\*

**KEY WORDS:** Remote Sensing, Espectrometry, Gas Microseepage, Spectral Signatures

## **DESCRIPTION**

Gases from oil field migrate to the surface causing redox areas favoring a wide range of chemical and mineralogical changes, including biological changes such as increased bacteria which reduce the oxygen content in the soil, which makes developing in vegetation stress. These changes have been explained by an alteration model developed by Schumacher 1996.

Surface elements (minerals, rocks, vegetation, etc.), have particular spectral features detectable through satellital images, with which distribution can be mapped on the surface of the material of interest.

The RapidEye and ASTER imagery are subjected to pre-processing, where a geometric correction and atmospheric correction are performed to obtain reflectance values. In the processing stage the spectral signatures of vegetation are extracted in areas where there is evidence of high levels of gases. With the spectral signatures the SAM method classification was applied over ASTER imagery. LANDSAT Images are visually analyzed for physical features that are related to abnormal gas contents. Vegetation indices are applied. Through a series of LANDSAT images the surface temperature was calculated.

Through visual analysis was determined the relationship between the most of the waypoints with high gas content and the behavior and distribution of drainage network. Areas with high gas content in homogeneous areas show low vegetative index due to stress. The spectral classification SAM show correlation between the area with the most of the waypoints with high gas and spectral signatures of vegetation with high stress áreas.

---

\* Master Thesis

\*\* Faculty of Physic-Chemical Engineering Geology school. Director: Jorge Eduardo Pinto Valderrama, Geologist M.Sc.

## INTRODUCCION

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL), en convenio institucional con la Universidad Industrial de Santander (UIS) y su escuela de Geología han acordado llevar a cabo una serie de proyectos de investigación en el marco del programa académico de Maestría en Geología con el objeto de contribuir al desarrollo científico y tecnológico de la región.

La exploración de hidrocarburos no convencionales ha generado gran interés en la comunidad geológica debido a la disminución gradual de reservas de los recursos energéticos convencionales. En la cuenca de los Llanos Orientales existen registros de la presencia de arenas bituminosas y crudos extra pesados que fueron hallados a través de técnicas convencionales de exploración como perforación de pozos, gasometría y desarrollo de proyectos sísmicos, despertando el interés de la compañía en desarrollar estudios en el que se determine la calidad y cantidad de este recurso que puedan ser potencialmente explotables.

Ecopetrol S.A posee bloques exploratorios y de producción con considerable potencial de hidrocarburos no convencionales. Los Bloques CP16-CPO-17, Ariari, Caño Sur, se encuentran localizados en la cuenca de los Llanos Orientales, en el departamento del Meta, en la zona sur conocida como Zona Llano Sur, en esta se han definido dos polígonos denominados Guejar y LlanoSur en los que Ecopetrol ha llevado a cabo campañas de muestreo de suelos para determinar la presencia de gases en superficie.

La exploración de recursos naturales a través de sensores remotos se fundamenta en la premisa de que existen reservorios de hidrocarburos en un ambiente que favorecen la migración de sus partículas líquidas y/o gaseosas hacia la superficie generando alteraciones detectables a través de análisis directos como contenidos anómalos de gases, cambios en la composición de las rocas y suelos lo que

conlleva al desarrollo de variaciones en los tipos y vigor de la vegetación a lo largo de las áreas de microfiltraciones. Las características superficiales de la tierra pueden ser detectadas a través de sistemas de teledetección o sensoramiento remotos definiendo sus características espectrales, empleando técnicas de procesamiento y análisis de imágenes satelitales obtenidas a través de los diversos sistemas de observación terrestre disponibles.

El empleo de métodos de exploración por sensores remotos representa ventajas considerables desde el punto de vista económico debido a que se pueden determinar en una etapa inicial de exploración zonas o target de mayor potencial y encaminar técnicas más costosas a áreas más pequeñas. Otra ventaja, y quizás la más importante, es la disminución del impacto social y ambiental que la exploración de hidrocarburos representa para las zonas de interés.

Ecopetrol en años anteriores realizó un estudio a través de imágenes Aster y Landsat enfocado a la localización de puntos con escapes de crudo (macrofiltraciones) y zonas donde se encuentran expuestas las arenas bituminosas, mediante técnicas de clasificación espectral SAM, comparando la respuesta espectral de las áreas donde se conoce la presencia de las macrofiltraciones, con toda la imagen objeto de análisis. A través de este análisis se determinaron zonas con tendencia a la presencia de hidrocarburos.

Este trabajo se enfoca en la aplicación de algunas técnicas empleadas anteriormente por Ecopetrol y otros autores en otros países, sobre los polígonos que actualmente tiene Ecopetrol como puntos de interés (Guejar y LlanoSur). Las imágenes Aster, Landsat ETM, TM, OLI y las imágenes Rapideye son las imágenes de tipo multiespectral empleadas principalmente.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del trabajo realizado en esta tesis es identificar la presencia de hidrocarburos en el suelo (microfiltraciones de gases) a través de imágenes satelitales, en dos áreas de interés para Ecopetrol S.A, las cuales se encuentran localizadas en la zona sur de la cuenca de los Llanos Orientales donde se han realizado muestreos de suelo para determinación de contenido de gases.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Para lograr obtener este resultado se definieron los siguientes objetivos:

- Seleccionar una metodología para la búsqueda de microfugas de HC para la zona Llanos Sur, Cuenca Llanos Orientales, mediante el análisis de los trabajos realizados con técnicas de teledetección que permitan reducir el nivel de incertidumbre en las fases iniciales en la exploración de hidrocarburos.
- Identificar características espectrales de los minerales presentes en los suelos y vegetación sobre las zonas con presencia de hidrocarburos en profundidad y zonas con anomalías gasométricas en superficie mediante técnicas de espectrometría de campo
- Cartografiar zonas con anomalías geoquímicas y estrés en la vegetación asociadas a microfugas de hidrocarburos, mediante el análisis y procesamiento digital de imágenes satelitales seleccionadas

- Generar una base de datos georeferenciada que integre la información preexistente de datos de anomalías geoquímicas, geología del área, geomorfología, con los datos de anomalías obtenidas en el procesamiento de las imágenes satelitales para determinar zonas con potencial presencia de hidrocarburos y obtener mapas temáticos.

## **2. GENERALIDADES**

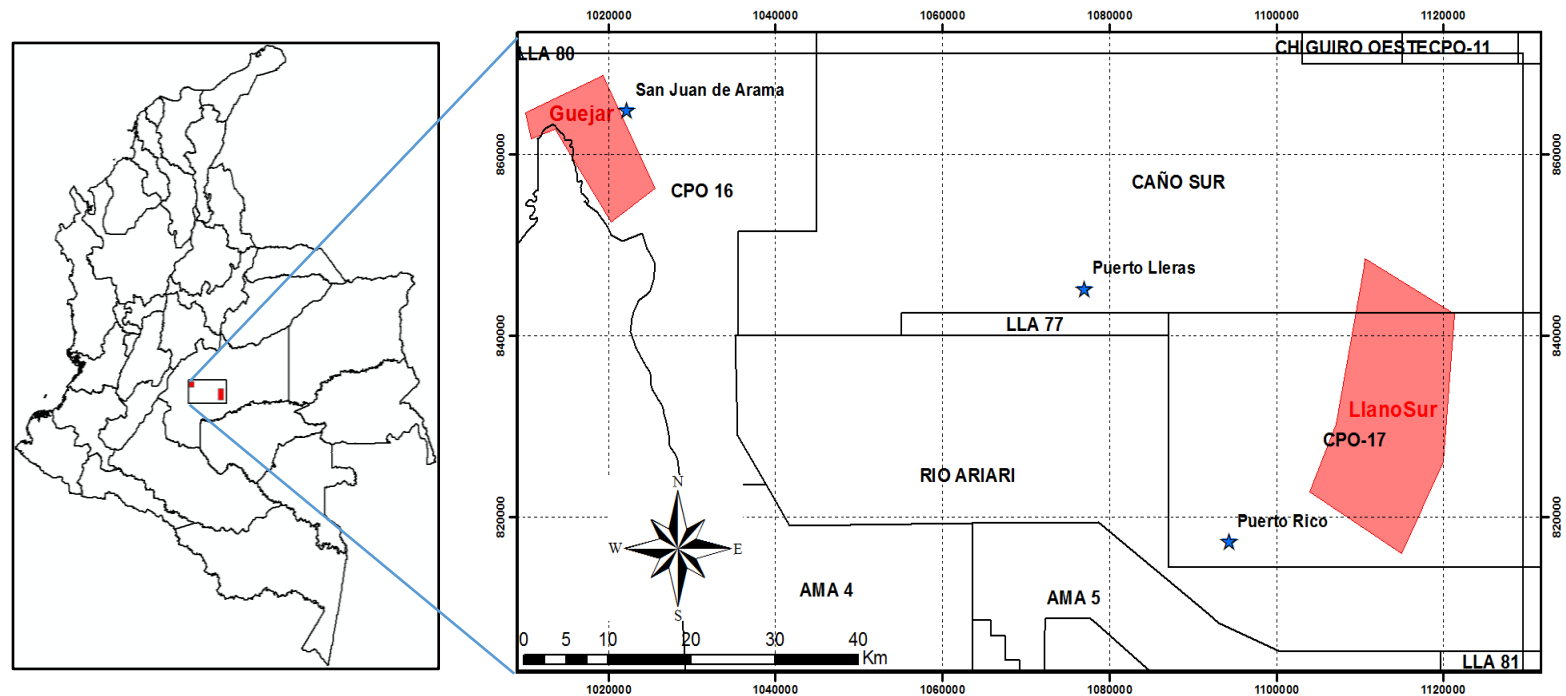
### **2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO**

El área de estudio corresponde a dos polígonos denominados GUEJAR y LLANOSUR, los cuales cuentan con un área aproximada de 142 y 342 Km<sup>2</sup> respectivamente, localizados en el departamento del Meta, en jurisdicción de los municipios de San Juan de Arama, Puerto Lleras y Puerto Rico entre los 03°53'11" y los 02°56'11" de latitud Norte, y los 73°03'05" y 73°55'06" de longitud Oeste. Las áreas pertenecen a los bloques exploratorios de Ecopetrol CPO-16 y CPO-17 respectivamente (Figura 1).

A las zonas se accede a través de la carretera nacional que comunica la ciudad de Bogotá con Villavicencio, siguiendo en dirección suroeste por la carretera principal que comunica con San José del Guaviare, en el departamento del Guaviare. A la altura del municipio de Granada se encuentra una variante que comunica al municipio de San Juan de Arama a unos 28 km aproximadamente hacia el oeste donde se encuentra el polígono del área Guejar. Siguiendo la carretera hacia el sureste se encuentra el área del polígono LlanoSur, pasando

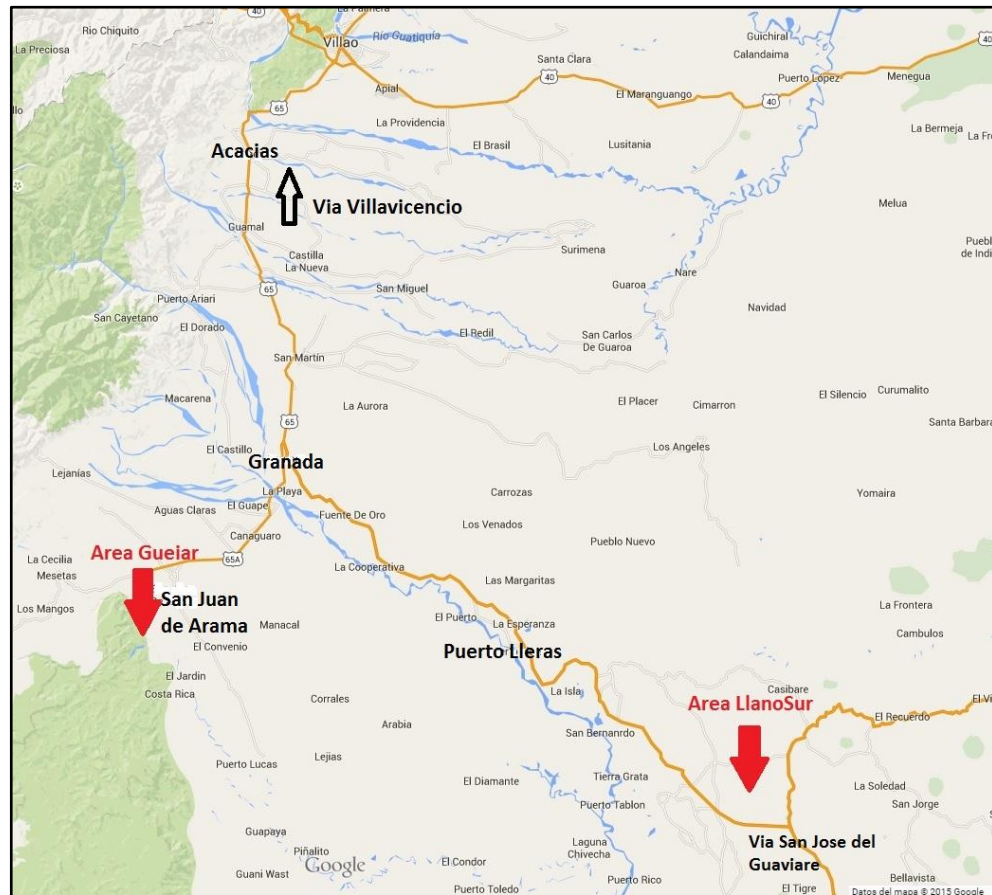
por los municipios de Fuente de Oro y Puerto Lleras en un recorrido de aproximadamente 98 Km (Figura 2).

**Figura 1. Localización de los polígonos Guejar y LlanoSur (áreas rojas) en el departamento de Meta. En la figura se observa la distribución de los bloques exploratorios y de producción del área.**



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos. Modificación Mapa de Tierras versión 2014 disponible en [www.anh.gov.co](http://www.anh.gov.co)

**Figura 2. Mapa de vías de acceso a los polígonos Guejar y LlanoSur con las principales vías de acceso y municipios de mayor relevancia**



Fuente: Mapa base de Google Maps <https://www.google.it/maps/@3.4268709,-73.2729527,9z>

## 2.2 SUELOS Y SUS USOS

La zona de los Llanos Orientales cuenta con un área aproximada de 170.000 km<sup>2</sup>, los cuales están clasificados según el CIAF (Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica - IGAC), en tres sistemas de tierras o paisajes: (1) el piedemonte, (2) las llanuras aluviales y (3) las altillanuras. Los cuales a su vez pertenecen a un macrosistema global de sabanas tropicales cuya

topografía permite la mecanización agrícola y cuyo suelo exige un manejo cuidadoso.

La altillanura está dividida en dos ecosistemas: la altillanura bien drenada (ABD), la cual tiene un potencial si se maneja racionalmente, para la producción de pastos y agricultura comercial e industrial; y la altillanura mal drenada (AMD), la cual puede ser dedicada a la ganadería tradicional extensiva y a actividades de zoo cría, piscicultura y de protección y conservación de la fauna y flora silvestre.

Una gran extensión de la ABD está cubierta por una sabana herbácea, típica de los suelos de baja fertilidad, que esta drenada por una multitud de caños y surcada por vallecillos estrechos que se alargan como franjas angostas de bosques de galería denominados localmente “morichales”. Se ha desarrollado en la ABD, en las últimas décadas, una agricultura comercial basada en palma africana, arroz, sorgo, soya, y frutales como los cítricos, mango y marañón. Es común en los ríos la pesca artesanal y comercial.

El uso tradicional de la sabana nativa de los Llanos Orientales es la ganadería extensiva de muy baja capacidad de carga. La introducción de pastos y leguminosas forrajeras adaptadas a las condiciones naturales de baja fertilidad de los suelos dominantes ha propiciado el establecimiento de ganaderías cada vez más intensivas<sup>1</sup>.

Los suelos de los Llanos Orientales se desarrollan sobre un manto de sedimentos aluviales arcillo-limosos provenientes de la Cordillera Oriental<sup>2</sup>.

Según la tabla de clasificación de la USDA (United States Department of Agriculture), estos suelos son de orden oxisol y ultisol, los cuales corresponden a suelos meteorizados de coloración rojiza, con presencia de óxidos de hierro y aluminio, cuarzo, caolinita y materia orgánica, considerados de baja fertilidad para

---

<sup>1</sup> Vera, R., Cere, C. 1985. Sistemas de Producción Pecuaria Extensiva: Brasil, Colombia, Venezuela. Informe Final del Proyecto ETES Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia, 530 p

<sup>2</sup> Brunnschweiler, D., 1972. The Llanos, Frontier of Colombia: Environment and Changing Land Use in Meta. Michigan State University, East Lansing, Michigan.

la agricultura. La pérdida de minerales esenciales de fácil intemperismo, causado por la lixiviación origina un alto grado de acidez en el suelo<sup>3</sup>.

### **2.3 CLIMA**

Los Llanos Orientales cuenta con una latitud baja (de 2 a 5 grados de latitud N), con una altitudes entre de 100 a 300 m.s.n.m, sus cielos son abiertos a la acción de los vientos en todas las direcciones excepto al oeste, donde se levanta la barrera de la cordillera Andina<sup>4</sup>. El clima está definido por el ritmo de los vientos y de las lluvias y su régimen térmico es elevado<sup>5</sup>. Las temperaturas más bajas se registran en épocas de lluvia, correspondiente a los meses de marzo a noviembre con picos más altos entre los meses de abril, mayo y junio, según reportes del IDEAM<sup>6</sup>, con una promedio anual de 22°C para las temperaturas más bajas, y 24.8°C para las temperaturas más altas.

Los periodos de escasa precipitación ocasionan notoria disminución en el caudal de los ríos, quebradas y caños; la alta evapotranspiración durante el año, influye en el desecamiento del follaje de la vegetación y disminuye la producción de pastos.

## **3. MARCO GEOLOGICO**

La cuenca de los Llano Orientales (Figura 3), se encuentra localizada en la región este de Colombia. Limita al norte con la frontera colombo-venezolana, el Alto de la

---

<sup>3</sup> Rippstein, G., Escobar, G., Motta, F., 2001. Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia

<sup>4</sup> Ibid

<sup>5</sup> Brunnschweiler, D., Op.Cit.

<sup>6</sup> Datos tomados de la página oficial del IDEAM, [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)

Macarena y el Arco Vaupés hacia el sur, el sistema de la falla de Guaicáramo hacia el oeste y el escudo de Guyana hacia el este.

La cuenca corresponde a una cuenca antepais que en sus inicios era conformada por la actual cuenca del Magdalena y los Llanos Orientales, debido al levantamiento de la Cordillera Oriental durante la Orogenia Andina (Oligoceno Tardío – Mioceno Medio), esta fue disectada, la posterior Orogenia Herciniana marca el final de la fuerte depositación Paleozoica, seguida de una fase extensiva de rift desde el Triásico al Cretácico y evolucionando a una cuenca pasiva a finales del Cretácico, para convertirse luego en una cuenca de plataforma desde finales del Cretácico al Eoceno-Paleoceno.

Por definición esta cuenca se ha descrito como una cuenca de tipo foreland que se forma debido al peso del orógeno sobre la litosfera terrestre, hundiéndose isostáticamente y generando el espacio necesario para la acomodación de sedimentos aportados principalmente por ríos desde el orógeno y depositados sobre una región adyacente relativamente poco deformado por la tectónica.

Tres periodos fuertes de erosión están grabados en el registro geológico de la cuenca, a nivel del Paleozoico, al final del Cretácico y hacia la parte tardía del Eoceno.

El levantamiento de la Cordillera Oriental (Orogenia Andina, Oligoceno Tardío - Mioceno Medio) estableció el límite occidental actual de la Cuenca Llanos Orientales y es la referencia más reciente de deformación tectónica a la cual se puede atribuir la última fase de fallamiento, representada por los diferentes sistemas de fallas que afectan las secuencias sedimentarias de la cuenca. El arco de basamento Vaupés y la Serranía de la Macarena son los límites al sur, y las rocas del Escudo Precámbrico de la Guyana son el límite oriental<sup>7</sup>. La orogenia

---

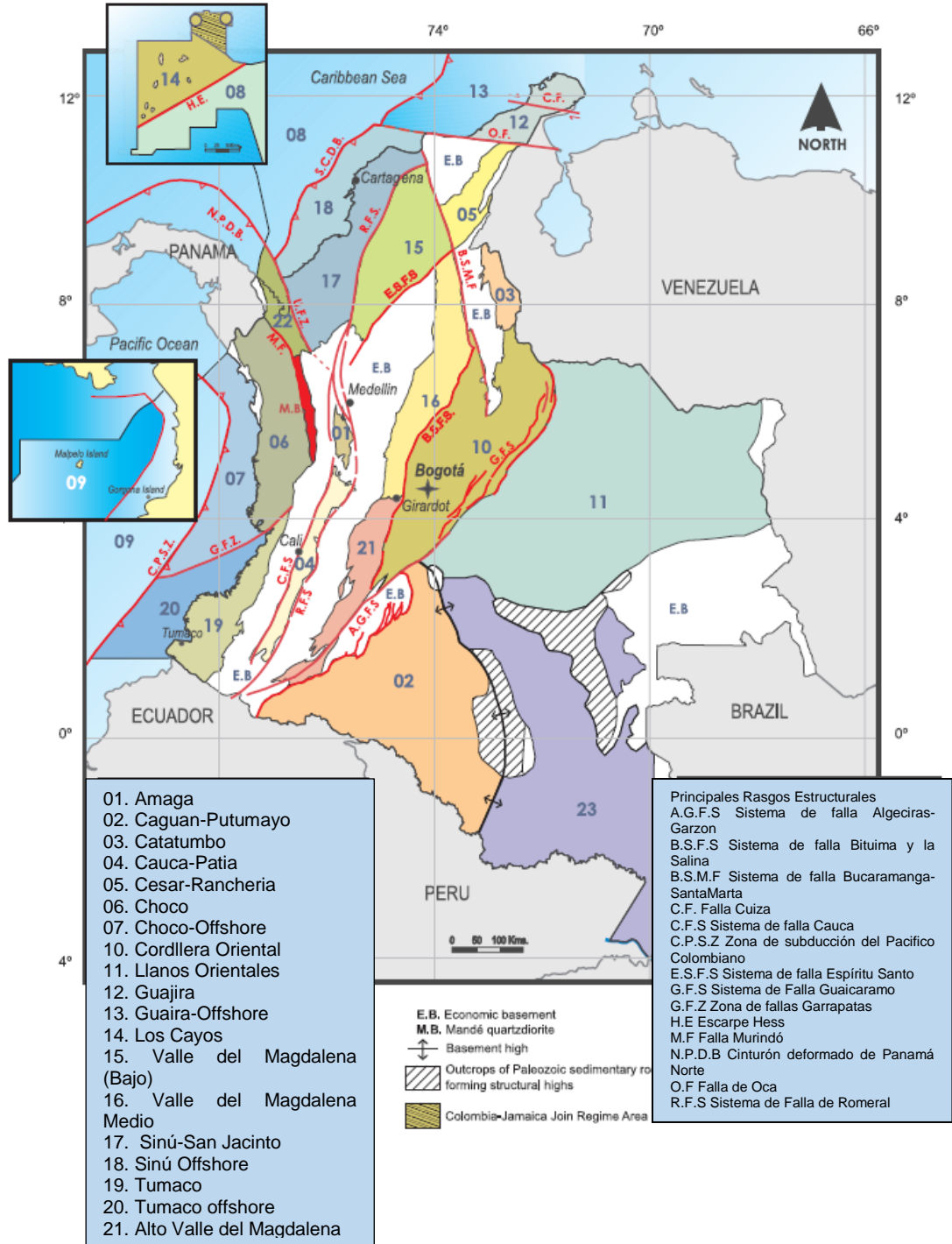
<sup>7</sup> Burrus, M., Vargas, H.M., 2011. Estudio de la Geometría de la Cuenca de los Llanos con Base en Datos Sísmicos, para el Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol S. A. Informe Técnico. AQUATERA INTERNATIONAL INC.

Andina dio origen a los depósitos que constituyen los paquetes sedimentarios conocidos como las formaciones Mirador, Carbonera, León y Guayabo<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Rangel, A., Reyes, A., Pérez, H., Molina, M., Rodríguez, J., Giraldo, B., Bernardo, L., Mogollón, L., Díaz, O., Moreno, N., 2006. Apoyo A La Evaluación De Oportunidades Exploratorias Bloque Caño Sur. Fase I. Ecopetrol-Instituto Colombiano de Petróleos ICP. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.

**Figura 3. Distribución de las cuencas sedimentarias en Colombia. La cuenca de los Llanos Orientales corresponde al número 11.**



Fuente: Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martinez, J., 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, Bogotá.

### 3.1 ESTRATIGRAFÍA

La secuencia crono-estratigráfica presente en la zona Llanos Sur se muestra en el modelo generalizado para la cuenca de los Llanos Orientales, para esta zona se encuentra que la secuencia inicia en la formación Mirador la cual suprayace el basamento Paleozoico (Figura 4).

Las formaciones identificadas con potencial como reservorio de Arenas Bituminosas corresponden a las formaciones Arenas Basales de Mirador y Arenas de Carbonera. Los espesores estratigráficos de estas formaciones para la zona sur de la cuenca de los Llanos, hacia el bloque Caño Sur, fueron determinados mediante perforaciones exploratorias llevadas a cabo por Ecopetrol S.A (Tabla 1).

**Tabla 1. Espesor de las formaciones presentes en la zona sur de la cuenca de los Llanos Orientales**

Formacion	Pozos Profundidad en metros			
	Pozo "1"	Pozo "2"	Pozo "3"	Pozo "4"
Guayabo	282	79		
Leon	71	219	241	301
Carbonera	438	379	388	255
Arenica Mirador	57		59	37

Fuente: Rueda, J., P., 2011. Cálculo Preliminar De Recursos Potenciales De Arenas Bituminosas En Las Áreas De Florencia, San Vicente, Caño Sur Y Sogamoso. Ecopetrol S.A. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.

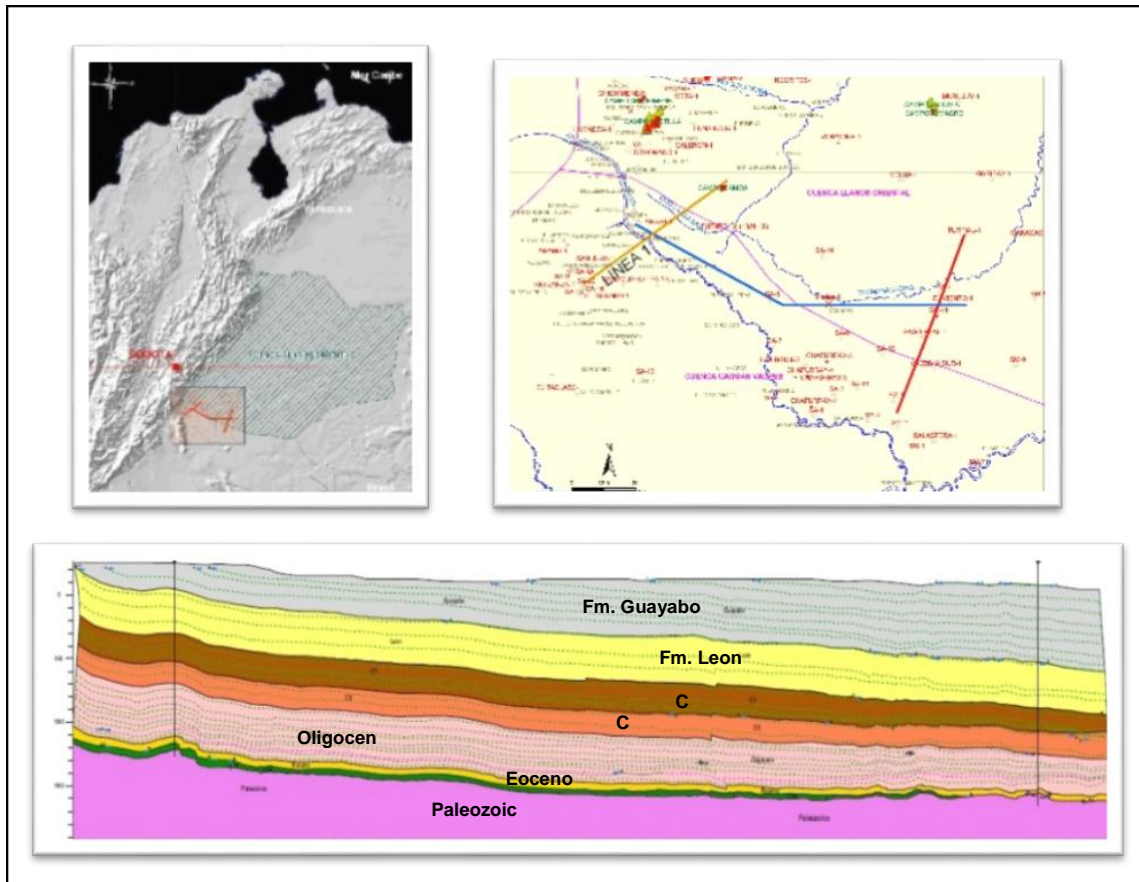
### 3.1.1 Formación Mirador

La formación Mirador corresponde a una arenisca grisácea a blanca y conglomerática, de grano medio a grueso, de moderada selección, con líticos metamórficos de chert. Localmente se presentan lodolitas gris verdosas, intercaladas con niveles de areniscas lodosas, cuarzosas, con granos subangulares a angulares, moderada a mala selección, con fragmentos carbonosos y arcillolitas gris oscuro, masivas, localmente fisiles, depositados en un ambiente litoral nerítico interno localmente con influencia aluvial, con una edad reportada de Eoceno<sup>9</sup>.

**Figura 4. Contexto estratigráfico general hacia el sur de la cuenca de los Llanos Orientales, mostrando la disposición de las formaciones sedimentarias.**

---

<sup>9</sup> Giraldo, B, Rodríguez, J., Rangel, A., Díaz, O., Gamba, N., Torres, V., Moreno, N., Tarazona, D., Naranjo, J., Rubiano, J., 2007. Soporte Geológico al Bloque Llano Sur. Ecopetrol-Instituto Colombiano de Petróleos ICP. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.



Fuente: Vargas, C., 2008. Características Cuenca de los Llanos Orientales y descripción de bloques. Taller Para Empresas Precalificadas Proceso Licitatorio Proyecto Dcp – Zona Oriental. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

De acuerdo a los trabajos realizados por Bayona<sup>10</sup> y otros, las características estratigráficas de la zona sur-central de la cuenca de los Llanos Orientales se pueden describir de la siguiente manera:

<sup>10</sup> Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Ortiz, J., 2008. Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. Geología Colombiana No. 33, 23-46.

### 3.1.2 Formación Carbonera

La formación carbonera está compuesta por unidades reportadas como miembros C1, C2 a C8, cuya presencia varía a lo largo de la cuenca de los Llanos.

Miembro C3, compuesto por sucesiones de lodolitas grises claras y oscuras laminadas con algunos intervalos de lodolitas arenosas con clastos cuarzosos diseminados; hacia el tope está compuesta por sucesiones granodecreciente de areniscas cuarzosas macizas, algunas veces conglomeráticas. Estas areniscas pasan a lodolitas laminadas carbonosas, carbones y hacia el tope lodolitas blancas caoliniticas. En los intervalos lodosos laminados son comunes los restos de plantas y material carbonoso, mientras que en los intervalos lodosos macizos son comunes los pedos y las esferulitas ferruginosas. Las areniscas de esta unidad son subarcosas de grano medio a grueso, subangulares, mal seleccionadas, compuestas por un alto porcentaje de cuarzo, feldespatos potásicos y trazas de líticos, micas, minerales opacos y pesados.

Miembro C2. Está constituido por una sucesión homogénea de lodolitas laminadas verde oliva, gris clara y grises, y lodolitas macizas blancas, incrementando la cantidad de láminas y capas delgadas de arena hacia el tope.

Miembro C1. Se caracteriza por presentar sucesiones granodecrecientes con areniscas conglomeráticas y conglomerados arenosos cuarzosos hacia la base, gradando a areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino, pasando a areniscas lodosas. Hacia la parte superior predominan los paquetes con arenisca de grano medio a fino cuarzosos, gradando a areniscas lodosas bioturbadas y lodolitas grises laminadas.

### 3.1.3 Formación León

Esta formación presenta una homogeneidad litofacial, aunque es posible distinguir algunos cambios en los patrones de laminación. Consta de una secuencia de lodolitas laminadas verdes claras. En los intervalos laminados son comunes

algunos restos de material carbonoso y restos de fósiles. En la parte superior de la sucesión comienza a ganar gradualmente láminas arenosas e incrementa la bioturbación.

#### 3.1.4 Formación Guayabo

Miembro G3. Sucesiones granocrecientes con lodolitas laminadas, hacia la base pasando a lodolitas arenosas y areniscas lodosas laminadas y areniscas muy finas a finas con laminación plana, ondulosa y rizaduras. Los intervalos arenosos para esta unidad predominan hacia la parte superior, correspondiendo a sub-arcosas de grano muy fino a fino, subredondeadas, selección moderada.

Miembro G2. Sucesiones granocrecientes de lodolitas laminadas y macizas grises con intercalaciones de carbones y lodolitas carbonosas, gradando a lodolitas arenosas y areniscas lodosas laminadas y arenisca con laminación ondulosa hacia el tope.

Miembro G3. Hacia la base sucesiones granodecipientes de arenisca lodosas con intraclastos y areniscas laminadas gradando a lodolitas macizas blancas. En la parte superior de esta unidad existe un desarrollo de mantos de carbón y lodolitas carbonosas que van gradando a lodolitas café. Las areniscas de este intervalo son lito-arenitas feldespáticas de grano fino, con buena selección, clastos

Miembro G4. Hacia la base está compuesta por sucesiones granodecipientes pasando de areniscas cuarzosas laminadas areniscas lodosas laminadas y lodolitas macizas. En la parte media y superior son más abundantes las facies lodosas sobre facies arenosas. La fracción arenosa más gruesa predomina hacia la parte basal y media de la unidad representada por lito-arenitas feldespáticas de grano fino con selección moderada.

Miembro G5. Incluye el paquete más espeso de areniscas en la formación Guayabo. Está compuesto por secuencias levemente granodecipientes gradando rápidamente a areniscas laminadas y macizas. Las areniscas de esta unidad son

lito-arenitas feldespáticas de grano fino a medio, selección moderada a mala con granos sub-angulares.

Miembro G6. Sucesión homogénea de lodolitas macizas caoliniticas blancas y lodolitas arenosas y areniscas lodosas macizas cortadas por sucesiones levemente granodecrecientes de arenisca cuarzosa de grano fino a medio, arenisca laminada y maciza.

De acuerdo con lo reportado por el SGC<sup>11</sup>, la principal formación que aflora en el área dentro de la cual se encuentra localizado el polígono LlanoSur corresponde a la Formación Caja. Esta corresponde a rocas sedimentarias cenozoicas y depósitos de cuaternario. Las rocas neogénas parecen a la Formación Caja y los depósitos recientes se refieren principalmente a depósitos aluviales como abanicos y de llanura aluvial formados a lo largo de las cuencas de los ríos Ariari y Manacacías. Esta formación es correlacionable con la formación Guayabo del área del Catatumbo.

Los nombres de Formación Guayabo y Formación León son utilizadas por la industria petrolera para el subsuelo de la Cuenca de los Llanos Orientales.

La Formación Caja forma un paisaje de terrenos ondulados, donde yace con un buzamiento entre horizontal y 10° inclinados al E o al W debido a un plegamiento suave. La superficie es monótona desde el punto de vista litológico<sup>12</sup>.

En el área son escasos los afloramientos debido a la disposición de las capas y el cubrimiento casi total por vegetación (pastizales). Sin embargo SGC realizó algunas pequeñas columnas estratigráficas en el área (Figura 5).

---

<sup>11</sup> Zapata, G., Ramírez, C., Bermúdez., J.G., Arango, M.I., Rodríguez, G., 2011. Cartografía Geológica y Exploración Geoquímica de la Plancha 306 Puerto Lleras. Servicio Geológico Colombiano SGC. Medellín, Colombia.

<sup>12</sup> Ibid

**Figura 5. Segmento de columna estratigráfica de la Formación Caja dentro de la plancha 306 Puerto Lleras.**



Fuente: Zapata, G., Ramírez, C., Bermúdez., J.G., Arango, M.I., Rodríguez, G., 2011. Cartografía Geológica y Exploración Geoquímica de la Plancha 306 Puerto Lleras. Servicio Geológico Colombiano SGC. Medellín, Colombia. Pág. 36.

El SGC reporta 2 intervalos para la Formación Caja en el área de Puerto Lleras<sup>13</sup>:

<sup>13</sup> Ibid

**N<sub>2</sub>c-arc:** Arcillolitas abigarradas esporádicamente limosas, presenta cambio lateral de facies a intercalaciones de arenita arcillosa ligeramente conglomerática de grano fino a medio, arcillolitas arenosas con presencia de láminas de materia orgánica.

El aspecto abigarrado se debe a la presencia de óxidos de hierro diseminados entre las capas de arcillolitas, localmente forman laminas planas a onduladas de diferentes espesores. Localmente las arcillolitas están suprayacidas por capas medias de lodolitas arenosas y cubiertas por un suelo de espesor entre 10 y 25 cm con guijos angulares de areniscas bien compactadas con cemento ferruginoso, y costras ferruginosas de óxidos e hidróxidos de hierro, en capas muy delgadas muy bien compactadas y muy duras.

**N<sub>2</sub>c-are-1:** Intervalo de cuarzo-arenitas de grano fino a medio con matriz limo arcillosa con esporádicas intercalaciones de arcillolitas abigarradas con parches color violeta, teñida por óxidos de hierro, en ocasiones ligeramente conglomeráticas, con esporádicas intercalaciones arcillitas limosas. La estratificación es plana a ondulosa paralela.

### **3.2 ESTRUCTURAL**

La Cuenca de los Llanos Orientales se encuentra afectada en la actualidad por las fuerzas compresionales que se generan entre la Cordillera Oriental y el Cratón. Las diferentes líneas sísmicas que se han realizado para la exploración de hidrocarburos sugiere la existencia de fallas casi verticales de tipo normal con vergencia al Este (Figura 5), las cuales podrían estar afectando de manera severa

las rocas del Paleozoico y de manera parcial a las rocas del Oligocena y Mioceno<sup>14</sup>.

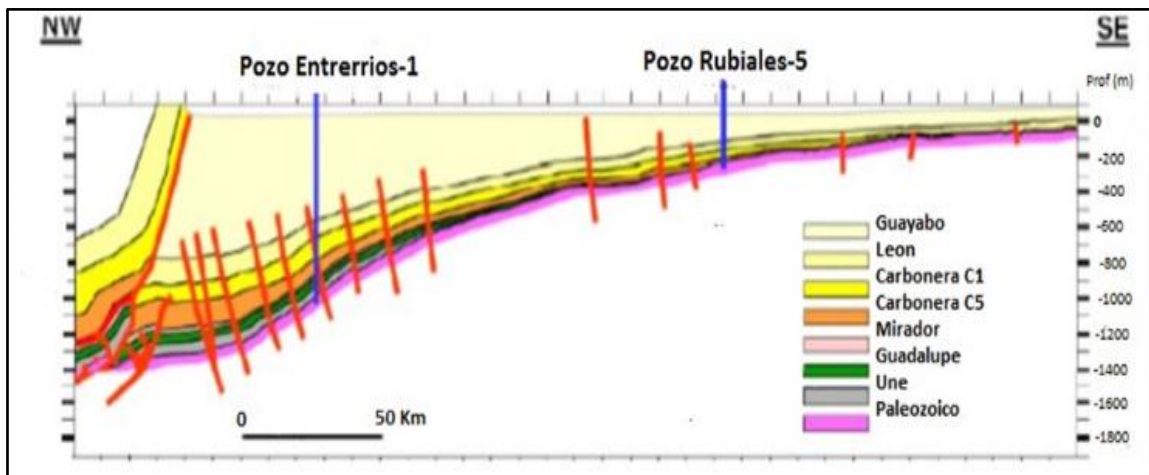
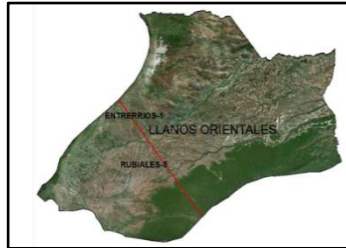
El servicio Geológico colombiano ha planteado la existencia de paleofallas de tipo normal con rumbo NE-SW, las cuales se están reactivando de manera lenta de oeste a este. De acuerdo a la información obtenida a través del portal de internet de la Red Sismológica Nacional del SGC<sup>15</sup> los eventos sísmicos muestra una actividad muy leve cercana al área de interés con magnitudes en su mayoría entre 0-3 y algunos eventos con magnitudes de entre 3-4 en la escala de Richter, con profundidades de entre 0 a 30 km. De acuerdo a la distribución geográfica de los sismos, esto nos indicaría una reactivación leve hacia el Este del municipio de San Juan de Arama en cercanías al río Ariari.

---

<sup>14</sup> Alvarado, S., Tellez, A., Pacheco, S., Rojas, N., 2010. Cartografía Geológica de la Zona Centro y Sur del Departamento del Meta Planchas 286, 287, 288, 289, 290, 307, 308 Escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. Bogotá.

<sup>15</sup> Red Sismológica Nacional de Colombia del Servicio Geológico Colombiano. <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC>, Se realizan consultas específicas según el interés (ubicación y periodos de fechas)

**Figura 6. Marco estructural de la cuenca de los Llanos Orientales a partir de la transecta (línea roja).**



Fuente: Vargas, C., 2008. Características cuenca de los Llanos Orientales y descripción de bloques. Taller Para Empresas Precalificadas Proceso Licitatorio Proyecto Dcp – Zona Oriental. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 GEOQUÍMICA DE SUPERFICIE

Los yacimientos de hidrocarburos (HC) en profundidad encuentran vías de escape a través de las fracturas y microfracturas, filtrándose así las partes más livianas (gases, crudos livianos) hacia la superficie generando alteraciones características en los suelos y sedimentos<sup>16</sup> (Figura 6).

La exposición prolongada de los suelos a fugas de hidrocarburos, ya sea microfiltraciones o macrofiltraciones puede desarrollar zonas en la superficie de óxido-reducción que favorecen el desarrollo de una amplia gama de cambios químicos y mineralógicos<sup>17</sup>. La oxidación bacteriana de los hidrocarburos livianos puede directamente o indirectamente llevar a unos significativos cambios en el pH y Eh del ambiente alrededor de las fugas, cambiando así también el campo de estabilidad de las diferentes especies minerales presentes. Estos cambios resultan en la precipitación o solución y removilización de varias especies minerales y elementos, de tal manera que la columna de roca por encima de la acumulación de petróleo se convierte significativamente diferente a las rocas laterales equivalentes. Estas alteraciones han sido documentadas empíricamente, y su expresión superficial puede ir desde sutiles anomalías geoquímicas a drásticas aureolas diagenéticas<sup>18</sup>.

La expresión superficial de las alteraciones inducidas por hidrocarburos se presenta muchas formas incluyendo (1) anomalías microbiológicas, (2) cambios mineralógicos como formación de calcita, piritita uranio, azufre y ciertos óxidos de hierro, (3) blanqueamiento de capas roja, (4) alteración de minerales de arcilla, (5) cambios electroquímicos, (6) anomalías en la radiación y (7) anomalías bioquímicas y geobotánicas<sup>19</sup>.

---

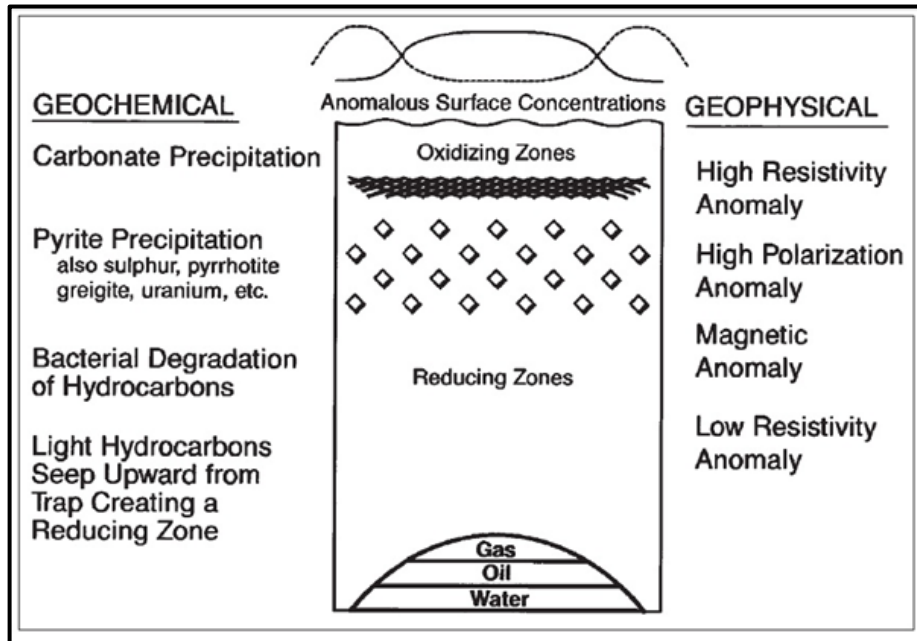
<sup>16</sup> Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments, en Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66

<sup>17</sup> Ibid

<sup>18</sup> Ibid

<sup>19</sup> Ibid

**Figura 7. Modelos de alteración de los suelos y sedimentos inducida por las microfiltraciones de hidrocarburos.**



Fuente: Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments, en Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66.

Por muchos años se han detectado las cantidades anómalas de hidrocarburos livianos (gases) en los suelos por medio de técnicas de gasometría, convirtiéndose esto en la principal evidencia de la existencia de microfiltraciones de hidrocarburos hacia la superficie.

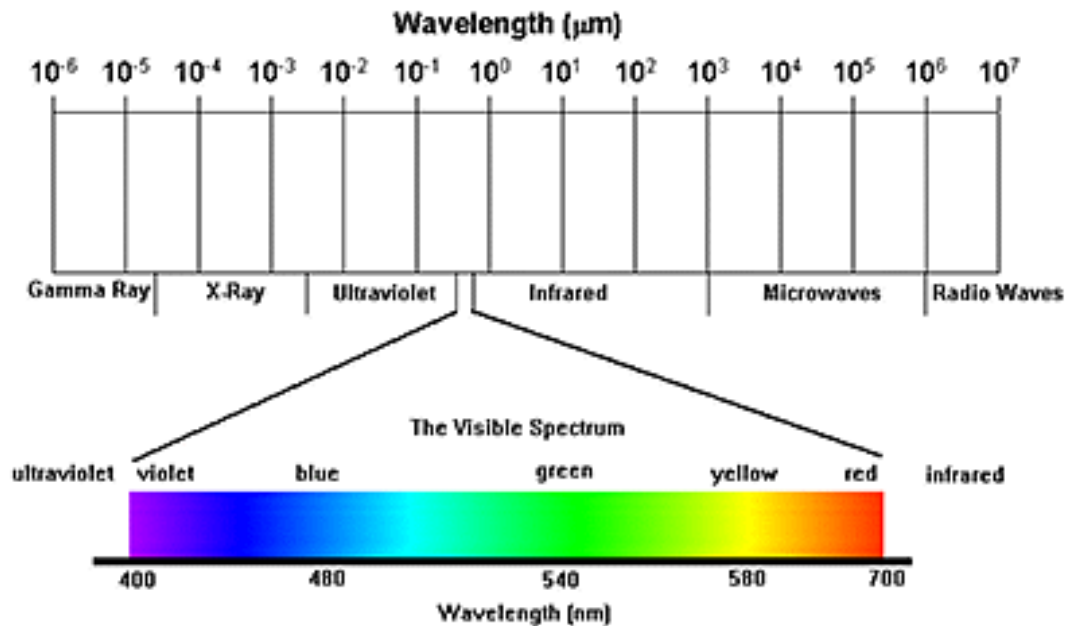
A excepción de muy pocos casos, los yacimientos que han sido estudiados por diferentes autores han mostrado evidencia de microfiltraciones verticales de hidrocarburos mediante al menos un método directo<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Saunder, D., F., Burson, K., R., Thompson, C., K., 1999. Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alteration. AAPG, vol 83, No 1, 17-185.

## 4.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTROMETRÍA

Cualquier tipo de energía radiante puede ser expresada en función de su longitud de onda ( $\lambda$ ) o frecuencia. Aunque los valores de longitud de onda son continuos, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas se conoce con el nombre de espectro electromagnético<sup>21</sup> (Figura 8).

Figura 8. Espectro electromagnético



Fuente: Tomado de Center for Remote Imaging, Sensing and Processing <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm#irbands> [citado en 10 de enero de 2016].

<sup>21</sup> Chuvieco E., 2010. Teledetección Ambiental, Primera edición actualizada. Editorial Planeta S.A

Desde el punto de vista de los sensores remotos se pueden destacar una serie de bandas espectrales, que son empleadas frecuentemente para la caracterización de la superficie terrestre<sup>22</sup>.

- Espectro visible (VIS): 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ . Este intervalo del espectro puede ser captado por los ojos humanos, además coincide con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región se pueden distinguir las tres bandas elementales denominadas azul, verde, rojo<sup>23</sup>.
- Infrarrojo cercano (NIR-Near InfraRed): 0,7 a 1,2  $\mu\text{m}$ . Este intervalo del espectro es de gran importancia para la discriminación de masas vegetales y concentración de humedad<sup>24</sup>.
- Infrarrojo medio: en este intervalo del espectro se puede destacar el rango conocido como SWIR (Short Wave InfraRed), o infrarrojo de onda corta, el cual se encuentra entre 1,2 a 2,5  $\mu\text{m}$ . A partir de 2,5  $\mu\text{m}$  se encuentra el rango del espectro conocido como el infrarrojo medio propiamente, y que se extiende hasta los 8  $\mu\text{m}$ , cuya aplicación está encaminada a la detección de focos de alta temperatura y estimación de algunos gases atmosféricos<sup>25</sup>.
- Infrarrojo lejano o térmico TIR (Thermal InfraRed): 8 a 14  $\mu\text{m}$ . Constituye la porción emisiva del espectro terrestre, donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres<sup>26</sup>.

La porción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de los materiales en superficie que se observan y de la longitud de onda en la que es registrado. Para caracterizar una determinada cubierta resulta muy interesante conocer su comportamiento reflectivo en diversas longitudes de onda, ya que esto facilitara su discriminación frente a cubiertas

---

<sup>22</sup> Ibid

<sup>23</sup> Ibid

<sup>24</sup> Ibid

<sup>25</sup> Ibid

<sup>26</sup> Ibid

espectralmente similares<sup>27</sup>. La técnica empleada para llevar a cabo las medidas de los valores de reflectividad, absorción y transmisión es conocida como espectrometría.

A partir de medidas realizadas en laboratorio se obtienen unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres, que suelen denominarse firmas espectrales.

Las firmas espectrales son fundamentales para reconocer cubiertas de interés, o parámetro dentro de las cubiertas (clorofila en la vegetación, turbidez en el agua entre otras), por lo que se recomienda que sean un punto de partida para la mayor parte de los trabajos de sensores remotos<sup>28</sup>.

#### **4.3 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA VEGETACIÓN**

Los procesos que se llevan a cabo dentro de las hojas son el principio fundamental para la determinación de la calidad y salud de la vegetación<sup>29</sup>. La fotosíntesis es un proceso de almacenamiento de energía que toma lugar en las hojas y otras partes verdes de las plantas en presencia de la luz. La energía de la luz es almacenada en una molécula simple de azúcar (glucosa), la cual es producida del óxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en el aire y el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) absorbida por las plantas, principalmente a través de las raíces. Cuando el  $\text{CO}_2$  y el agua son combinados y forman una molécula de azúcar ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) en un cloroplasto, el oxígeno es liberado como un subproducto. El proceso de fotosíntesis inicia cuando la luz solar “golpea” los cloroplastos, pequeños cuerpos en las hojas que contiene una sustancia verde llamada clorofila<sup>30</sup>.

---

<sup>27</sup> Ibid

<sup>28</sup> Ibid

<sup>29</sup> Jensen, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment an Earth Resource Perspective. Prentice Hall.

<sup>30</sup> Ibid

Las plantas han adaptado su estructura interna y externa para realizar la fotosíntesis. Esta estructura y su interacción con la energía electromagnética tiene un impacto directo en como las hojas aparecen espectralmente cuando son registradas usando instrumentos de sensores remoto.

Una hoja saludable verde intercepta flujo radiante incidente ( $\Phi_i$ ) directamente desde el sol. Esta energía electromagnética incidente interactúa con pigmentos, agua y espacios intercelulares dentro de las hojas. La cantidad de flujo radiante reflejado desde la hoja ( $\Phi_r$ ), la cantidad de flujo radiante transmitido ( $\Phi_t$ ) y la cantidad de flujo absorbido ( $\Phi_a$ ), pueden ser medidos aplicando una ecuación de balance de energía en un intento de mantener rastreada toda la energía incidente:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t + \Phi_a$$

La reflectancia y la transmitancia están directamente condicionadas con las propiedades de los pigmentos y la dispersión de la luz en el interior de las hojas<sup>31</sup>.

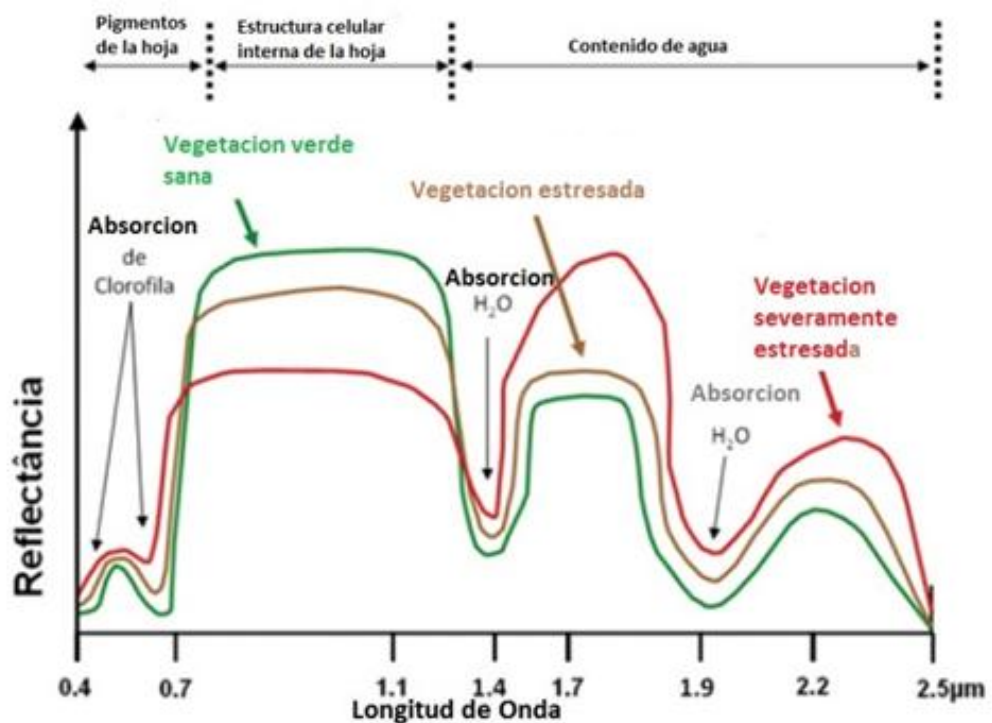
En una firma espectral característica de la vegetación saludable se observa un claro contraste entre las bandas del visible, especialmente la banda roja (0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ), y las comprendidas en el infrarrojo cercano (0.7-1.1  $\mu\text{m}$ ). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben (para realizar la fotosíntesis). Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectancia en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano. El contraste con la vegetación enferma es bastante evidente en estas dos bandas. En definitiva se puede enunciar en términos generales, que cuanto mayor sea el contraste de números digitales (ND) de la banda infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un

---

<sup>31</sup> Ibid

contraste muy pequeño<sup>32</sup> (Figura 9). La respuesta espectral de la vegetación verde es muy característica y presenta poca variación de especie en especie<sup>33</sup>.

**Figura 9. Firmas espectrales de la vegetación según su estado de estrés.**



Fuente: De Souza Filho, C.R., Augusto, V., Oliveira, W.J., Lammoglia, T., 2008. Hydrocarbon Seepage Detection Through Geobotanic and Multi-temporal Remote Sensing: A Case study on Remanso do Fogo (MG). Revista Brasileira de Geociencias, 38, suplemento 2, 228-243.

<sup>32</sup> Chuvieco, E., Op.Cit.

<sup>33</sup> Meneses, P., R., Maderira, J., S., 2001. Sensoramiento Remoto: Reflectancia de Objetos Naturales. Brasília, DF: UNB; Planaltina, 262 p.

La presencia de hidrocarburos en los suelos estimula la actividad de bacterias que se alimentan de hidrocarburos, las cuales reducen el oxígeno contenido en el suelo, incrementando el contenido de dióxido de carbonos y ácidos orgánicos. Estos cambios afectan el pH y Eh del suelo, lo cual afecta la solubilidad de elementos que se constituyen en nutrientes de la vegetación<sup>34</sup>. Esta condición puede afectar la estructura interna de la raíz de la planta y finalmente influencia en su vigor y por lo tanto su respuesta espectral.

Los sensores remotos de la vegetación anómala o estresada pueden ser analizados teniendo en cuenta dos enfoques: uno es analizando la distribución de las diferentes especies en un área, y las diferencias del vigor en una especie específica<sup>35</sup>. La vegetación que es típicamente prolifera a menudo presenta una disminución en su tamaño en áreas que presentan un inusual ambiente en el suelo. El segundo enfoque es determinar la diferencia en las características espectrales entre la vegetación sana y estresada. Los principales puntos de atención de la firma espectral de la vegetación asociada con microfiltraciones de hidrocarburo son los picos de la banda verde (0.56  $\mu\text{m}$ ), curva del rojo (0.67  $\mu\text{m}$ ), el cambio de posición de la banda red edge y la altura del infrarrojo<sup>36</sup>.

La banda red edge corresponde a una región del espectro entre el rojo (VIS) y el NIR, considerado zona de transición de reflectancia de la vegetación en el espectro y marca el borde entre la absorción debido a la clorofila en la región del rojo y la dispersión debido a la estructura interna de la hoja en la región de NIR<sup>37</sup>. La posición del red edge (REP) puede ser definido como la posición de la máxima

---

<sup>34</sup> Schumacher, D., Op.Cit

<sup>35</sup> Brooks, R., R., 1972. Geobotany and Biogeochemical in Mineral Exploration. Harper & Row, Nueva York.

<sup>36</sup> Yang, H., Van der Meer, F., D., Zhang, J., 2000. Aerospace Detection of Hydrocarbon-Induced Alteration. Geochemical Remote Sensing of the Subsurface. Elsevier Science

<sup>37</sup> Horler, D., N., H., Dockray, M., Barber, J., 1983. The Red Edge of Plant Leaf Reflectance. International Journal of Remote Sensing, No 4, 273-288.

de la primera derivada de la reflectancia de la hoja<sup>38</sup>. El cambio en el REP puede ser usado para estimar la cantidad de clorofila en la hoja<sup>39</sup>.

El cambio en la posición de la banda red edge (REP) y los cambios en la forma de la curva de reflectancia han sido cuantificados usando índices, por ejemplo el índice de estrés red-edge (RVSI)<sup>40</sup> y el índice de amarillez.

Se ha reportado cambios en REP en vegetación expuesta a fugas de hidrocarburos<sup>41</sup>. En un estudio realizado en 2001<sup>42</sup>, encontraron que en las praderas sobre suelos altamente contaminados con gases presentan un REP hacia longitudes de onda más cortas que aquellas en donde la influencia de los gases es mínima.

Desde los años 60 científicos han extraído y modelado variables biofísicas de la vegetación usando datos adquiridos por medio de sensores remotos. Muchos de estos esfuerzos han llegado al desarrollo de índices de vegetación, definidos como medida radiométrica adimensional que funciona como un indicador de la abundancia relativa y actividad de la vegetación verde<sup>43</sup>.

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice de vegetación usado para medir y monitorear el crecimiento de las plantas, cobertura vegetal y producción de biomasa desde datos de satélites multiespectrales. El NDVI se calcula como sigue:

---

<sup>38</sup> Ibid

<sup>39</sup> Railyan, Y., Korobov, R., M., 1993. Red Edge Structure of Canopy Reflectance Spectra of Triticale. Remote Sensing of Environment, No 46, 173-182.

<sup>40</sup> Merton, R., 1998. Monitoring Community Hysteresis Using Spectral Shift Analysis and the Red-edge Vegetation Stress Index. AVIRIS Airhone Geosciences Workshop Proceedings, JPL Publication 97-21, NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 32-38.

<sup>41</sup> Li, L., Ustin, S., L., Lay, M., 2005. Application of AVIRIS Data in Detection of Oil-Induced Vegetation Stress and Cover Change at Jornada, New Mexico. Remote Sensing of Environment, No. 94, 1-16.

<sup>42</sup> Llewellyn, G., M., Kooistra, L., Curran, P., J., 2001. The Red Edge of soil contaminated grassland. Proceeding Eighth Int. Symp.: Physical Measurement and Signature in Remote Sensing. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing and Centre National D'Etudes Spatiales. Aussois, France, 381-386.

<sup>43</sup> Jensen Op.Cit

$$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} = NDVI$$

Donde NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano, y R corresponde a la banda roja del visible. El NDVI es preferido para monitoreo de la vegetación global debido a su particular compensación por cambios de condiciones de iluminación. El principio detrás del NDVI es que la banda R es la luz en la región del rojo en el espectro electromagnético donde la clorofila causa considerable absorción de la luz solar incidente, mientras que NIR es la región del infrarrojo cercano donde la estructura interna de la planta causa considerable reflectancia.

Este algoritmo relativamente simple produce valores entre el rango de -1.0 a 1.0. Valores positivos del NDVI indican incremento en la cantidad de vegetación verde. Espesa y saludable vegetación presenta baja reflectancia en el rango del rojo y alta en el infrarrojo cercano, por lo tanto, presenta altos valores de NDVI. Valores NDVI cercanos a 0 y hacia valores negativos indican pixeles sin vegetación (rocas, suelos), agua, nieve, hielo y nubes. Básicamente valores menores a 0 indican la presencia de nubes y nieve, mientras que valores entre 0 y 0.1 representan rocas, vegetación senescente o suelo; cuando el valor está entre 0.1 y 0.4 es indicativo de estructuras (ciudades); cuando los valores están por encima de 0.4 indican la presencia de biomasa vegetal.

El índice RVI (Ratio Vegetation Index) es la proporción de la más alta reflectancia; funciona como indicador de la cantidad de vegetación.

$$\frac{NIR}{R} = RVI$$

El valor de este índice va desde 0 a más de 30. El valor de RVI para suelos desnudos generalmente es cercano a 1; como aumente la cantidad de vegetación verde en el pixel el RVI se incrementa. El rango común de la vegetación verde es de 2 a 8.

El índice EVI (Enhanced Vegetation Index) fue desarrollado para mejorar el NDVI optimizando la señal de la vegetación usando la reflectancia del azul para corregir las señales de suelo de fondo y reduce influencias atmosféricas, incluyendo dispersión de aerosoles. Este índice es más útil en regiones donde el NDVI puede saturarse. El EVI se define como:

$$\frac{NIR - R}{NIR + 6R - 7.5B + 1} \cdot 2.5 = EVI$$

Donde B corresponde a la banda azul del rasgo de espectro dentro del visible.

Los valores del índice van desde -1 a 1. El rango común para vegetación verde es 0.2 a 0.8.

El índice ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) es un mejoramiento del índice NDVI que es relativamente resistente a los factores atmosféricos, por ejemplo, aerosol. ARVI tiene la capacidad de reducir la influencia de la atmosfera empleando la banda azul. Este índice está definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{P''nir - P''rb}{P''nir + P''rb} = ARVI$$

El termino P'' hace referencia a un parámetro calculado de acuerdo a la corrección molecular y la absorción de ozono en el azul, rojo e infrarrojo cercano.

Los valores de este índice van desde -1 a 1. Con un rango común de vegetación verde de 0.2 a 0.8<sup>44</sup>.

Científicos a lo largo del planeta están estudiando el papel que juega la vegetación sobre los procesos globales a gran escala. Esto es necesario con el fin de entender como la tierra funciona como un sistema. Los más rigurosos sensores remotos derivaron índices de vegetación que eventualmente son usados para inventariar exactamente la distribución global de los tipos de vegetación así como

---

<sup>44</sup> Serban, C., Maftai, C., Filip, C., 2011. Assessment of Multispectral Vegetation Indices Using Remote Sensing and Grid Computing. International Journal of Computer. 4 Vol 5, 468-475.

también sus propiedades biofísicas (biomasa) y estructurales. Monitoreando estas características a lo largo del tiempo y del espacio se proveerá una valiosa información para el entendimiento de la tierra como un sistema<sup>45</sup>.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DEL SUELO

Las propiedades ópticas de los suelos están relacionadas principalmente con su composición mineral, teniendo en cuenta que este es producto de la descomposición por meteorización de las rocas. La reflectancia espectral de un suelo es la superposición de la respuesta espectral de los minerales presentes en este. Como los minerales, los suelos tienen un incremento de la reflectancia desde el visible hacia las longitudes de ondas del SWIR, con bandas de absorción alrededor de los 1.4µm y 1.9 µm relacionadas con la humedad del suelo<sup>46</sup>.

Otro factor que afecta las propiedades ópticas del suelo es la humedad. La creciente humedad del suelo conduce a curvas paralelas a la reflectancia espectral del suelo. Esto significa que la humedad del suelo tiene igual efecto sobre todo el espectro y la relación entre bandas, como la banda roja y NIR, es independiente de la humedad del suelo<sup>47</sup> (Figura 10).

Las propiedades ópticas del suelo también se encuentran afectadas por el contenido de materia orgánica la cual tiene un efecto menor en las bandas mayores a 1.8 µm. Un alto contenido de materia orgánica puede inducir interferencia espectral para bandas específicas de algunos minerales como Mn y

---

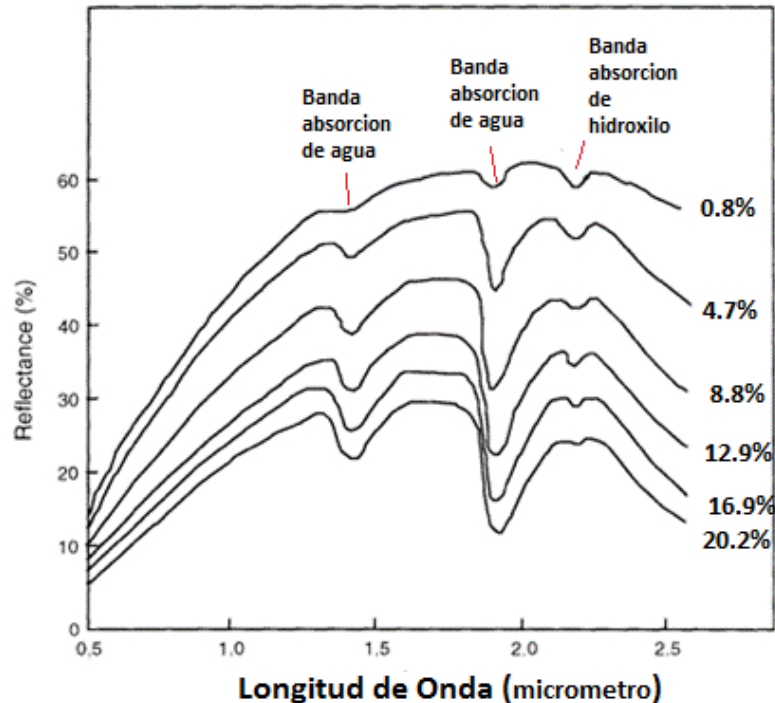
<sup>45</sup> Jensen Op.Cit

<sup>46</sup> Leblon, B. Soil and Vegetation Optical Properties. Remote Sensing and GIS laboratory. Faculty of Forestry and Environmental Management. University of New Brunswick, Canada. [www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm](http://www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm)

<sup>47</sup> Ibid

Fe. Este factor tiene una influencia espectral indirecta a través de su efecto sobre la estructura del suelo y sobre la capacidad de retención de agua<sup>48</sup>.

**Figura 10. Firma espectral de los suelos según su contenido de humedad.**



Fuente: Leblon, B. Soil and Vegetation Optical Properties. Remote Sensing and GIS laboratory. Faculty of Forestry and Environmental Management. University of New Brunswick, Canada. [www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm](http://www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm) [citado 20 de diciembre de 2015].

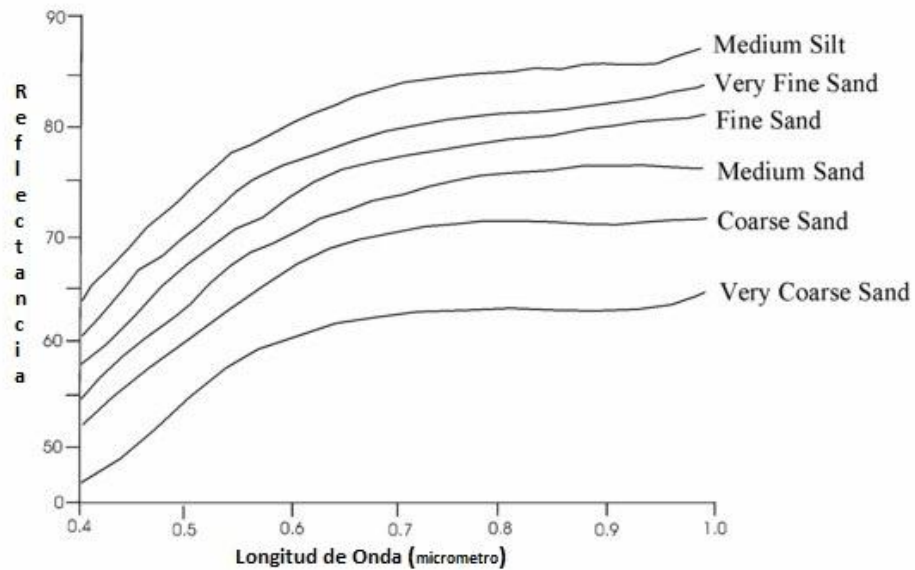
El último factor que puede afectar las propiedades ópticas del suelo, es la rugosidad relacionada con su textura. Resultados experimentales mostraron que la reflectancia del suelo es incrementada con la disminución del tamaño de las partículas para determinado tipo de suelo. En efecto, suelos con partículas gruesas muestran superficies rugosas donde la luz es atrapada. Este cambio en la

---

<sup>48</sup> Ibid

distribución de áreas de luz y sombra con la rugosidad superficial induce en la variación de reflectancia del suelo<sup>49</sup> (Figura 11).

**Figura 11. Firma espectral del suelo según el tamaño de las partículas que lo componen**



Fuente: Departamento de Geología de la Universidad Musulmana de Aligarh.  
<http://www.geol-amu.org/notes/m1r-1-8.htm>

## 5. ANTECEDENTES

El uso de imágenes espectrales para caracterizar las superficies anómalas asociadas con microfugas provenientes de reservorios en profundidad fue

---

<sup>49</sup> Ibid

empleado por primera vez en el campo petrolero Patrick Draw, Wyoming a finales de los años 70<sup>50</sup>.

A partir de esa fecha y gracias a los avances tecnológicos de las diferentes misiones satelitales se han llevado a cabo varios estudios al respecto en la última década, resaltando los siguientes:

Wang y Ding<sup>51</sup> estudiaron dos secciones en el este de Sichuan, China a través de análisis simultáneos de geoquímica orgánica del suelo, mineralogía y química del suelo. La respuesta espectral y los mecanismos de sensores remotos son estudiados a través de análisis espectral del suelo entre los rangos de las bandas VIS-NIR. El resultado de este estudio demostró que las microfugas de hidrocarburos a largo plazo pueden inducir alteraciones químicas y minerales en los suelos, incluyendo el incremento en contenido de minerales arcillosos y minerales de carbonato, incremento en el contenido de óxido ferroso y decrecimiento en el contenido de óxido férrico. El incremento en el contenido de minerales arcillosos y de carbonatos en el suelo puede causar disminución en la reflectancia en las bandas VIS-NIR en las imágenes LANDSAT e incremento en la relación de bandas TM5/TM7. El incremento del contenido de óxido ferroso y decrecimiento en óxido férrico puede causar el aumento de la reflectancia en el rango de 400nm a 600nm, y aumentar la reflectancia en la relación de bandas TM1/TM3 y TM2/TM3.

Souza y Paradella<sup>52</sup> realizaron un trabajo en el que mapearon las principales características geomorfológicas y unidades de vegetación en la península Braganca al norte de Brasil. Este trabajo fue basado en diferentes técnicas de procesamiento digital separadamente aplicadas a imágenes LANDSAT TM y

---

<sup>50</sup> Khan, S., Jacobson, S., 2008. Remote Sensing and Geochemistry for Detecting Hydrocarbon Microseepage. Geological Society of America Bulletin, vol 120, 96-105.

<sup>51</sup> Wang, Y., Ding, X., 2000. Hydrocarbon Alteration Characteristics of Soil and Mechanism of Detection by Remote Sensing in East Sichuan Area, China, , Natural Resources Research, vol.9, No. 4, 295-305.

<sup>52</sup> Souza, P.W.M., Paradella, W.R., 2002. Recognition of the main Geobotanical Features Along the Braganca Mangrove Coast (Brazilian Amazon Region) from LANDSAT TM and RADARSAT-1 data, Wetland Ecology and Management 10, 123-132.

RADARSAT-1. Ambas imágenes fueron unidas pixel a pixel usando algoritmos con los cuales se hicieron un mejoramiento de los relieves costeros y mejor discriminación de pantanos y tipos de relieves. La interpretación del producto integrado ayudado por la validación en campo, hizo posible ampliar el mapeo existente. Diecinueve unidades geobotánicas fueron identificadas.

De Souza filho<sup>53</sup> analizó las características geobotánicas a través de sensores remotos en la zona de Remanso do Fogo, Brasil. El principal objetivo fue evaluar la probable relación entre zonas ricas en fugas de hidrocarburos y las anomalías geobotánicas. La investigación es basada en el procesamiento de imágenes multiespectrales ASTER y datos de gasometría. El proceso incluyó evaluación estadística de los datos de gasometría, la caracterización espectral de la vegetación a lo largo de las anomalías geoquímicas producidas por hidrocarburos, realización de la clasificación espectral de las imágenes ASTER utilizando un ángulo espectral n-dimensional con el fin de detectar áreas con microfugas de hidrocarburos, principalmente guiados por los espectros de la vegetación. Las áreas mapeadas como anómalas espectralmente mostraron evidencia de filtraciones en numerosos lugares verificados en campo. De acuerdo a los análisis geoquímicos se establecieron anomalías de primer, segundo y tercer orden de contenido de gases con valores de 7.01-22.00 ppm, 22.01-29.00 ppm, 29.01-292.36 ppm, respectivamente. Se reportaron anomalías gasométricas en zonas con áreas de hasta 8 Km<sup>2</sup> para anomalías de tercer orden y 0,2 Km<sup>2</sup> para anomalías de primero orden, constituyendo el centro de la anomalía. De Souza considera que un alto número de anomalías gasométricas puntuales generan áreas de anomalías suficientemente grandes para ser detectadas a través de sensores multiespectrales de resolución espacial media como ASTER (15 a 30 m pixel).

---

<sup>53</sup> De Souza Filho, C.R., Augusto, V., Oliveira, W.J., Lammoglia, T., 2008. Hydrocarbon Seepage Detection Through Geobotanic and Multi-temporal Remote Sensing: A Case study on Remanso do Fogo (MG). Revista Brasileira de Geociencias, 38, suplemento 2, 228-243.

Petrovic y otros<sup>54</sup> identificaron cambios químicos y mineralógicos en las rocas de Wingate, en el valle Lisbon, Utah, incluyendo blanqueamiento de capas rojas, precipitación de altos contenidos de limonita y carbonatos, anómalos patrones de meteorización y altos contenidos de arcilla. Imágenes multiespectrales ASTER e imágenes de radar SAR fueron usadas para identificar áreas con alteraciones mediante clasificación espectral, análisis de componentes principales (PCA), donde se identificaron áreas alteradas y no alteradas. Las áreas alteradas muestran longitudes de 2 a 3 Km.

Zhang y otros<sup>55</sup> emplearon imágenes LANDSAT 7 ETM+ para identificar áreas anómalas causadas por fugas de hidrocarburos en fuláerji en la zona oeste de la cuenca Songliao, China. Se emplearon tres técnicas de mejoramiento de imágenes, incluyendo análisis de componentes principales (PCA), relación entre bandas y composición de falso color (FCC). El resultado indica que anomalías son expresadas como débiles tonos y son principalmente localizadas en sedimentos del Holoceno. Un análisis llevado a cabo en dos secciones transversales identifico anomalías que sugieren que están relacionadas a las áreas anómalas interpretadas por los FCC en la imagen. Los datos de campo de la susceptibilidad magnética y delta de carbonato son consistentes con la distribución de las anomalías tonales y sugieren una positiva asociación espectral ente las áreas anómalas identificadas y los ambientes con filtraciones de hidrocarburos. Los resultados obtenidos durante este análisis mediante la composición de falso color de la imagen mostraron áreas anómalas de hasta 9 Km \* 5 Km.

---

<sup>54</sup> Petrovic, A., Khan, S.D., Chafetz, H.S., 2008. Remote Detection and Geochemical Studies for Finding Hydrocarbon-induced Alteration in Lisbon Valley, Utah. *Marine and Petroleum Geology* vol.25, 696-705.

<sup>55</sup> Zhang, G., Zou, L., Shen, X., Lu, S., Li, C., Chen, H., 2008. Remote Sensing Detection of Heavy Oil Through Spectral Enhancement Techniques in the Western Slope Zone of Songliao Basin China. *AAPG* vol.93, No. 1, 31-49.

Noomen y otros<sup>56</sup> aplicaron estudios de geobotánica en áreas afectadas por prolongada exposición de los suelos a microfugas de hidrocarburos. En este estudio cuatro índices de vegetación fueron probados por su efectividad en la detección de los patrones de vegetación afectada. Los patrones de vegetación alrededor de fugas de hidrocarburos en un prado cerca de Ojai, California en Estados Unidos, mostro que a una distancia de 20 m desde la fuente, un circulo de suelo desnudo prevalece, el cual es rodeado por un anillo de aproximadamente 10 m de ancho de densa vegetación. En su hipótesis, una combinación de cambios en el oxígeno del suelo y aguas subterráneas causaron estos patrones. Se aplicaron análisis de imágenes multiespectrales PROBE-1, sobre esta imagen se aplicaron índices de vegetación de Lichtenthaler (R440/R740), el cual resulto el mejor para discriminar zonas desnudas y zonas con vegetación sana, los otros tres índices de vegetación fueron usados exitosamente para determinar los contenidos de clorofila en las plantas afectadas por la presencia de gases.

Shi y otros<sup>57</sup> estudiaron las anomalías litológicas en la cuenca Kuqa al sur de Tian Shan, china por medio de procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales ASTER. En este estudio se combinó los datos multiespectrales espaciales con espectrometría en campo, geoquímica e información mineralógica para mapear áreas con microfugas de hidrocarburos. Se encontró que la relación entre las bandas 2/1 y 4/9 revela firmas minerales relacionadas con la alteración inducida por microfugas de hidrocarburos como son el blanqueamiento de las capas rojas y carbonato secundario respectivamente. Adicionalmente, las microfugas de hidrocarburos son también una fuente no despreciable de emisión de gases de invernadero, los sistemas de sensores remotos multiespectrales pueden ser potencialmente usados para mapear o monitorear emisiones de gases

---

<sup>56</sup> Noomen, M., Van der Werff, H.M.A., Van der Meer, F.D., 2012. Spectral and Spatial Indicator of Botanical Changes Caused by Long-term hydrocarbon seepage, *Ecological Informatic* 8, 55-64.

<sup>57</sup> Shi, P., Fu, B., Ninomiya, Y., Sun, J., Li, Y., 2011. Multispectral Remote Sensing Mapping for Hydrocarbon Seepage-Induced Lithologic Anomalies in the Kuqa Foreland Basin, South Tian Shan, *Journal of Asian Earth Sciences* 46, 70-77

invernadero. A lo largo del anticlinal Qiulitage se identificaron zonas de alteración con 10 km de largo y 3 km de ancho aproximadamente.

En Colombia la aplicación de sensores remotos en la exploración de hidrocarburos ha sido ampliamente utilizada para la caracterización de litologías y patrones estructurales y geomorfológicos. Esta técnica ha sido encaminada a la exploración de hidrocarburos convencionales. Para el reconocimiento de áreas con presencia de arenas bituminosas no se tiene mayor información de fácil acceso de esta aplicación debido a que constituyen informes con nivel de confidencialidad de las empresas que han llevado a cabo estos estudios.

## 6. METODOLOGIA

La metodología aplicada en este trabajo toma como referencia los trabajos llevados a cabo en varios países, en los cuales se han utilizado las imágenes satelitales para identificar la presencia de hidrocarburos a través del análisis e interpretación de las características espectrales de los materiales en la superficie<sup>58, 59, 60</sup>.

En este apartado se describe la metodología usada durante el desarrollo de la tesis. Los datos utilizados son divididos en dos tipo: 1) información primaria, obtenida a través de datos colectados en campo y el procesamiento de imágenes satelitales; y 2) información secundaria, que hace referencia a toda la información colectada a través de las diferentes instituciones estatales dedicadas la investigación como el IDEAM, ICP Ecopetrol, IGAC y diferentes corporaciones (Tabla 2).

---

<sup>58</sup> Noomen, Op.Cit

<sup>59</sup>Almeida T.I.R., De Souza, C. R., Juliani, C., Cardinale, F., 2009. Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect hidrotermal Alteration Facies in Epithermal High-Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. Society of Economic Geologist, Vol 16, Chapter 11, p 135-142.

<sup>60</sup> De Souza, Op.Cit

**Tabla 2. Tipo de datos adquiridos durante el desarrollo del trabajo**

DATOS	TIPO DE DATOS	FUENTE
Imágenes Satelitales	primaria	NASA, BlackBridge
Reflectancia de suelo y vegetación en campo	Primaria	Trabajo de campo, IGAC
Concentración de gases en suelo	Secundaria	ICP
Geología	Secundaria	ICP, Servicio geológico colombiano (SGC)
Datos meteorológicos	Secundaria	IDEAM
Datos Geográficos	Secundaria	IGAC
DEM (5m)	Secundaria	Tesis pregrado

La metodología seguida en la tesis consiste en 6 pasos: 1) Obtención y análisis de información bibliográfica e información secundaria, 2) Adquisición de imágenes satelitales 3) Pre-procesamiento de imágenes, 4) Obtención de datos en campo, 5) Procesamiento de imágenes satelitales y datos de campo, 6) Integración de la información e interpretación (Figura 12).

## 6.1 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

La fase de obtención y análisis de bibliografía es fundamental para el inicio del trabajo y durante todo su desarrollo, debido a que a través de este se define el estado del arte y analizan los conceptos relacionados con los sensores remotos y los procesos involucrados para la obtención de información.

La obtención de la información se lleva a cabo a través de búsquedas en la web y bases de datos disponibles.

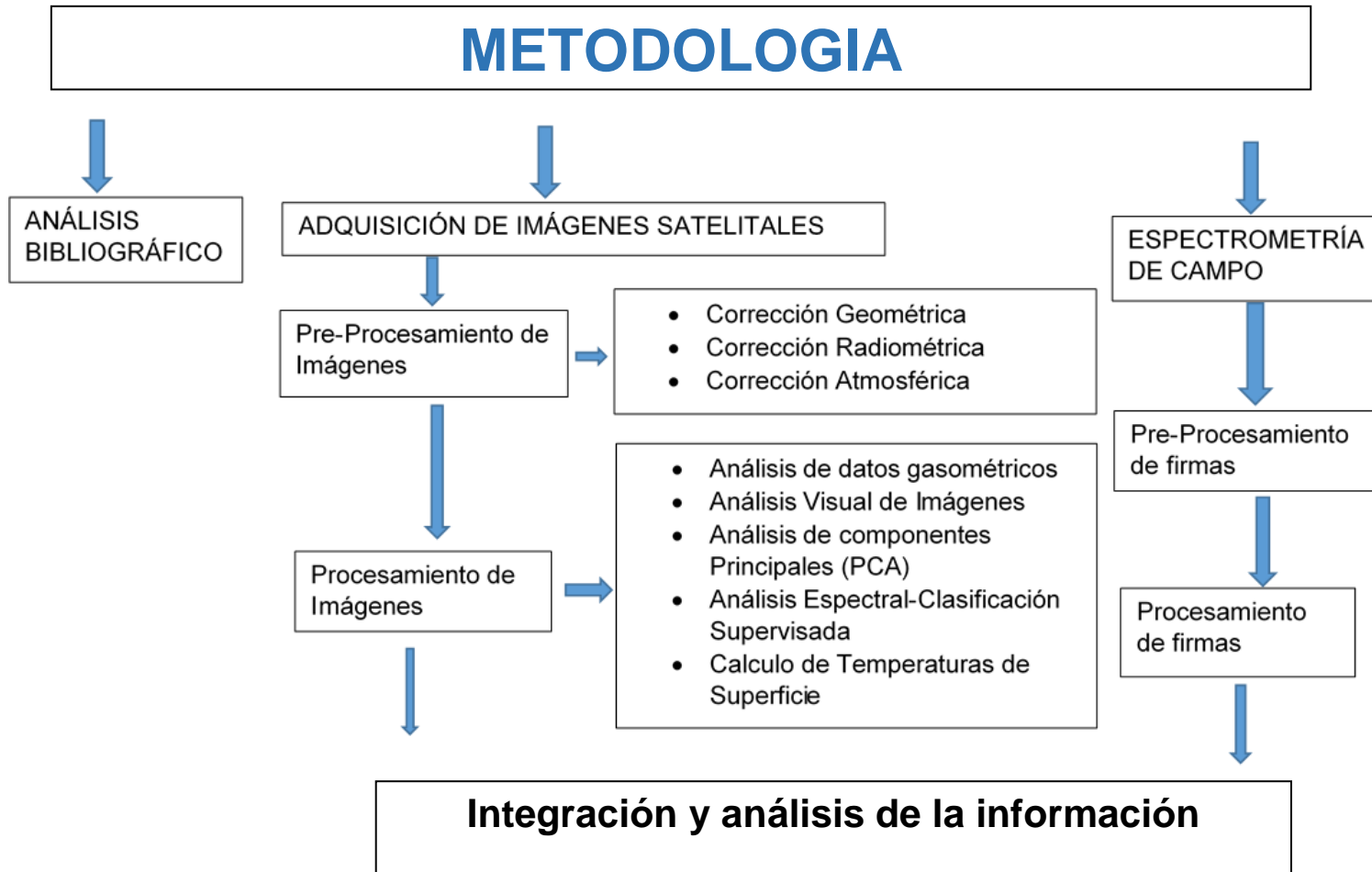
La biblioteca de la Universidad Industrial de Santander cuenta con acceso a un conjunto de base de datos en las que se cabe destacar las siguientes:

Ebsco Host  
ProQuest  
ScienceDirect  
SciVerseScopus  
Springer  
Georef  
AAPG journal

Para el caso concreto en procesos y aplicaciones en técnicas de sensores remotos, la base de datos del Instituto de ingeniería Eléctrica y Electrónica IEEE, ofrece gran número de artículos relacionados.

A través de las agencias estatales como el Servicio Geológico Colombiano, IDEAM, ICP e IGAC se adquieren información secundaria usada como apoyo.

Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología seguida



## 6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

### 6.2.1 Imágenes LANDSAT

Considerado como el primer satélite dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres, la serie de satélites LANDSAT suministra datos desde la década de los setenta. Las imágenes LANDSAT ofrecen un cubrimiento de un área de 180 \* 180 Km aproximadamente. En la Tabla 3 se resumen las características principales de cada una de las misiones de la serie LANDSAT.

Las imágenes de la serie de satélites LANDSAT se obtienen a través de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), <http://earthexplorer.usgs.gov/>, por medio de la plataforma Earth Explorer o la herramienta Glovis, las cuales ofrecen las imágenes de los sistemas TM, ETM y OLI en tres niveles de procesamiento:

Nivel 1T. Corrección de terreno estándar: Provee imágenes con corrección geométrica mediante la incorporación de puntos de control mientras emplea un modelo digital de elevación (DEM) para precisión topográfica. La precisión geodésica del producto depende de la precisión de los puntos de control y la resolución del DEM empleado. Los puntos de control provienen de GLS2000. Las fuentes del DEM incluyen SRTM, NED, CDED, DTED, GOPO 30. La precisión del GLS2000 es menor a un pixel, lo cual significa que la precisión de la imagen es de 30 m o menos.

**Tabla 3. Resumen de las características principales de las imágenes de la serie LANDAST**

SENSOR	Altura Orbital (Km)	Resolución Espectral		Resolución Espacial (m)	Resolución Temporal (días)	Resolución Radiométrica
		Banda	Rango ( $\mu\text{m}$ )			
LANDSAT 4 TM	705	4	0.50-0.60	79	18	8 bit
		5	0.60-0.70			
		6	0.70-0.80			
		7	0.80-1.10			
LANDSAT 5 TM	705	1	0.45-0.52	30	16	8 bit
		2	0.52-0.60			
		3	0.63-0.69			
		4	0.76-0.90			
		5	1.55-1.75			
		7	2.08-2.35			
6	10.4-12.5	120				
LANDSAT 7 ETM+	705	1	0.45-0.53	30	16	8 bit
		2	0.53-0.60			
		3	0.63-0.69			
		4	0.76-0.90			
		5	1.55-1.75			
		7	2.08-2.35			
6	10.4-12.5	60				
LANDSAT 8 OLI	705	1	0,43-0,45	30	16	16 bit
		2	0,45-0,51			
		3	0,53-0,59			
		4	0,64-0,67			
		5	0,85-0,88			
		6	1,57-1,65			
		7	2,11-2,29			
		8	0,50-0,68			
		9	1,36-1,38			
		10	10,60-11,19	100		
		11	11,50-12,51			

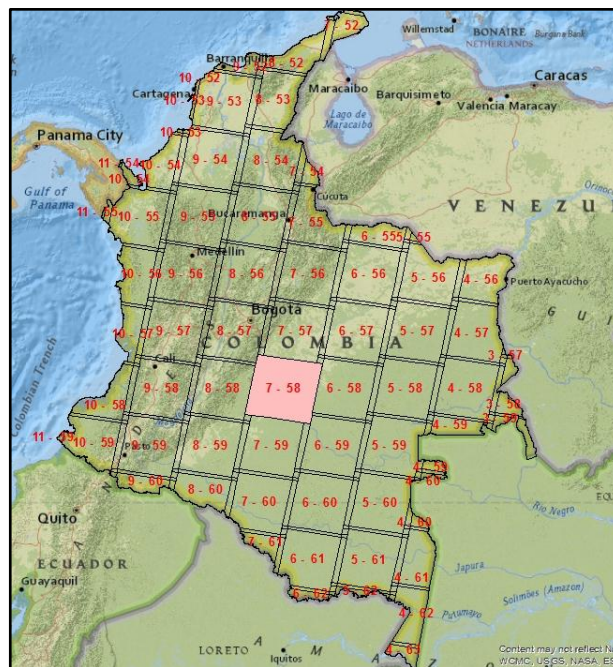
Nivel 1Gt. Corrección del terreno sistemático. Provee una precisión sistemática radiométrica y geométrica, empleando un DEM para precisión topográfica.

Nivel 1G. Provee una precisión sistemática radiométrica y geométrica, la cual es derivada de datos colectado por el sensor. La precisión geométrica del producto corregido está en 250 m para áreas con bajo relieve al nivel del mar.

El producto procesado de los sensores TM, ETM, y OLI se obtiene en formato Geotiff, con método de remuestreo CC (cubic convolution), con una resolución de 30 metros, para las bandas multispectrales, en proyección UTM (Universal Transverse Mercator) y un Datum WGS84.

Luego de determinar el Path y Row (Figura 13) correspondiente al área de interés (PATH 7, ROW 58), se procede a realizar la descarga de cada una de las imágenes disponibles y seleccionar las más apropiadas teniendo en cuenta el nivel de procesamiento de la imagen, el grado de cobertura por nubes y la fecha de adquisición considerando fechas distintas relacionadas con periodos secos y húmedos de la zona específica de los Llanos Orientales.

**Figura 13. Distribución de los path y row de las imágenes LANDSAT para Colombia. Resaltado en rosa el path 7, row 58 que cubre el área de interés.**



Fuente: USGS (U.S Geological Survey) <http://www.usgs.gov/>

Gracias a la amplia disponibilidad de las imágenes LANDSAT, se pudieron obtener imágenes de diferentes fechas (Tabla 4).

**Tabla 4. Lista de imágenes LANDSAT descargadas con su fecha de adquisición.**

IMAGEN	SENSOR	FECHA
IMG_6237	L5	agosto_1986
IMG_8011	L4	enero_1988
IMG_9357	L5	diciembre_1989
IMG_7347	L5	diciembre_1997
IMG_9065	L5	marzo_1999
IMG_1062	L7	marzo_2001
IMG_4090	L8	marzo_2014

### 6.2.2 Imágenes ASTER

ASTER es un sensor japonés instalado en el satélite Terra de la NASA, cuenta con la mayor resolución espacial disponible en el grupo de satélites que conforman el proyecto EOS de la NASA. Sus objetivos principales es medir las propiedades de las nubes, estudios de la vegetación y suelos, temperatura terrestre y topografía. Sus características principales se encuentran resumidas en la Tabla 5.

**Tabla 5. Principales características de las imágenes ASTER**

Sistema	Banda	Rango ( $\mu\text{m}$ )	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
VNIR	1	0.52-0.60	15 m	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.600-1.700	30 m	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
TIR	9	2.360-2.430	90 m	12 bits
	10	8.125-8.475		
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

Las imágenes ASTER se adquieren por medio electrónico a través de la página oficial del sensor <http://gds.ASTER.ersdac.jspacesystems.or.jp>, en la cual se debe registrar como usuario y realizar la solicitud correspondiente de las imágenes a adquirir.

El proveedor de las imágenes ASTER ofrece una serie de productos según su nivel de procesamiento que se generan a partir de un producto inicial con un nivel de procesamiento mínimo (Tabla 6).

**Tabla 6. Productos ofrecidos por el sensor ASTER según su nivel de procesamiento.**

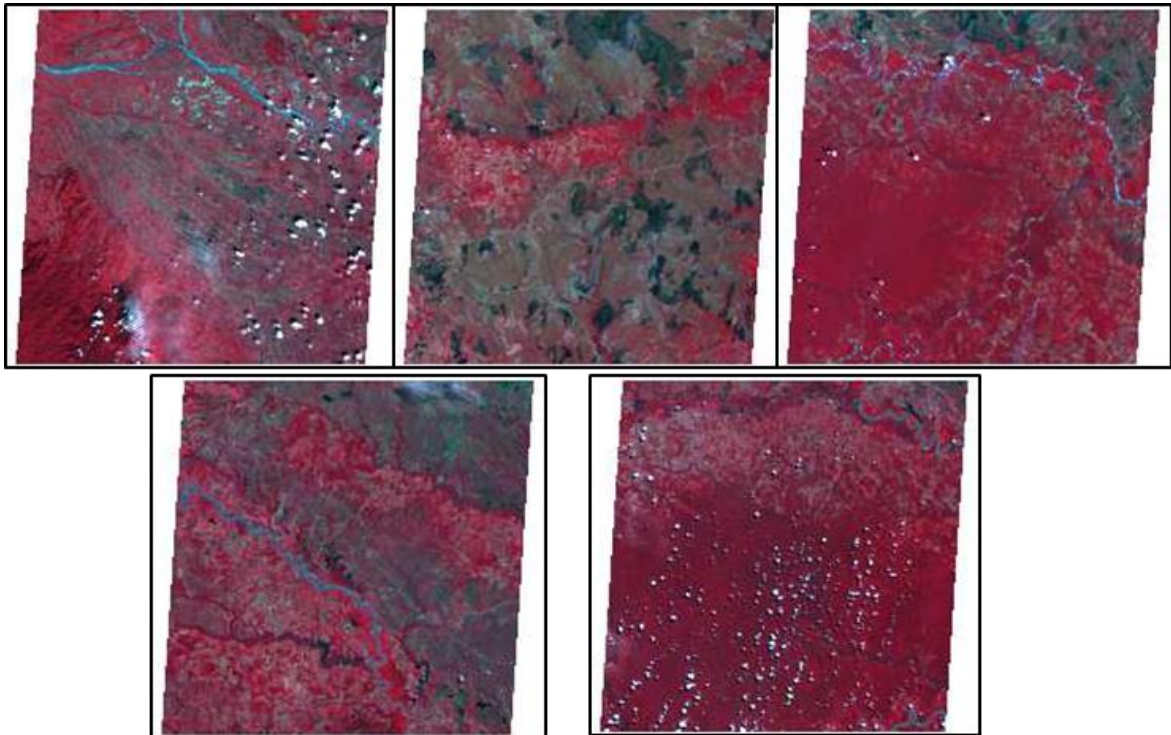
Código	Producto	Observaciones
1A	Imagen Nivel 1A	Los coeficientes de calibración geométrica y radiométrica no son aplicados a la imagen y son anexados. Todos los productos son generados a partir de este.
1B	Imagen Nivel 1B	Este producto es generado a partir de la aplicación de coeficiente de calibraciones geométricas y radiométricas contenidas en el nivel 1 A.
2B01V	Radiancia superficial VNIR	Luego de aplicar las correcciones atmosféricas los valores de radiancia son calculados. Este proceso solo es calculado en pixeles sin nubes.
2B01S	Radiancia Superficial SWIR	
2B01T	Radiancia Superficial TIR	
2B03	Temperatura de superficie	Este producto es generado a partir de los datos del producto 2B01T
2B04	Emisividad de superficie	Este producto es generado a partir de los datos del producto 2B01T
2B05V	Reflectancia de superficie VNIR	Este tipo de imágenes indica la reflectancia en superficie después de una corrección atmosférica con una resolución de 15 m y 30 m para VNIR y SWIR respectivamente. Los datos son representados en porcentajes.
2B05S	Reflectancia de superficie SWIR	
3A01	Imagen Ortogonal	Este producto es corregido para remover la distorsión geográfica causada por la topografía (ortoimagen)
4A01	DEM	Este producto no calcula la posición absoluta o altura usando puntos de control superficiales (GCP), este es llamado DEM relativo.

Fuente: [www.gds.ASTER.ersdac.jspacesystems.or.jp](http://www.gds.ASTER.ersdac.jspacesystems.or.jp)

Para efectos del presente proyecto se seleccionan las imágenes con un nivel de procesamiento 1A (Figura 14), en las que los coeficientes de correcciones radiométricas vienen anexos para ser aplicados durante la etapa de pre-procesamiento, esto con el fin de tener seguridad que los datos obtenidos no han

sufrido modificaciones o contaminaciones que pueden afectar la calidad de los resultados, este tipo de datos se le conocen como imágenes en bruto o crudas.

**Figura 14. Quicklook de las imágenes ASTER obtenidas para el área de interés. Combinación RGB 321.**



### 6.2.3 Imágenes RAPIDEYE

Las imágenes RAPIDEYE son adquiridas a través de una constelación de cinco pequeños satélites idénticos propiedad de la compañía alemana BLACKBRIDGE, la cual distribuye sus imágenes a partir del 2009.

El sensor RAPIDEYE posee cinco bandas en el visible al infrarrojo cercano (VNIR), incluyendo la banda red edge centrada en 710 nm (Tabla 7). La banda red edge tiene gran importancia en la estimación de clorofila foliar y la concentración

de N (Nitrógeno), esto ha sido demostrado por previos estudios en los que usualmente se aplica espectrometría de campo<sup>61</sup>.

La adquisición de las imágenes RAPIDEYE se hace a través de un proveedor autorizado, quienes suministran los quicklook de las áreas de interés y determinar la viabilidad de la adquisición (Figura 15).

**Figura 15. Quicklook de la imagen Rapideye adquirida para la zona del polígono LlanoSur**



---

<sup>61</sup> Ramoelo, A., Skidmore, A.K., Cho, M.A., Mathieu, R., Heitkonig, I.M.A., 2012. Regional Estimation of Savanna Grass Nitrogen Using the Red-Edge Band of the Spaceborne Rapideye Sensor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 19, 151-162.

**Tabla 7. Principales características de la serie de sensores RAPIDEYE**

<b>Características</b>	<b>Información</b>	
Numero de satélites	5	
Altitud de orbita	630 Km heliosincrónica	
Hora de cruce ecuatorial	11:00 am hora local aproximadamente	
Tipo de sensor	Push Broom Multispectral	
Bandas espectrales	Azul	440 – 510 nm
	Verde	520 – 590 nm
	Rojo	630 – 685 nm
	Red-Edge	690 – 730nm
	NIR	760 – 850 nm
Tamaño nominal de pixel	6,7 m	
Tamaño de pixel ortorrectificado	5 m	
Ancho de barrido	77 km	
Capacidad de almacenamiento abordo de	1.500 Km <sup>2</sup> de imágenes por orbita	
Periodo de revista	1 día	
Capacidad de captura de imágenes	4 millones de Km por día	
Rango dinámico de cámara	12 bits	

Fuente:

[www.blackbridge.com/RAPIDEYE/upload/RE\\_Product\\_Specifications\\_ENG.pdf](http://www.blackbridge.com/RAPIDEYE/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf)

### **6.3 PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

Las imágenes adquiridas durante la fase inmediatamente anterior son datos crudos que deben ser sometidos a una serie de mejoras digitales para obtener una visualización óptima y asegurarse que los datos correspondan a datos verdaderos,

es decir, lo más semejante al mundo real. Esto debido a que la información obtenida luego de los procesamientos proviene de la característica y el valor espectral de cada pixel.

### 6.3.1 Corrección Geométrica

Las imágenes satelitales y fotografías aéreas de la superficie terrestre generalmente contienen distorsiones espaciales debido al relieve del terreno. La ortorectificación es un procedimiento que remueve dichas distorsiones, creando una ortoimagen con sus puntos posicionados como deberían estar en un mapa planímetro. La información espacial extraída de una ortoimagen tiene mayor precisión.

Los modelos RPC (Rational Polynomial Coefficient) son un modelo empírico matemático que relaciona las coordenadas de una imagen (posición líneas y columna) con latitudes y longitudes usando la elevación de la superficie terrestre (DEM). El nombre RCP deriva del hecho que el modelo es expresado como un ratio de dos expresiones cúbicas polinomiales. Una imagen satelital cuenta con dos expresiones polinomiales, una para calcular la posición de las filas y otra para calcular la posición de las columnas.

Los coeficientes para cada expresión polinomial son calculados por el diseñador del sensor a priori a partir de su posición orbital y un riguroso modelo del sensor.

El modelo digital del terreno (DEM) usado para la ortorectificación necesita coincidir con el tamaño del área de la imagen.

A través de la misión SRTM se descargaron datos numéricos, los cuales fueron procesados con el método de interpolación Spline- Mitasova para obtener un

DEM con un tamaño de pixel de 5 m, con un error de desviación estándar acumulado de 0.102530<sup>62</sup>.

Las imágenes ASTER fueron obtenidas con un nivel de procesamiento 1A. Cada una de ellas fue ortorectificada mediante el método RCP. Debido a que el satélite captura la imagen con diferentes subsistemas, se realizó la ortorectificación de cada subsistema VNIR y SWIR.

Se obtienen dos imágenes ortorectificadas VNIR\_ortho y SWIR\_ortho, la primera con una resolución espacial de 15 m y 3 bandas espectrales y la segunda con una resolución espacial de 30 m y 6 bandas espectrales.

Las imágenes son coregistradas mediante el proceso de “layer staking”, en el que se genera una imagen con 9 bandas en el rango de VNIR-SWIR, con una resolución espacial de 15 m.

RAPIDEYE tiene un nivel de procesamiento 1B, lo que indica que solo cuenta con sus 4 puntos extremos georeferenciados. Se aplica ortorectificación con el método de RPC, obteniéndose una ortoimagen con una resolución espacial de 7 m.

Las imágenes LANDSAT descargadas desde el visor Earth Explorer (USGS), se obtiene en niveles de procesamiento L1T, el cual cuenta con una ortorectificación y una proyección geográfica UTM.

Cada una de las imágenes fue reprojectada usando la herramienta “Reproject Raster” en ENVI 5.1. La transformación se realiza mediante el método polinomial y remuestreo mediante el vecino más cercano.

Las imágenes se obtienen con las siguientes características geográficas:

ProJCS: MAGNA\_Colombia\_Bogota

Geogcs GCS\_MAGNA

---

<sup>62</sup> Diaz, L., Contreras, D., 2015. Caracterización De Los Parámetros Morfométricos, En Los Bloques Caño Sur, CPO 16, CPO 17, Río Ariari, En La Zona Llanos Sur De La Cuenca De Los Llanos Orientales, Mediante La Técnica De Modelos De Elevación Digital DEM. Tesis de Pregrado. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Datum	D_MAGNA
Esferoide	GRS_1980
Proyeccion	Transversa Mercator
Falso Norte	1000000
Falso Este	1000000
Meridiano Central	-74.07750791666
Latitud de origen	4.596200416
Unidades	metros

### 6.3.2 Corrección Radiométrica

El termino genérico para los valores de los pixeles es numero digita (ND) comúnmente usado para describir los valores del pixel que no han sido calibrados a unidades físicas.

La Radiancia ( $L\lambda$ ) es una cantidad de la radiación que llega a un área determinada. Para obtener una imagen en radiancia a partir de una imagen cruda, se deben aplicar los valores de gain y offset, los cuales están disponibles dentro del metadato de la imagen. La radiancia es calculad usando la ecuación (1)

$$1. L\lambda = Gain * valor\ pixel + offset$$

Las unidades de los valores de gain y offset generalmente se encuentra en  $W/(m^2 * sr * \mu m)$ , así que la imagen en radiancia tendrá la misma unidad (Tabla 8).

Los valores de los pixeles de la imagen RAPIDEYE corresponden a una factor de  $1/100 W/(m^2 * sr * \mu m)$ . Para convertir el ND de los pixeles a radiancia es necesario multiplicar el valor de ND por un factor de escala radiométrica como se indica:

$$RAD = ND * factor\ de\ escala$$

**Tabla 8. Valores de offset y gain para la serie de sensores LANDSAT**

LANDSAT 4 TM			LANDSAT 5 TM	
Banda	Gain	Offset	Gain	Offset
1	0,647717	-2,17	0,677134	-2,19
2	1,334016	-4,17	1,322205	-4,16
3	1,004606	-2,17	1,043976	-2,21
4	0,876024	-2,39	0,876024	-2,39
5	0,12579	-0,5	0,120354	-0,49
6	0,055376	1,24	0,055376	1,18
7	0,065945	-0,22	0,065551	-0,22
LANDSAT 8 OLI			LANDSAT 7 ETM+	
1	0,01298	-64,913	0,77874	-6,98
2	0,01329	-66,472	0,798819	-7,2
3	0,012251	-61,253	0,621654	-5,62
4	0,01033	-51,652	0,639764	-5,74
5	0,006321	-31,609	0,12622	-1,13
6	0,001572	-7,8608	0,037205	3,16
7	0,00053	-2,6495	0,043898	-0,39
8	0,011691	-58,456		
9	0,002471	-12,353		
10	0,000334	0,1		
11	0,000334	0,1		

Fuente: Modificado de Chander, G., Markham, B.L., Helder, D. L., 2009. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensor. Remote Sensing of Environment, 113, p 893-903.

Donde el factor de escala radiométrica se encuentra dentro del archivo del metadato y corresponde a un valor de 0.01. La imagen hereda las unidades de  $W/(m^2 * sr * \mu m)$ .

ENVI 5.1 calibra automáticamente y aplica el factor de escala a las imágenes ASTER nivel 1A y 1B.

Para el cálculo de radiancia de las imágenes HYPERION se debe aplicar un factor de escala que corresponde a un valor de 0.025 para las bandas de VNIR (1-70), y

para el rango de SWIR (71-242) el valor del factor de escala corresponde a 0.0125. Los valores de radiancia se obtiene en unidades de  $W / (m^2 * sr * \mu m)$ .

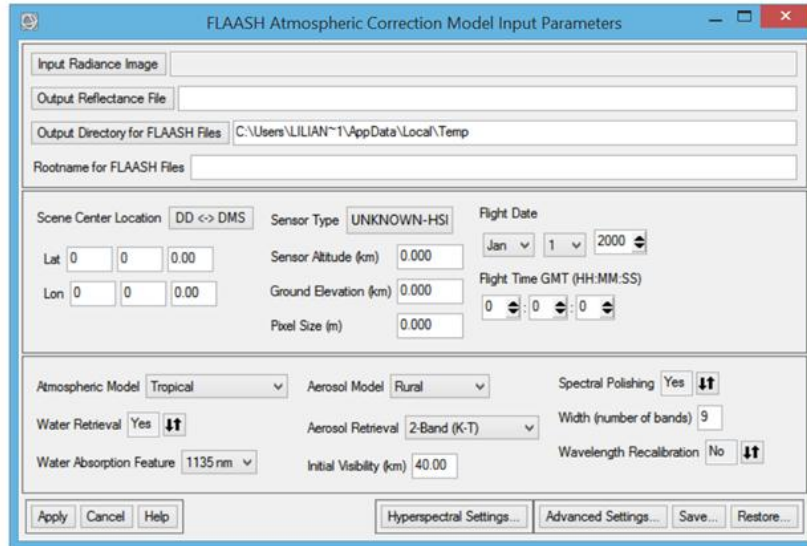
### 6.3.3 Corrección atmosférica

Para realizar los cálculos de reflectancia de superficie sobre cualquier imagen satelital se necesita remover los efectos atmosféricos, lo cual supone estimar la transmisividad ( $\tau$ ) de la atmosfera, la irradiancia difusa (E) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión (L).

Para realizar los cálculos se emplea un modelo de transferencia radiativa de una atmosfera estándar, entre los más común se encuentran el módulo MODTRAN y 6s. El modelo MODTRAN fue desarrollado por la fuerza aérea norteamericana y una agencia privada, este modelo considera los efectos de la reflectividad bidireccional en terreno y la reflectividad de objetos cercanos. El modelo se encuentra incluido en el módulo FLAASH de ENVI.

La imagen de ingreso al módulo FLAASH debe estar calibrada radiométricamente en unidades de  $\mu W / (cm^2 * sr * \mu m)$ , en formato BIL o BIP (Figura 16).

**Figura 16. Introducción de los parámetros para corrección atmosférica en el módulo FLAASH en el software ENVI 5.1**



Los datos de ingreso se encuentran dentro del metadato de la imagen, tales como centro de imagen, fecha y hora de adquisición de la imagen. El dato de elevación se obtiene de calcular la altura promedio del área de la imagen a partir del DEM.

## 6.4 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Las imágenes preprocesadas cuentan con sus pixeles en unidades físicas, en porcentaje de reflectancia en la superficie. A partir de estos valores cada imagen es sometida a un procesamiento definido inicialmente por las características espectrales.

#### 6.4.1 Clasificación de imágenes

La identificación de los materiales en superficie a través de imágenes digitales usando software o clasificación está basada en las diferencias estadísticamente separables entre las radiancias en las bandas disponibles<sup>63</sup>.

#### 6.4.2 Ratio de bandas e índices de vegetación

A si como los datos de una imagen pueden ser mostrados como una imagen en tono de grises de una banda o una imagen color de tres bandas (RGB), también se pueden realizar combinaciones aritméticas. El uso más común es el ratio de una banda sobre otra.

La principal propiedad de una imagen producida por un ratio es que se acentúan los rasgos en la firma espectral de un material particular en la superficie. A partir de este principio se apoyan la mayoría de los índices de vegetación desarrollado por varios autores.

El uso de los ratios en la geobotánica se fundamenta en el conocimiento del comportamiento espectral de la vegetación y su interacción con el suelo y la roca bajo ella. En su estado natural las comunidades de plantas son algunas veces excelentes indicadores de la geología en terrenos húmedos.

Indicadores geobotánicos pueden ser examinados más exitosamente usando técnicas de ratios basados en referencias de espectros adquiridos en campo<sup>64</sup>.

#### 6.4.3 Análisis de componentes principales (PCA)

Es una técnica estadística útil usada para producir bandas de salida no correlacionadas para segreggar componentes de ruido y reducir la dimensionalidad de los datos. La transformación de los datos crudos de los sensores remotos

---

<sup>63</sup> Drury, S., 2001. Image Interpretation in Geology. Third Edition.

<sup>64</sup> Ibid

usando PCA puede resultar en una imagen de nuevos componentes principales que puede ser más fácilmente interpretada que la original. Las bandas de PCA producen imágenes compuestas más coloridas debido a que los datos no están correlacionados<sup>65</sup>.

#### 6.4.4 Cálculo de temperatura superficial

Interpretaciones de las imágenes termales han tenido éxito en numerosas aplicaciones, incluyendo la determinación de tipo de roca, estructuras, localización de fallas geológicas, mapeo de tipo y humedad de los suelos, localización de canales de fuga y caracterización de volcanes, evapotranspiración de la vegetación, estudios en el patrón natural de la circulación de los cuerpos de agua, determinación de la extensión de los incendios forestales y localización de incendios subterráneos en pilas de carbón<sup>66</sup>.

La aplicación de algoritmos sobre las imágenes Landsat según una serie multitemporal para la determinación de la temperatura en superficie genera mapas temáticos.

### 6.5 ESPECTROMETRÍA DE CAMPO

La campaña de espectrometría de campo consiste en la adquisición de un conjunto de firmas espectrales las cuales son la respuesta de la vegetación y el suelo a la interacción con la luz. A partir de estos datos se genera una librería espectral de suelos y vegetación.

Los datos fueron adquiridos en el mes de abril de 2015. Por cuestiones de logísticas solo se tomaron datos en el polígono del área LLANOSUR. Las

---

<sup>65</sup> Jensen, Op.Cit

<sup>66</sup> Lillesand, T., Kiefer, R., 2004. Remote Sensing and Image interpretation. Fifth Edition.

mediciones fueron tomadas en 10 puntos que, según los resultados de gasometría adquiridos por el ICP 2013, presentan alto contenido de gases (Figura 17).

Las mediciones de reflectancia absoluta fueron realizadas usando un espectroradiómetro de campo ASD Fiel Spect Pro, propiedad del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

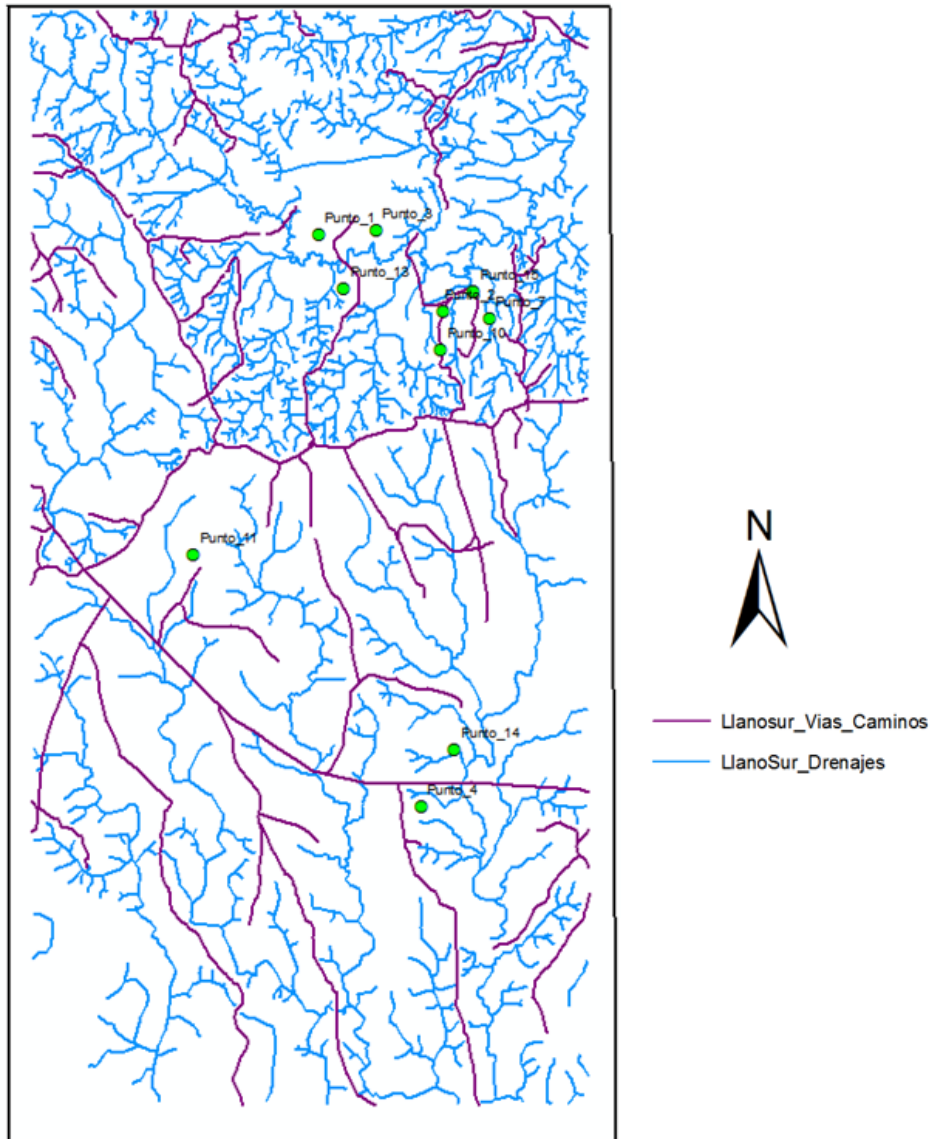
El equipo ASD (Analytical spectral Device), es un espectroradiómetro de campo compacto, portátil y de alta precisión. Registra la radiación entre las longitudes de onda de 350 a 2500 nanómetros mediante una fibra óptica de 25° de campo de visión (field of view -FOV), con la posibilidad de adaptar lentes que minimicen este FOV a 8° y 1°. La luz entrante es codificada en 16 bits y separada en tres espectrómetros para la región del VNIR, SWIR-I y SWIR-II. El dato obtenido es una firma de la reflectancia espectral puntual es el espacio, de alta espectralidad con valores generados para cada nanómetro<sup>67</sup>.

El equipo cuenta con el accesorio Contact Probe, el cual es diseñado para tomar medidas en contacto directo con el material tales como roca, suelo, minerales entre otros. Este accesorio cuenta con una fuente de iluminación interna estandarizada, con esta herramienta se tiene la ventaja de minimizar los errores en la medida debido a su enfoque.

---

<sup>67</sup> Algunas descripciones generales del espectroradiómetro de campo Field Spec de ASD. Tomado de la página oficial [www.asdi.com](http://www.asdi.com) [citado 21 de diciembre de 2015]

**Figura 17. Distribución de puntos con mayor contenido de gases totales para la toma de firmas espectrales en campo.**



Para realizar la medición directamente con la fibra óptica, esta debe ser calibrada con respecto a un blanco de referencia, este accesorio corresponde a una panel de 24\*24 cm recubierto por BaSO<sub>4</sub>, con un factor de reflectancia definido, conocido como espectralon.

El espectralon usado corresponde al SR-99-05, el cual posee un valor de reflectancia del 99% (Figura 18).

**Figura 18. Toma de firmas espectrales en campo, a) Equipo Field Spect ASD; b) Calibración de fibra óptica con espectralon (blanco de referencia); c) Accesorio Contac Probe para toma de firmas en suelos y rocas.**



La zona del polígono LLANOSUR se compone principalmente en tierras destinadas a la ganadería extensiva y el cultivo de palma africana. Sin embargo los puntos de alto contenido de gas se encuentran localizados dentro de zonas específicas donde la ganadería es el principal uso del suelo, donde se encuentran pastos bajos.

En cada uno de los puntos se trazó una transecta de 40 m de longitud donde se tomaron muestras de vegetación con fibra en un intervalo de 2 m (Figura 19), igualmente con el contact probe se tomaron muestras de suelo.

**Figura 19. Trazado de transectas para la toma de firmas espectrales, longitud 40 m**



Los datos de cada punto fueron adquiridos con el software RS3, este fue programado para adquirir 10 repeticiones por cada medición.

Para procesar los datos obtenidos, ASD dispone del software ViewSpect Pro, en el cual se abren las 10 firmas correspondientes a cada muestra para obtener una firma promedio. Cada una de las nuevas firmas es convertida a formato TXT. Debido a las bandas de absorción de agua que coinciden justo en los bordes de cambio de detectores las firmas de vegetación presentan alto contenido de ruido en los intervalos de 1350-1460 nm, 1790-2000 nm y 2430-2500nm, estos son eliminado del archivo ASCII para obtener un firma sin valores anómalos (Figura 20).

Con los datos obtenidos en campo se genera librerías espectrales de la vegetación y suelo de cada uno de los puntos. La creación de las librerías

espectrales se lleva a cabo en el software ENVI 5.1, en el cual con pocos pasos se crean archivos de extensión .sli y .txt (Figura 21).

A partir de las bibliotecas espectrales creadas anteriormente se crean nuevas librerías espectrales cuyas firmas están conformadas por el número de bandas que correspondan a los sensores Aster, Landsat y Rapideye, este procedimiento se lleva a cabo usando la herramienta de “Spectral Library Resampling” disponible en ENVI 5.1 (Figura 22).

**Figura 20. Firma espectral de vegetación tomada en campo, a) Firma con ruido; b) firma espectral luego del suavizado**

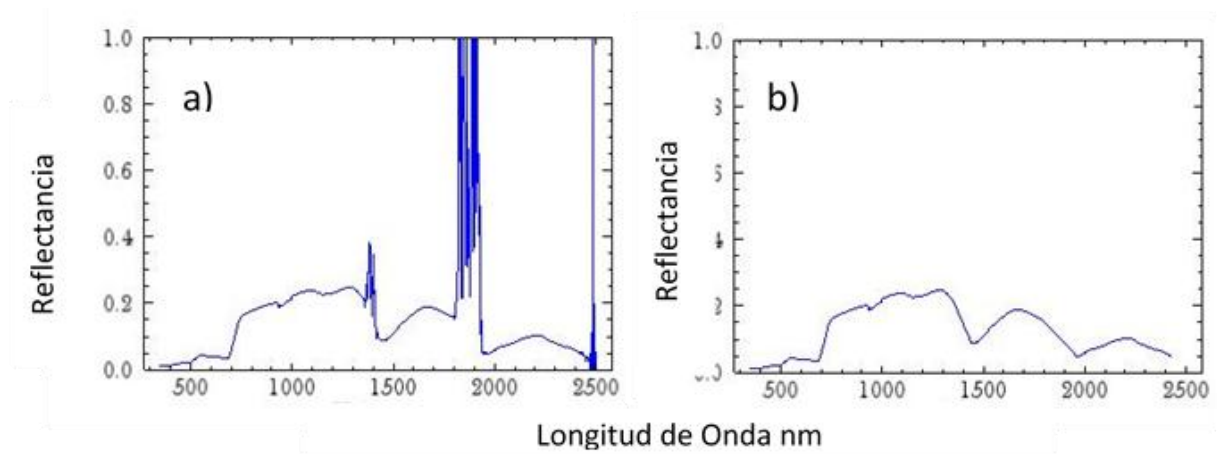


Figura 21. Procedimiento para generar una librería espectral en el software ENVI 5.1

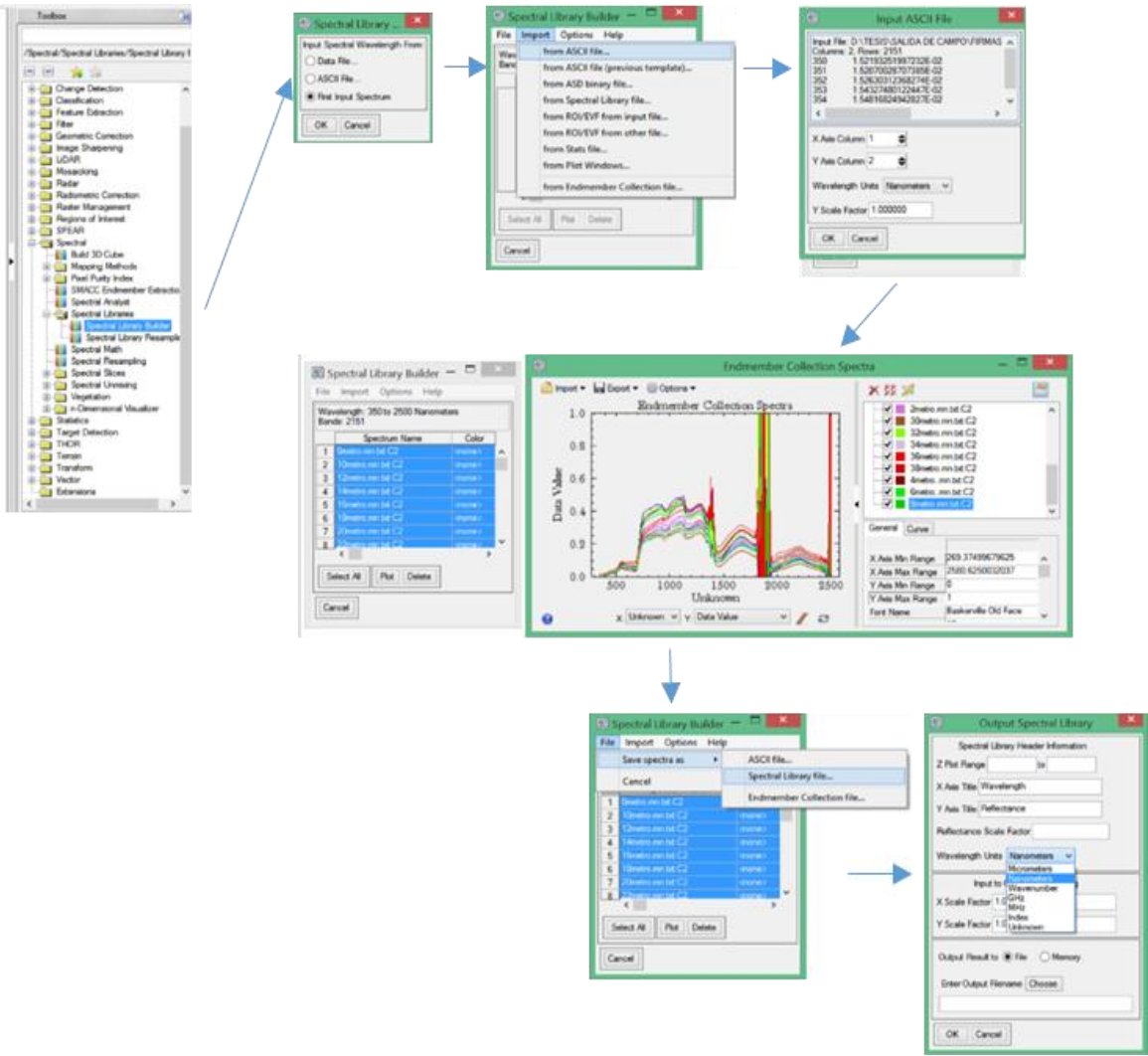
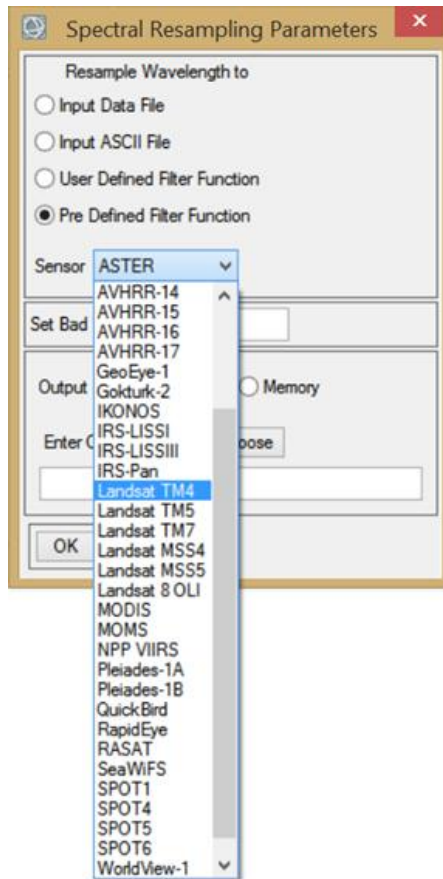


Figura 22. Transformación de una firma hiperespectral a una firma multiespectral según las bandas del sensor de interés. Procedimiento en el software ENVI 5.1.



## **7. RESULTADOS**

Como se indicó en el apartado de la metodología, en el trabajo se cuenta con una serie de información de tipo secundaria, es decir, está ha sido obtenida durante otros proyectos o trabajos. Entre los datos secundarios más importantes se cuenta con la información de contenido de gases en suelo. Inicialmente se realiza el análisis estadístico de los datos de gasometría propiedad de Ecopetrol S.A, para determinar la distribución de los puntos con mayor contenido de gases en el área.

### **7.1 DATOS GEOQUIMICA DE SUPERFICIE**

Las campañas de campo para la recolección de muestras se distribuyeron por áreas de interés. Se establecieron los polígonos para el área Guejar y el área LlanoSur, con la toma de 312 y 1154 muestras para cada área respectivamente (Figura 23).

El tipo de gas analizado para todas las muestras de suelo es el metano, sin embargo para la mayoría de las muestras también se analizaron los contenidos de gases como Butano, Propano, Propeno.

Para el polígono del área Guejar las muestras se analizaron en su totalidad para determinar el contenido de Metano, igualmente en su mayoría fueron analizadas para determinar el contenido de Eteno. Los contenidos son expresado en partes por millón ppm (Tabla 9).

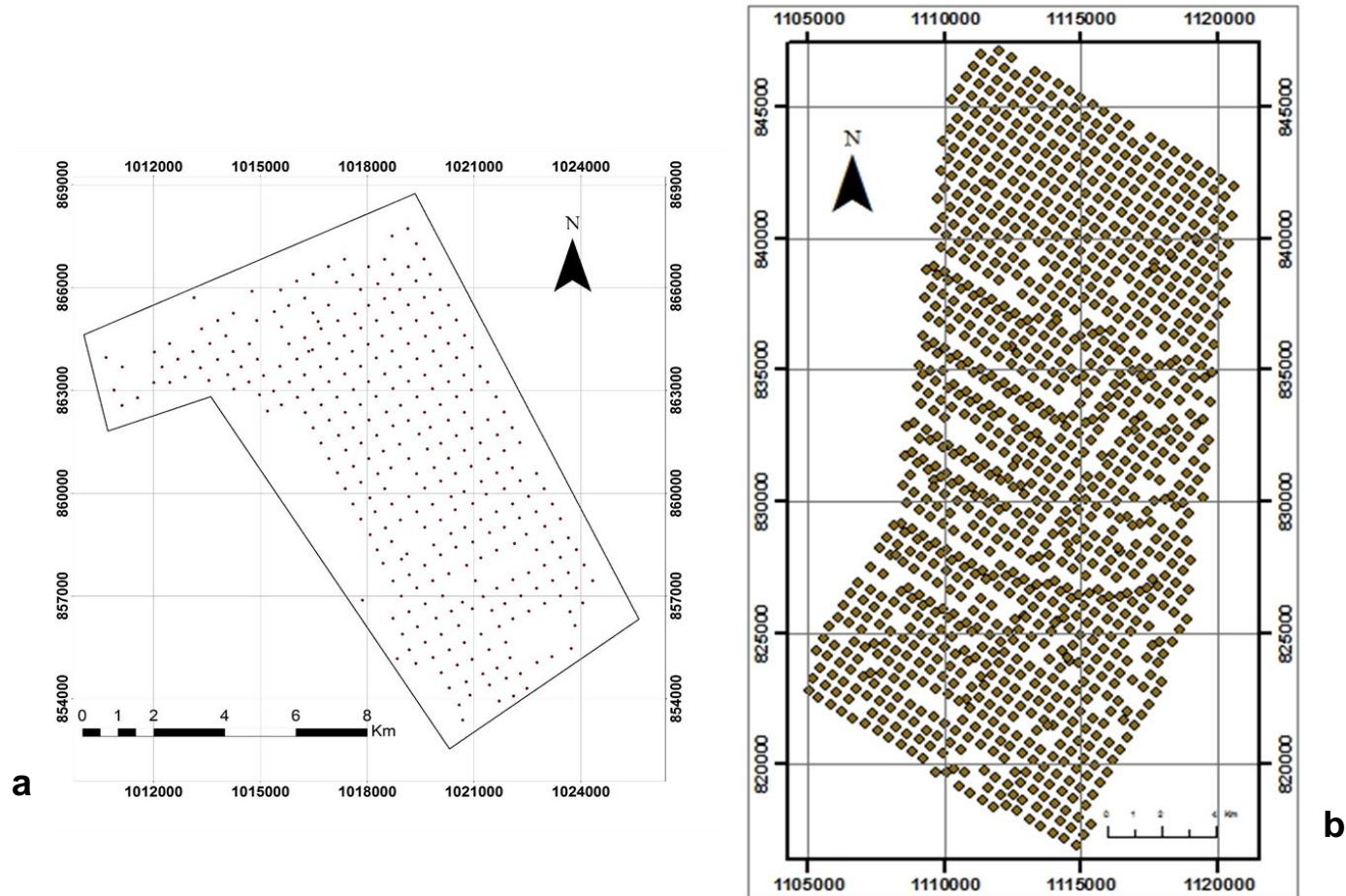
**Tabla 9. Estadística básicas del contenido de gases totales en suelo dentro de los polígonos de interés.**

<b>Estadística</b>	<b>GUEJAR (ppm)</b>	<b>LLANOSUR (ppm)</b>
min	0,91	0,56
max	148157,00	81783,70
mean	74078,95	40892,23
# muestras	312	1154

Fuente:

ICP

Figura 23. Malla de muestreo de suelos para gasometría a) puntos de muestreo para el polígono Guejar; b) Puntos de muestreo para el polígono LlanoSur



A partir del mallado se realizan procesos de interpolación para crear una imagen donde se describa la distribución de los contenidos de gases.

La interpolación predice valores para las celdas de un raster a partir de una cantidad limitada de punto. Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier variable en un punto geográfico, tales como elevación, precipitación, concentraciones químicas, niveles de ruido, etc. Los métodos de interpolación disponibles en el software ArcGIS son<sup>68</sup>:

**IDW:** Ponderación de distancia inversa, utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo promedio.

**Kriging:** Es un procesamiento de estadísticas geográficas avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z. Aún más que con otros métodos de interpolación, se debe realizar una investigación profunda del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para general la superficie de salida.

**Vecino natural:** esta interpolación halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor.

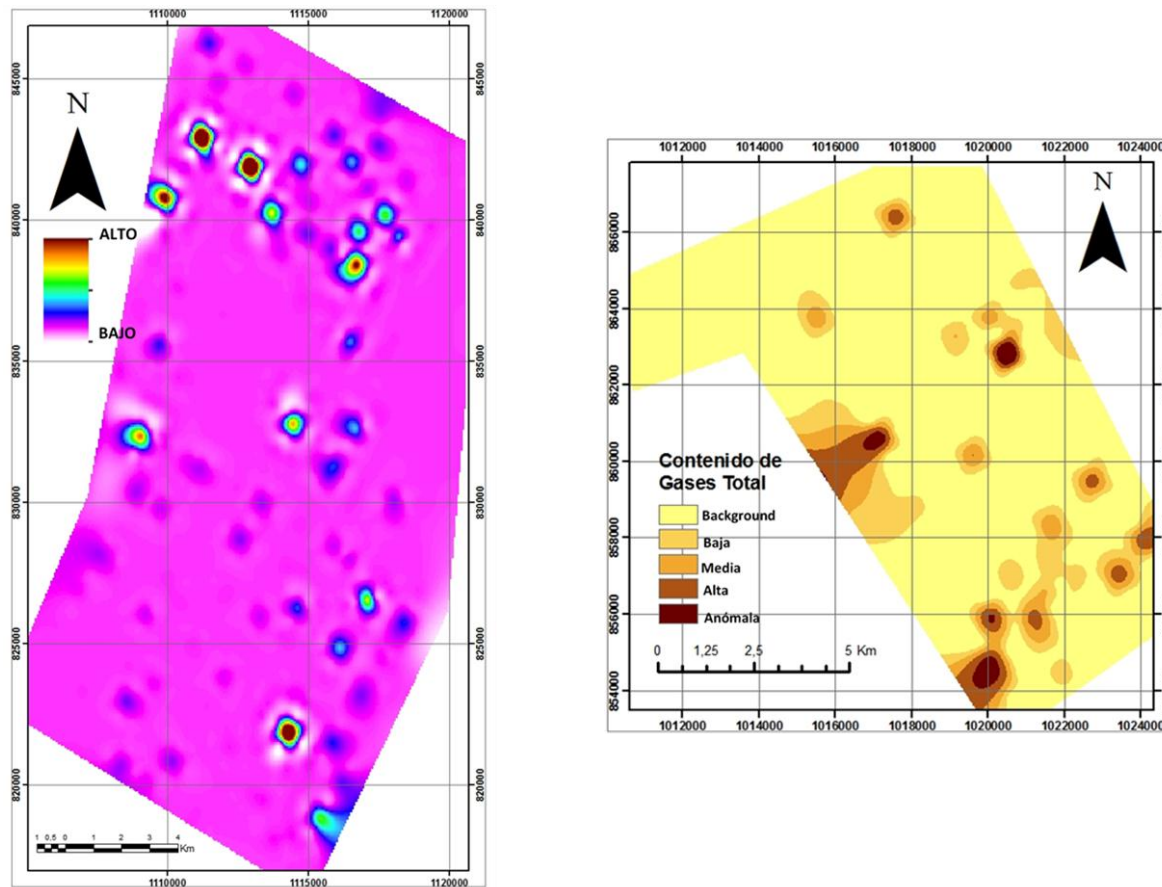
**Spline:** utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo cual resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

Luego de aplicar los diferentes métodos se observa que el método de interpolación SPLINE genera mejores resultados (Figura 24).

---

<sup>68</sup> Métodos de interpolación empleados en ArcGIS. ArcGIS Resources. [www.help.arcgis.com/es](http://www.help.arcgis.com/es)

Figura 24. Contenido de gases en suelos para los polígonos LlanoSur y Guejar



Los parámetros seleccionados corresponden a un SPLINE tipo TENSION con un peso de 0.1 y un número de puntos de 50.

De las 1154 muestra tomadas para cálculo de contenido de gases en suelo del área LlanoSur, 17 muestras presentan un contenido anormalmente alto cuyos valores se encuentran entre 10.000 a 100.000 ppm, lo cual corresponde al 1.47% del total de numero de datos.

## **7.2 ANÁLISIS VISUAL DE IMÁGENES**

Generalmente los métodos para extraer información de las imágenes satelitales se basan en el análisis o interpretación visual de los datos ofrecidos por la propia imagen, y la extracción de información a través del tratamiento automático o semiautomático por un ordenador (software).

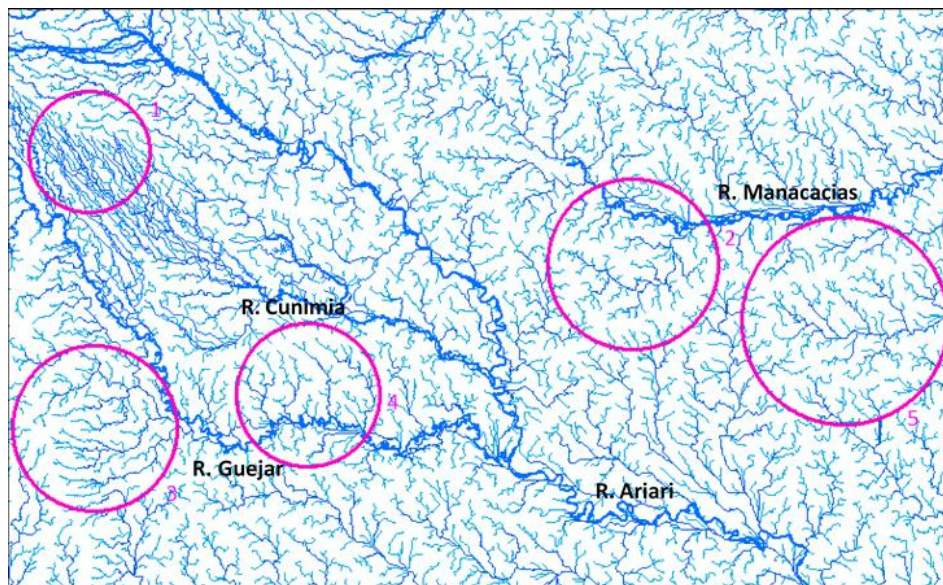
El método más intuitivo de extraer información es mediante la interpretación visual, la cual está basada en la habilidad para relacionar tonos, colores y patrones espaciales que aparecen en la imagen.

Una de las principales características detectables a simple vista en un una imagen satelital corresponde a la red de drenajes. Estas redes recogen aguas de todas las cuencas y las vierten en un sistema de ríos mayor. El clima y el relieve del área influyen en el patrón de la red de drenajes, pero la composición geológica suele ser un factor muy influyente, lo cual lo hace de gran importancia en los primeros estudios en los que se pueden interpretar estructuras y litologías.

Basado en el procesamiento del modelo digital del terreno y las imágenes satelitales, en especial las imágenes Rapideye (mayor resolución espacial), se identificaron los patrones de drenajes más relevantes en un área mayor que alberga los polígonos Guejar y LlanoSur. Se identificaron los principales ríos,

como el Ariari, Guejar, Cunimia y Manacacias, estos ríos presentan canales meandriiformes, trenzados y sus combinaciones (Figura 25).

**Figura 25. Distribución general de los drenajes, identificación de drenajes principales.**



- Drenajes Paralelos (1)]: Este tipo de drenaje se observa en la parte NW del área, se caracteriza por presentar una dirección definida por la pendiente regional (NW-SE). Cuanto mayor es la pendiente en una dirección, mayor y más paralelos serán los canales. Este tipo de drenajes presenta un control estructural marcado por el lineamiento del río Ariari<sup>69</sup>.
- Drenaje dendrítico (2): Este tipo de drenaje presenta cursos pequeños, cortos e irregulares que se dirigen en todas las direcciones, con cubrimientos de amplias áreas. Su formación se debe a la interacción de varios drenajes. Este tipo de drenajes se originan principalmente en suelos homogéneos de textura fina o en suelos que presentan un estrato rocoso

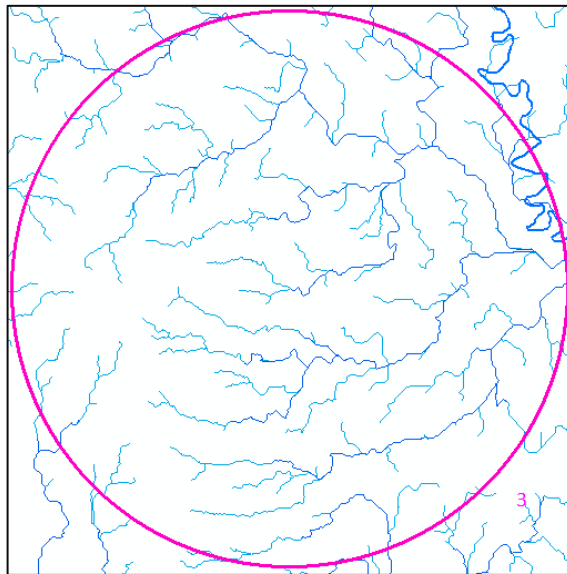
<sup>69</sup> Ujueta, G., 1982. Geomorfología Aplicada a la Exploración de Hidrocarburos en Tierras Planas. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. I Simposio Bolivariano. Bogotá, Colombia.

superficial. Estos suelos poseen una permeabilidad baja debido al bajo porcentaje de poros, esto quiere decir que las aguas atraviesan lentamente el perfil del suelo.

Este tipo de drenajes es predominante en toda el área con excepción de una pequeña zona hacia el NW.

- Drenajes sub dendrítico (3): Este tipo de drenajes es muy similar al anterior, con la particularidad que los diferentes cauces tienen una conformación casi paralela (Figura 26). En este caso se tiene un drenaje tributario mayor bien definido con mayor cantidad de caudal donde llegan una serie de afluentes pequeños. Se presentan cuando hay una captura intensa y además existe un control estructural o topográfico

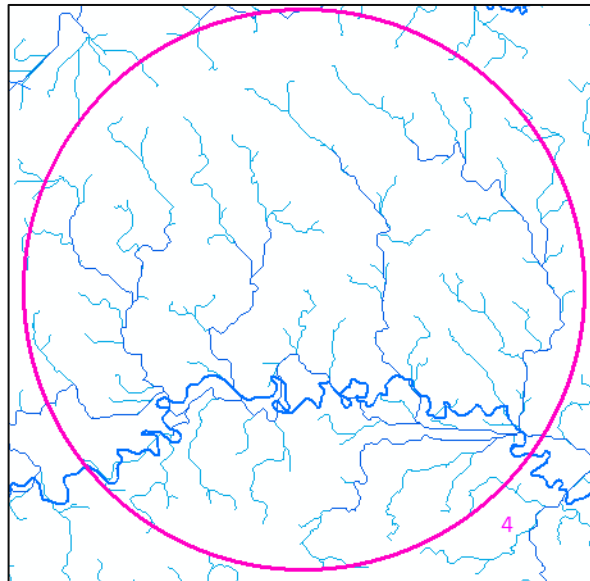
**Figura 26. Apariencia de los drenajes sub-dendríticos presentes en el área**



- Drenajes retorcidos (4): Este tipo de drenaje son aquellos en que la dirección puede invertirse totalmente, cambiando su rumbo radicalmente, son el resultado del absoluto control estructural. Los cambios bruscos de

dirección son debido al encuentro de un curso de agua con una barrera geológica (roca resistente). Esto también se puede presentar al atravesar niveles sedimentarios que presentan discontinuidades (Figura 27).

**Figura 27. Drenajes retorcidos o meandriformes del área general, formando los ríos principales de la región.**



El polígono LlanoSur posee una serie de drenajes con un patrón dendrítico a sub dendrítico mientras que el polígono Guejar la característica principal es una red de drenajes paralela. Indicando una diferencia en el patrón estructural y litológico de las dos áreas.

#### 7.2.1 Densidad de drenajes

La herramienta de estadística focalizada de ArcGis realiza una operación de vecindad que calcula un raster de salida en donde el valor para cada celda de salida es una función de los valores de todas las celdas de entrada que están en la vecindad especificada alrededor de esa ubicación. La función que se realiza en

la entrada es una estadística como el máximo, el promedio o la suma de todos los valores que se encuentran en la vecindad.

Conceptualmente, en la ejecución, el algoritmo visita cada celda en el raster y calcula la estadística específica con la vecindad identificada. La celda para la cual se calcula la estadística se denomina celda de procesamiento. El valor de la celda de procesamiento, como todos los valores de celda en la vecindad identificada, se incluye en el cálculo de las estadísticas de vecindad.

Las vecindades se pueden superponer de modo que las celdas en una vecindad también se pueden incluir en la vecindad de otra celda de procesamiento.

La herramienta permite controlar la estadística y el tipo de vecindad que se va a calcular. Los tipos de vecindades empleados se basan en formas geométricas como tipo anillo, círculo, rectángulo, porción de círculo, irregular y peso.

El tipo de estadísticas disponible son mayoría, máximo, valor medio, media, mínimo, minoría, rango, desviación estándar y suma.

El procedimiento para realizar el cálculo de densidad de drenajes consta de tres pasos:

- Convertir el archivo vectorial de los drenajes en archivo raster
- Aplicación de Estadística Focal
- Reclasificación

El polígono LlanoSur posee un área total de 633.8 km<sup>2</sup>, después de haber sido modificado para generar un polígono regular (Figura 28).

En la Figura 29 se muestran dos mapas temáticos luego de realizar las estadísticas focales sobre las líneas de drenaje y una serie de reclasificación del área. En la Figura 29 (A) se observa la distribución de la densidad de drenajes en

10 clases la cuales se distribuyes desde densidad baja a densidad alta, mostrando una clara tendencia de alta densidad de drenajes hacia la parte norte de la imagen.

Igualmente, la Figura 29 (B) muestra la imagen luego de ser reclasificada en dos tipos de densidades: densidad alta y densidad baja, con esta imagen es más evidente la tendencia hacia el norte de la mayor población de drenajes en el área del polígono LlanoSur.

El drenaje en la parte norte es de tipo dendrítico con ramificaciones cortas, mientras que hacia la parte sur, con menor densidad de líneas, el drenaje tiene una tendencia sub-dendrítica, es decir, presentan una componente paralela, igualmente las líneas de drenaje presentan mayores longitudes.

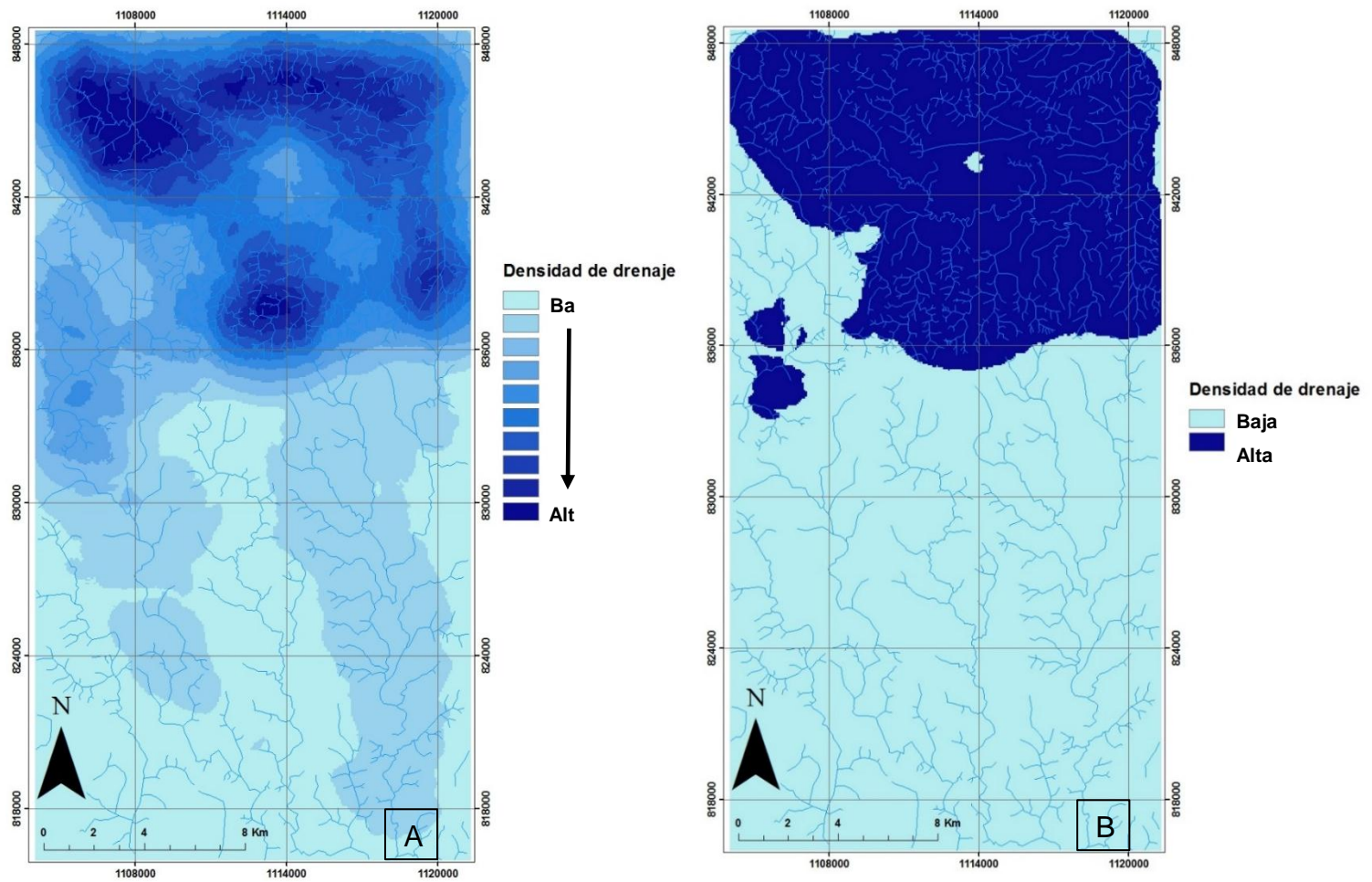
Figura 28. Imagen Rapideye del área correspondiente al polígono LlanoSur



0 0,5 1 2 3 4 5 Km

1:100.000

**Figura 29. Densidad de drenaje según estadísticas focales de la red de drenajes del polígono LlanoSur, A) Distribución de densidad según 10 categorías; B) Distribución de densidad según 2 categorías.**



### 7.2.2 Interpretación Geológica

La identificación de rasgos geológicos a través de las bandas de la imagen Landsat se realiza teniendo en cuenta las características geomorfológicas, el tipo de vegetación y la red hidrográfica y sus patrones (Tabla 10). La cartografía mediante la interpretación de imágenes satelitales permitió obtener un total de 8 diferentes unidades (Figura 30).

Banda 7 (Infrarrojo medio): Banda importante para la discriminación de tipos de roca y suelos, así como el contenido de humedad en suelos y vegetación.

Combinación RGB 742: Permite discriminar tipo de roca, ayuda a la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a patrones volcano-tectónicos.

Combinación RGB 432: Falso color infrarrojo. Con esta combinación se aprovecha el contraste espectral entre las bandas 4 y 3 de las imágenes Landsat, es decir, la banda NIR y roja respectivamente. La vegetación vigorosa muestra una coloración roja intensa que va disminuyendo de intensidad a medida que la zona reduce su contenido en vegetación o esta presenta algún tipo de estrés.

La identificación de cada unidad cuenta con criterios propios de la interpretación fotogeológica como son el tono, textura, sombras, drenajes y estructuras.

**Tabla 20. Unidades litológicas y sus características principales encontradas a través del análisis de imágenes Landsat.**

<b>Unidad</b>	<b>Tipo de drenaje</b>	<b>Características</b>
<b>Umd</b>	Dendrítico	Esta unidad corresponde a una secuencia metamórfica. Presenta una coloración gris oscura, se observa un ligero bandeamiento direccional SW-NE. Geomorfológicamente se puede identificar montañas ramificada.
<b>Usc2</b>	Dendrítico y sub-paralelo	Presenta una variación en su textura entre rugosa a fina y tonalidades variadas de grises indicando una especie de variación litológica. Se identifica una relación entre el drenaje dendrítico y la coloración de gris más oscura, mientras que los drenajes sub-paralelos están asociados a

		coloraciones grises más claras y textura rugosa.
<b>Usc1</b>	Sub-paralelo	Corresponde a una unidad sedimentaria con textura fina, presenta un tono gris claro. Muestra una evidente morfología alargada en dirección NE-SW paralelo al drenaje principal.
<b>Ua1</b>	Meandriformes	Esta unidad es identificada hacia el margen sureste del río Ariari y bordeando el río Manacacias. Está compuesta principalmente por rocas sedimentarias la textura fina a moderadamente granulosa con tonos de grises intermedios. Relieve moderado con algunas colinas y lagos colmatados producto de antiguos meandros abandonados indicando un proceso de depositación fluvial.
<b>Ua2</b>		La unidad se encuentra localizada hacia el margen Noreste del río Ariari con similitudes a la Unidad Ua1. Corresponde a una roca sedimentaria de granulometría media a fina. Se observan coloraciones grises intermedias a moderadamente oscuros, con presencia de un suave relieve ondulado de pequeñas colinas. De acuerdo a la combinación falso color infrarrojo 432, en esta se puede identificar una disminución en la vegetación o en su calidad, evidenciada por la ausencia de coloración roja en la imagen.
<b>Qal</b>	Paralelo	Esta unidad corresponde a depósitos de cuaternarios de tipo aluvial. Según los parámetros fotogeológicos, se observa una textura rugosa a fina, con tonalidades de grises desde intermedios a claros. Estos depósitos posiblemente se encuentran asociados a bancos de gravas y arenas redondeadas, limos y arcillas formadas por la acumulación reciente de la actividad de los ríos Ariari y las demás quebradas del área.
<b>Qpr</b>	Sub-dendrítico	Esta unidad corresponde a un aluvión cuaternario. Según las características de fotointerpretación se observan tonos grises claros a blanco, con textura rugosa. Estos depósitos se encuentran asociados a conglomerados y arenas poco redondeadas.
<b>Qtz</b>	Trenzado	Esta unidad corresponde al vértice del río Ariari, Macacas y otros canales principales. Se caracteriza por presentar una textura fina con tonos grises oscuros, Por el tipo de drenaje se puede indicar que el material es grueso y permeable.

A partir de las unidades obtenidas individualmente, se genera un mapa de distribución de litología del área (Figura 31), a través de un sistema de información geográfica.

**Figura 30. Mapeo de unidades litológicas de acuerdo a las características visuales, a) unidad Umd, b) Unidad Usc2, c) Unidad Usc1, d) Unidad Ua2, e) Unidad Ua1, f) Unidad Qal, g) Unidad Qpr, h) Unidad Qtz**

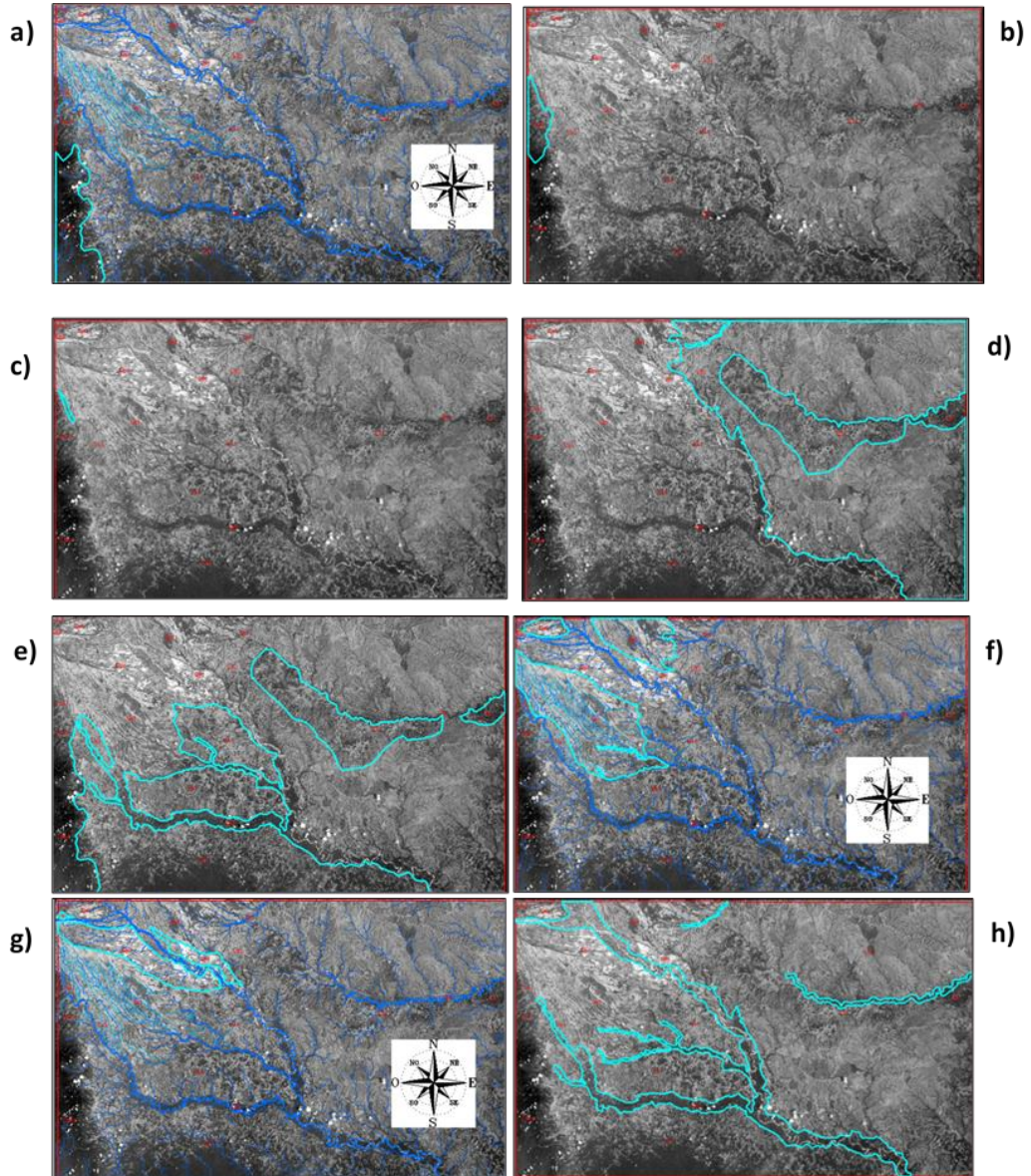
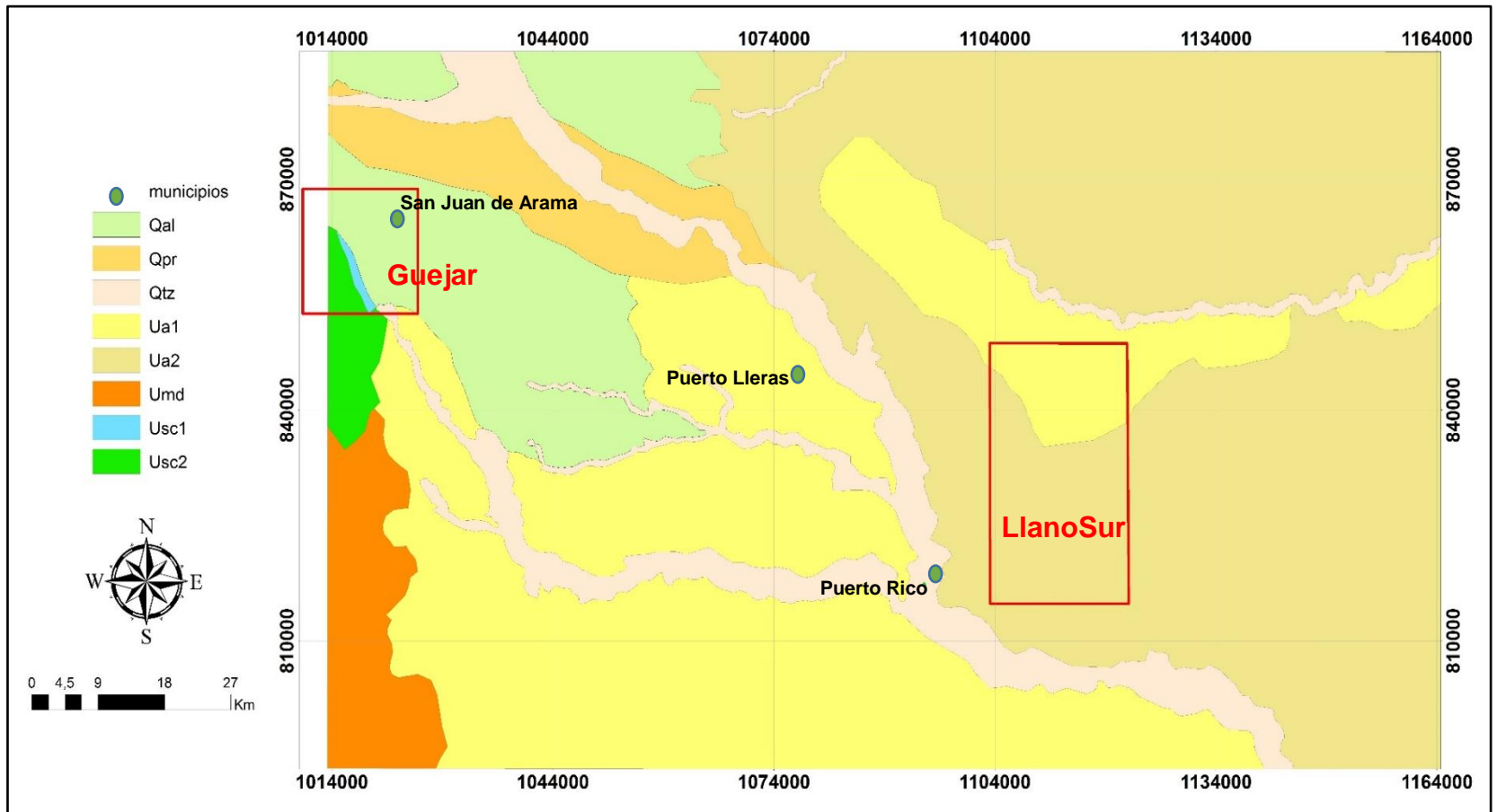


Figura 31. Mapa de distribución de unidades litológicas identificadas a través del análisis visual de imágenes Landsat.



### 7.2.3 Interpretación Geomorfológica

A través del análisis de imágenes satelitales LANDSAT se identificaron los principales rasgos geomorfológicos del área general que contiene los polígonos Guejar y LlanoSur (Figura 32).

Los principales ambientes morfo-genéticos naturales que tiene lugar en el área comprenden los siguientes.

#### 7.2.3.1 Ambiente Morfo-estructural

- **Altillanura:** Corresponde a la llanura de desborde de los ríos procedentes de la Cordillera Oriental y se extiende casi paralelo por el río Orinoco y antes de cruce hidrográfico del río Meta. Dentro del área de estudio esta geoforma ocupa el mayor porcentaje del área.

Dentro de esta gran unidad se encuentran sub-unidades geomorfológicas como: Paleocanales o esteros, los cuales corresponden a zonas de inundación de morfología cóncava suave y que favorecen el desarrollo de los morichales; Bajos o paleocubetas; Lomas muy pequeñas, colinas, vallecillos suaves y diques.

#### 7.2.3.2 Ambiente fluvial

Corresponden a geoformas generadas a partir de la actividad fluvial. Dentro de la Altillanura se identificaron las siguientes:

- **Terrazas, coluviones-aluviales:** localizadas al NO del área y paralelas al río Ariari, de escurrimiento difuso generalizado y de baja altura. Constituyen depósitos localizados a los costados del cauce de río principal formando plataformas de muy baja altura, en las que se pueden reconocer antiguos cursos o canales del río que les dieron origen.
- **Planicies de inundación:** Corresponde a la llanura paralela al canal del río principal, afectada por inundaciones y ensanchamientos. Presenta micro relieves cóncavo-convexos, lagos productos de meandros abandonados

colmataados o en vía de colmatación, diques, cauces abandonados y cubetas.

- Cauce fluvial: Corresponde a la zanja, canal o cauce por donde discurre el río principal (río Ariari). Presenta geformas características de ríos trezados y meandriformes como diques, terrazas, islas o barras de punto laterales y/o verticales.
- Abanicos sub-crecientes: Se localiza en la parte más nororiental del área y corresponde a un abanico antiguo que constituye una plataforma por encima del nivel del río que erosiona los bordes del mismo.
- Valles aluviales menores: Corresponden a pequeños cauces conformados por los cauces menores al río principal y con características similares a las llanuras de inundación.

#### 7.2.3.3 Ambiente estructural fluvio- erosional

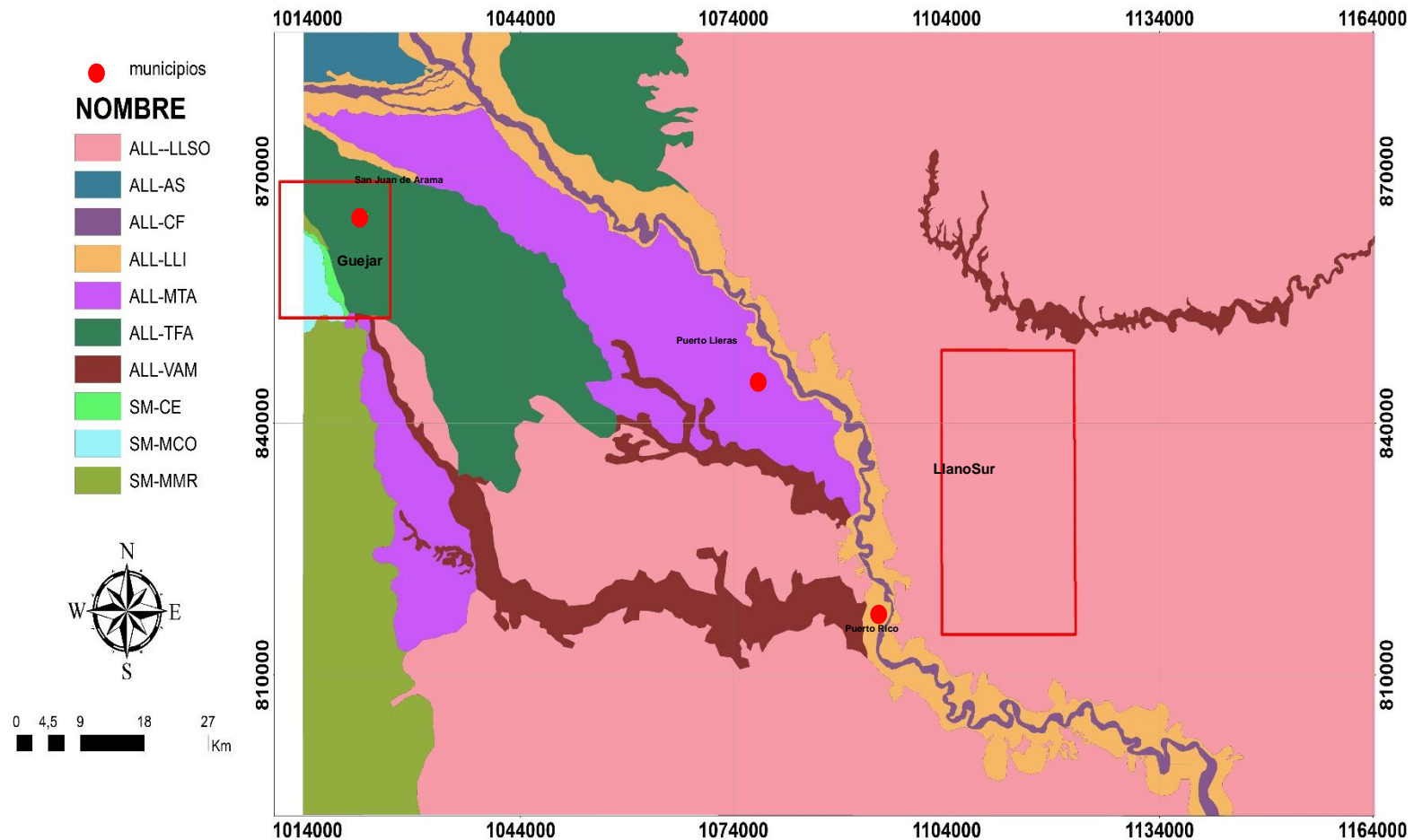
Estas geformas son originadas por la dinámica interna de la tierra y los procesos fluvio erosionales en conjunto. Se encuentran localizadas principalmente hacia el sur oriente del área.

Se identificaron tres tipos de geformas:

- Crestas y/o crestones: Esta geforma corresponde a una cresta de origen estructural en un uno de los flancos de influencia de la Sierra de La Macarena. Presenta escurrimientos difusos.
- Mesas, cuevas y superficies onduladas: Se localiza al oeste del área y hacen parte de las mesas o superficies onduladas levantadas de la sierra de La Macarena. Se observa un escurrimiento difuso y lineamientos y flexiones estructurales a mena de zanjas o surcos.
- Mesas y montañas ramificadas: Esta geforma presenta zonas de derrumbe y caída de bloques rocosos en pequeños cañones, zanjas o

deflexiones con procesos de escurrimiento superficial difuso. Presenta cimas estrechas, empinadas y valles en v, así como pequeñas mesas.

Figura 32. Distribución de unidades geomorfológicas en un área general que contiene los polígonos Guejar y LlanoSur. ALL-LLSO (Altilanura); ALL-AS (Abanico Sub-creciente); ALL-CF (Cauce fluvial principal); ALL-LLI (Llanura de Inundación); ALL-MTA (Mesetas y terrazas agradacionales); ALL-TFA (Terrazas fluvio-aluviales); SM-CE (Crestas estructurales); SM-MCO (Mesetas, Cuestas y superficies ondulosas); SM-MMR (Mesetas y montañas ramificadas).



El polígono LlanoSur se encuentra compuesto por una sola unidad que corresponde a la altillanura (ALL-LLSO), la cual cubre la mayor parte del área general y contiene los principales rasgos que caracterizan la zona de la cuenca de los Llanos Orientales.

El polígono Guejar posee cuatro unidades geomorfológicas las cuales corresponden a ALL-TFA, SM-CE, SM-MCO, SM-MMR, estas unidades se diferencian de las otras en el aumento de la rugosidad del suelo y el incremento en las pendientes topográficas típicas en zonas de piedemonte.

### **7.3 RATIO Y ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)**

El método adaptado para el mejoramiento de la respuesta espectral de la probable diferenciación de la vegetación está basado en el método presentado por Almeida y Souza Filho 2009.

Este método consiste en tres etapas sucesivas de concentración y reducción de la dimensionalidad de los datos. En el primer paso, se realizan los cálculos de índices (cociente entre bandas), para realce de las características espectrales de la vegetación tales como pigmentos y humedad. El segundo paso corresponde a la aplicación de análisis de componentes principales (PCA) para el set de índices. Finalmente en el tercer paso, se aplica un filtro de convulsión paso-bajo sobre los PCs seleccionados del PCA.

- Cálculo de índices (Ratio)

El primer procedimiento es la aplicación de índices que consiste básicamente en el cálculo de ratios o divisiones entre los valores numéricos de las bandas espectrales.

Cada índice genera una imagen individual en escala de grises, a partir de estas imágenes se realiza un layer stacking para generar una imagen con un número de bandas que corresponde a cada uno de los índices.

- Cálculo de PCA

Un análisis de componentes principales (PCA) es una técnica de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Los nuevos componentes principales (PC) o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

Un aspecto clave en PCA es la interpretación de los factores, ya que esta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (signo y magnitud de las correlaciones).

El análisis se hace a través de cálculo de la matriz de correlación. Un PCA tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por lo tanto, pocos factores explicarían gran parte de la variabilidad total.

La elección de los PC se realiza de tal forma que el primero contenga la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo PC debe contener la máxima variabilidad posible no contenida en el primer PC, y así sucesivamente. Del total de los PC se eligen aquellos que contengan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente.

Inicialmente se aplica PCA sobre la imagen en valores de reflectancia. Los valores numéricos en la matriz relaciona la carga de las bandas originales en las nuevas bandas llamadas PC, los valores absolutos más altos indican mayor carga.

El set de imágenes generada con los ratios es sometido al proceso de PCA. Este proceso tiene dos funciones simultáneas: separar la información redundante y

concentrar la información de interés en componentes específicos. La información redundante es concentrada en la primera componente, la cual contiene la mayor parte de la varianza total e información que correlaciona más con el set de imágenes generada por los índices<sup>70</sup>.

Teniendo en cuenta el comportamiento espectral de la vegetación, la cual presenta alta reflectancia en la banda 4 debido a la estructura de la hoja y en la banda 3 presenta baja reflectancia debido a la clorofila, se analizan las nuevas bandas (PC) para identificar cual posee alta relación con respecto a estas bandas.

### 7.3.1 Imágenes Landsat

- Imagen IMG\_8011

La imagen Landsat IMG\_8011 es una imagen adquirida en enero 31 de 1988 por el satélite Landsat 4, sensor TM. La imagen en valores de reflectancia es sometida a PCA en los recortes correspondientes a la zona LlanoSur y Guejar (Tabla 11).

---

<sup>70</sup> Almeida, T.I.R, De Souza, C.R. Op.Cit

**Tabla 31. Matriz eigenvector para los polígonos de la imagen IMG\_8011 de las áreas LlanoSur y Guejar de la imagen en valores de reflectancia.**

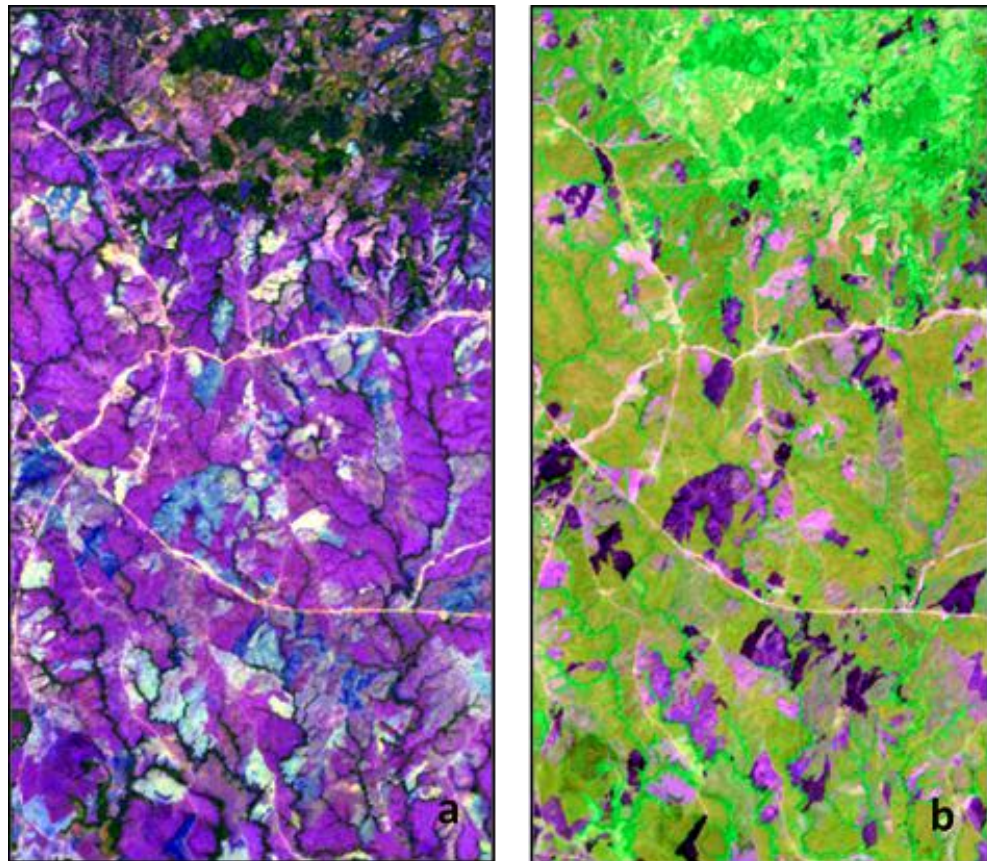
LLANOSUR	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
PC1	<u>0,8135</u>	-0,0832	<u>-0,5411</u>	-0,0955	0,097	0,1412
PC2	-0,0571	<u>-0,9743</u>	0,0544	0,1944	0,0237	0,0783
PC3	-0,2579	0,0459	-0,4928	0,2603	<u>-0,7284</u>	0,3003
PC4	0,4497	0,0917	0,4068	0,6451	-0,3284	-0,316
PC5	0,1262	0,1148	0,3987	0,1314	0,1049	<u>0,8853</u>
PC6	-0,2243	0,1418	-0,37	<u>0,6723</u>	0,5836	0,0113
GUEJAR	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
PC1	<u>-0,8057</u>	0,1875	0,5602	0,0089	0,0408	-0,011
PC2	0,1792	<u>0,9701</u>	-0,0617	-0,0383	-0,0929	-0,1136
PC3	0,5234	-0,0512	<u>0,7852</u>	0,2132	-0,2339	0,0818
PC4	0,0277	-0,0449	0,099	<u>-0,9072</u>	-0,3525	0,2005
PC5	-0,12	0,0975	-0,1707	0,283	-0,2962	<u>0,8827</u>
PC6	0,172	0,0982	0,1639	-0,2234	<u>0,8503</u>	0,4012

En el polígono LlanoSur la banda 3 posee una carga moderada en el PC1 (-0.5411), pero es una carga negativa. La banda 4 posee mayor carga en el PC6 (0.6723).

La banda 7 en una firma espectral de la vegetación también cuenta con una característica en su reflectancia, mostrando valores altos. Para esta banda el PC5 posee el mayor peso (0.8853). De esta manera se pueden definir las nuevas bandas conformadas por las PC para crear una nueva imagen RGB: PC1, PC5, PC6 (Figura 33a).

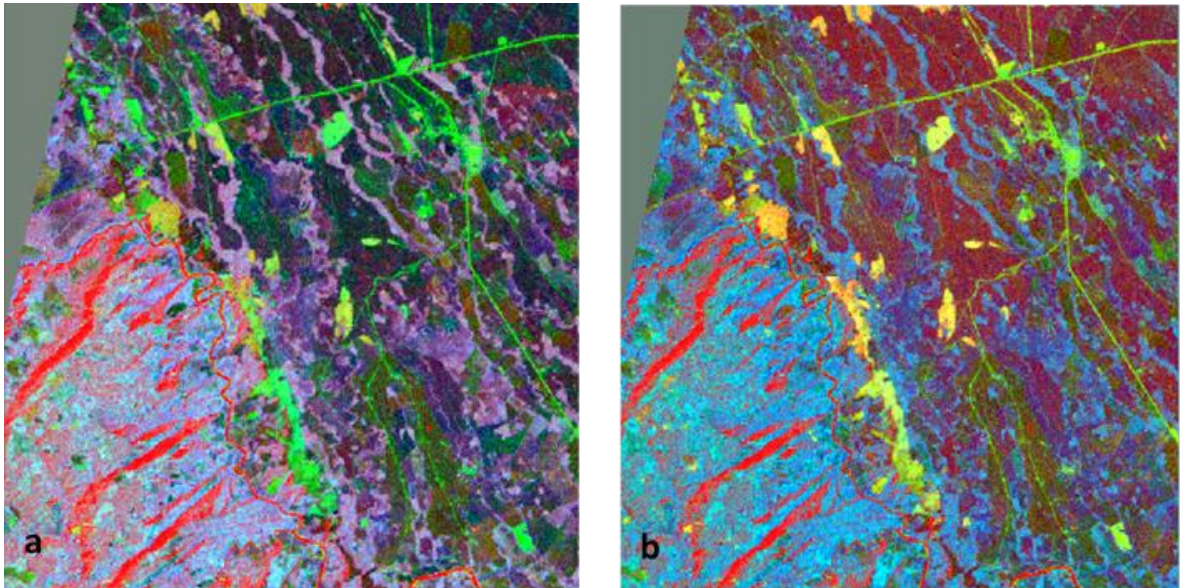
Teniendo en cuenta las mayores cargas en la tabla de valores de la matriz Eigenvector, se puede obtener una imagen RGB PC1, PC2, PC5, correspondiente a las bandas 1, 2 y 7 (Figura 33 b).

**Figura 33. Imágenes falso color RGB para el polígono LlanoSur a) RGB PC1, PC5, PC6; b) PC1, PC2, PC5.**



En el área Guejar los PC con mayores pesos para las bandas 3, 4 y 7 corresponden a PC3, PC4, PC5. Sin embargo, en la matriz eigenvector los PC con mayores pesos corresponden a los PC2, PC4, PC5. A partir de los dos grupos de PCs se obtiene las imágenes falso color RGB PC3, PC4, PC5 (Figura 34a), y una imagen RGB PC2, PC4, PC5 (Figura 34b).

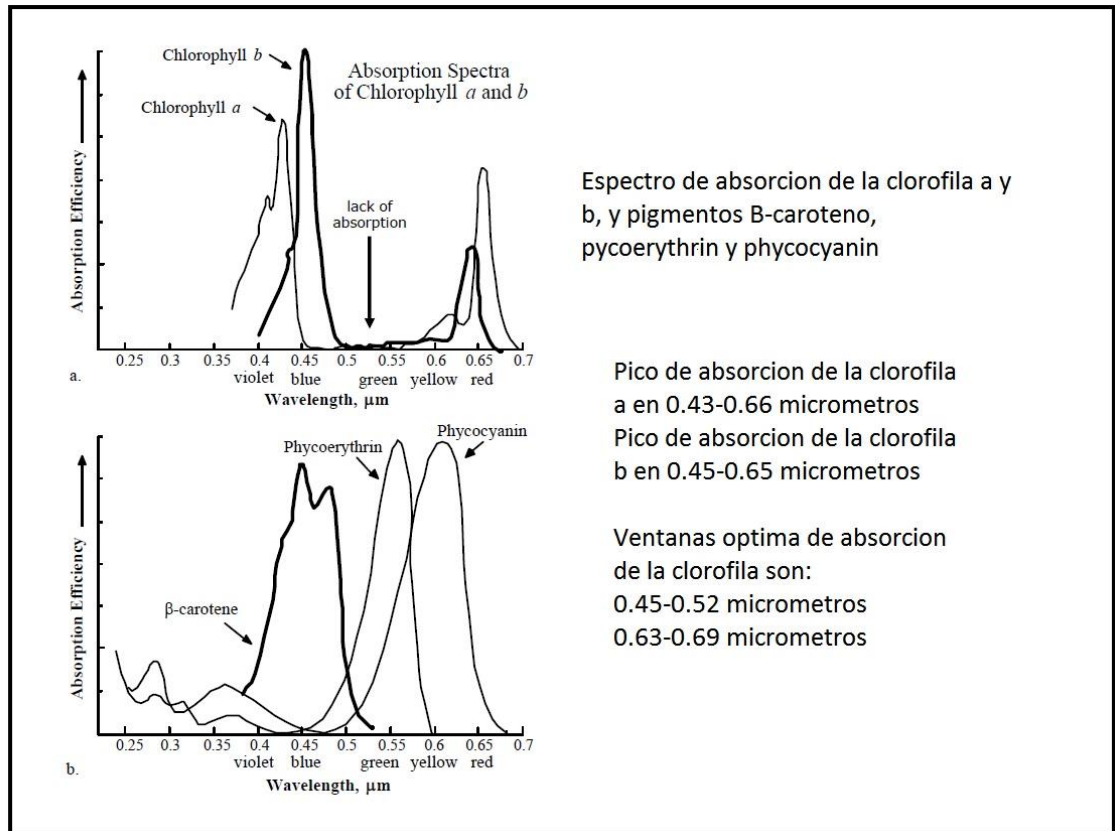
**Figura 34. Imagen IMG\_8011 falso color RGB para el polígono Guejar a) RGB PC3, PC4, PC5, b) RGB PC2, PC4, PC5.**



A partir de la imagen generada con las nuevas bandas originadas de los ratios se aplica el PCA, los PCs fueron escogidos para generar una imagen falso color, teniendo en cuenta los valores obtenidos en el análisis de la matriz Eigenvector (Tabla 12). El índice B2/B1 contiene información acerca de la variabilidad de la composición de los pigmentos indicada por la respuesta en el visible: 1) la banda B1 (450-520 nm), presenta picos de absorción de la radiación electromagnética en la clorofila b y carotenoides; 2) en la banda B2 (520-600 nm), la absorción es menor para los anteriores pigmentos; 3) en la banda B3 (630-690 nm), se presentan picos de absorción de la clorofila a y b, los cuales son los pigmentos más comunes (Figura 35). El índice B4/B1 contiene información de los pigmentos

pero a partir de un proceso diferente, es decir, los pigmentos en la banda B4 (NIR) son transparentes y no ocurre absorción de energía<sup>71</sup>.

**Figura 35. Espectro de absorción de la clorofila a y b y pigmentos**



Fuente: Jensen, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment an Earth Resource Perspective. Prentice Hall.

<sup>71</sup> Almeida, T.I.R, De Souza, C.R. Op.Cit

**Tabla 42. Matriz eigenvector de los ratios de la imagen IMG\_8011 de los polígonos LlanoSur y Guejar.**

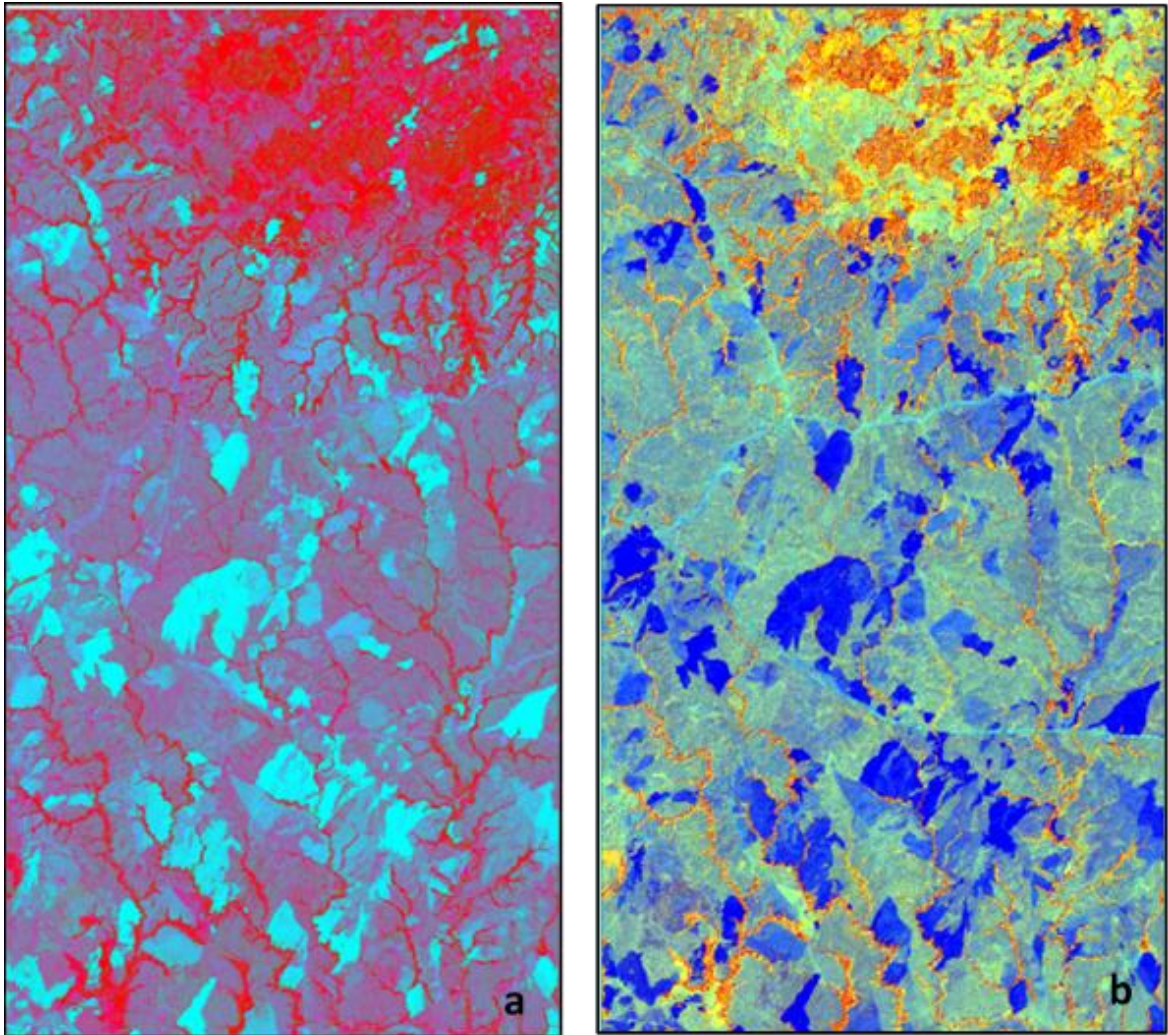
LLANOSUR	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	-0,4879	-0,0243	-0,2671	-0,7523	-0,2538	0,2072	0,1239	0,0374
PC2	-0,7008	0,3221	-0,1047	0,3186	0,3684	-0,2806	0,1694	0,2226
PC3	-0,1871	0,4864	0,2692	-0,0759	-0,2507	-0,1558	-0,6771	-0,3235
PC4	0,2001	0,175	-0,1672	-0,2811	0,6964	0,3114	-0,4172	0,2578
PC5	-0,1627	-0,1131	0,2591	-0,0761	0,4422	0,2026	0,234	-0,7723
PC6	-0,2952	-0,118	0,0179	0,4445	-0,197	0,7872	-0,1912	0,0774
PC7	-0,2233	-0,6996	-0,3232	0,0803	0,0957	-0,3053	-0,4781	-0,137
PC8	-0,18	-0,3351	0,8033	-0,1947	0,0928	-0,0564	-0,0602	0,3958
GUEJAR	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	-0,0466	0,7612	-0,02	0,0171	0,3998	0,4957	0,0906	0,0627
PC2	-0,5428	0,2447	-0,0916	0,0543	0,3622	-0,6803	-0,1473	-0,1358
PC3	0,6523	0,3405	-0,4043	0,1872	-0,1028	-0,4456	0,1021	0,2015
PC4	-0,0432	0,2856	-0,2562	-0,2828	-0,4829	0,0435	-0,025	-0,7316
PC5	0,1713	-0,3748	-0,3856	-0,0031	0,5822	0,0847	0,4056	-0,4133
PC6	0,3567	-0,0654	-0,0062	-0,2616	0,324	0,0477	-0,8227	-0,1262
PC7	-0,2736	-0,0896	-0,6394	-0,5268	-0,0695	0,1076	-0,0312	0,462
PC8	0,2108	0,1022	0,4524	-0,732	0,1282	-0,2645	0,3416	0,0399

De acuerdo con los valores obtenidos a partir de la matriz de Eigenvector para cada una de las áreas se definen los PCs con mayor peso para generar las imágenes falso color RGB. La combinación PC5, PC6, PC8 y PC1, PC6, PC8 son seleccionadas para la zona LlanoSur y Guejar respectivamente.

Teniendo en cuenta que luego de la aplicación de PCA la mayor información se concentra en las dos primeras PCs, se toman éstas para combinación RGB, más la PC con mayor peso dentro de la matriz, obteniéndose la imagen RGB PC1, PC2, PC8 para la zona LlanoSur, mientras que para la zona Guejar se obtiene una combinación RGB PC1, PC2, PC6.

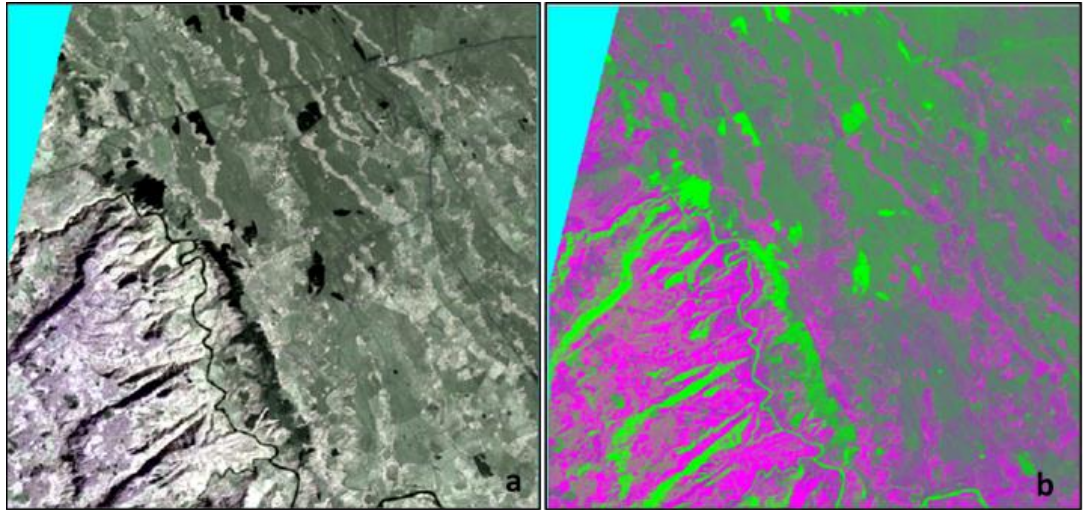
La Figura 36 muestra las combinaciones RGB según los PCs seleccionados para el área LlanoSur.

Figura 36. Imagen IMG\_8011 para el polígono LlanoSur luego de aplicado PCA sobre los ratios, a) RGB PC5, PC6, PC8; b) RGB PC1, PC6, PC8.



Para el área Guejar se seleccionaron dos grupos de PCs para generar dos imágenes falso color RGB: a) PC1, PC6, PC8, y b) PC1, PC2, PC6 (Figura 37).

Figura 37. Imagen IMG\_8011 del polígono Guejar luego de aplicar PCA sobre los ratios a) RGB PC1, PC6, PC8; b) RGB PC1, PC2, PC6.



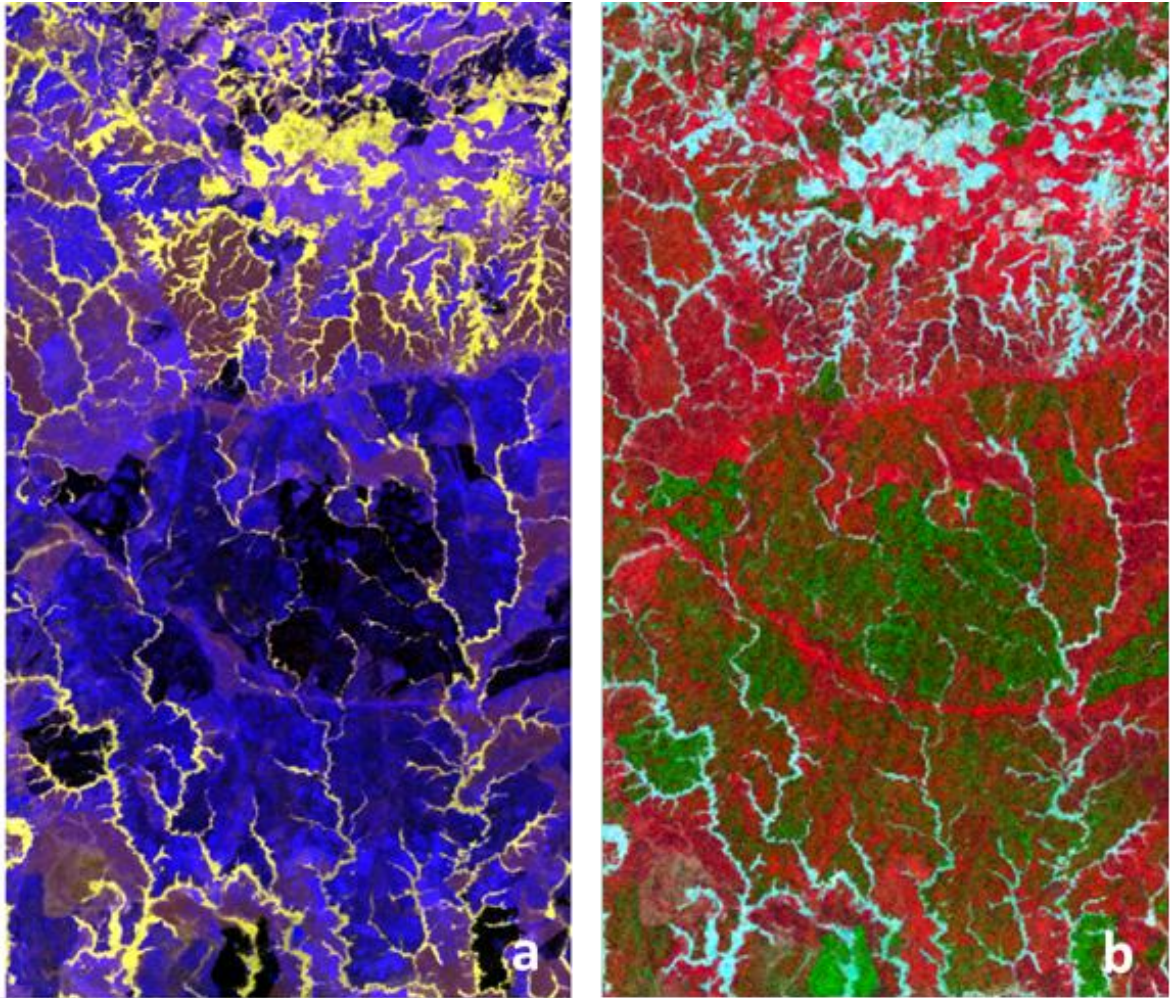
- Imagen IMG\_1062

La imagen IMG\_1062 es una imagen adquirida el 3 de marzo de 2001 por el satélite Landsat 7, sensor ETM+. A partir de la matriz Eigenvector (Tabla 13) obtenida luego de aplicar PCA sobre los ratios para el área LlanoSur de la imagen, se definieron los PCs empleados para la nueva imagen falso color RGB. Se toman los PC4, PC5, PC8 y PC1, PC2, PC5 (Figura 38).

**Tabla 53. Matriz eigenvector de la imagen IMG\_1062 para el área LlanoSur.**

Eigenvector	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	-0,015	-0,0446	-0,4983	-0,3973	-0,5404	-0,1676	-0,5211	-0,0001
PC2	-0,1553	0,1667	-0,6817	-0,2972	0,2669	0,2441	0,5134	-0,0261
PC3	0,2163	-0,1425	0,2579	-0,2508	-0,6589	0,1156	0,5966	0,0013
PC4	0,396	0,3159	0,3232	-0,7096	0,3229	0,0652	-0,1622	0,023
PC5	0,0971	-0,1487	-0,0633	-0,1123	0,17	-0,9196	0,2755	-0,0383
PC6	-0,6135	0,5794	0,244	-0,0949	-0,1812	-0,1661	0,0484	-0,3957
PC7	-0,5783	-0,6365	0,2221	-0,407	0,1713	0,0932	-0,0385	0,0768
PC8	-0,2278	0,2952	0,0563	-0,0019	-0,0854	-0,1132	0,0536	0,9137

Figura 38. Imagen IMG\_1062 del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA sobre los ratios del área Llano Sur, a) RGB PC4, PC5, PC8 y b) PC1, PC2, PC5

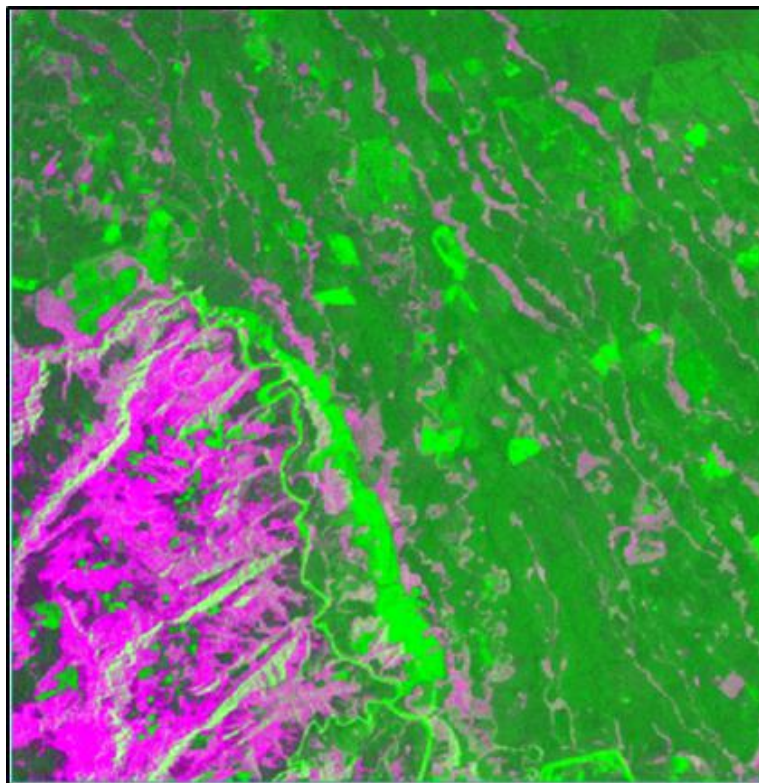


Para el área Guejar se analizan los valores de la matriz Eigenvector (Tabla 14), en esta se observa mayores pesos en las PC 1, PC2 y PC5, las cuales corresponden a los ratios  $B2/B1$ ,  $B4/B1$  y  $B4/B5 \cdot B7$ , con valores de 0.8271, -0.8735 y -0.7457 respectivamente. A partir de esta PCs se genera una imagen de falso color RGB PC1, PC2, PC5 (Figura 39).

**Tabla 64. Matriz Eigenvector de la imagen IMG\_1062 para el área Guejar**

Eigenvector	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	0,8271	-0,0686	-0,199	0,0532	0,446	-0,0678	-0,2273	0,1165
PC2	-0,1511	0,3184	-0,8735	0,2741	-0,0456	-0,1276	0,0705	-0,1196
PC3	0,0688	0,4879	0,0392	-0,3048	-0,3432	0,0216	-0,7317	-0,0958
PC4	-0,2345	0,0142	0,2604	0,3909	0,3003	-0,7106	-0,2967	-0,2027
PC5	0,1577	0,1959	0,1982	0,3656	0,0828	0,4418	0,0756	-0,7457
PC6	-0,2861	0,3512	-0,0164	-0,5047	0,7182	0,1029	0,0919	-0,07
PC7	0,3557	0,4224	0,1623	-0,2443	-0,2488	-0,4762	0,5471	-0,1448
PC8	-0,0108	0,5617	0,2494	0,4777	0,08	0,203	0,0801	0,583

**Figura 39. Imagen IMG\_1062 del área Guejar luego de aplicar PCA en una combinación RGB PC1, PC2, PC5**



- Imagen IMG\_4090

La imagen IMG\_4090 fue adquirida por el satélite Landsat 8, sensor OLI el 31 de marzo del 2014. Presenta un moderado contenido de nubes, las cuales están concentradas en al área LlanoSur. Se obtiene la matriz Eigenvector luego de aplicar PCA sobre la imagen de los ratios para cada área (Tabla 15).

**Tabla 75. Matriz Eigenvector del para la imagen IMG\_4090 para los polígonos LlanoSur y Guejar.**

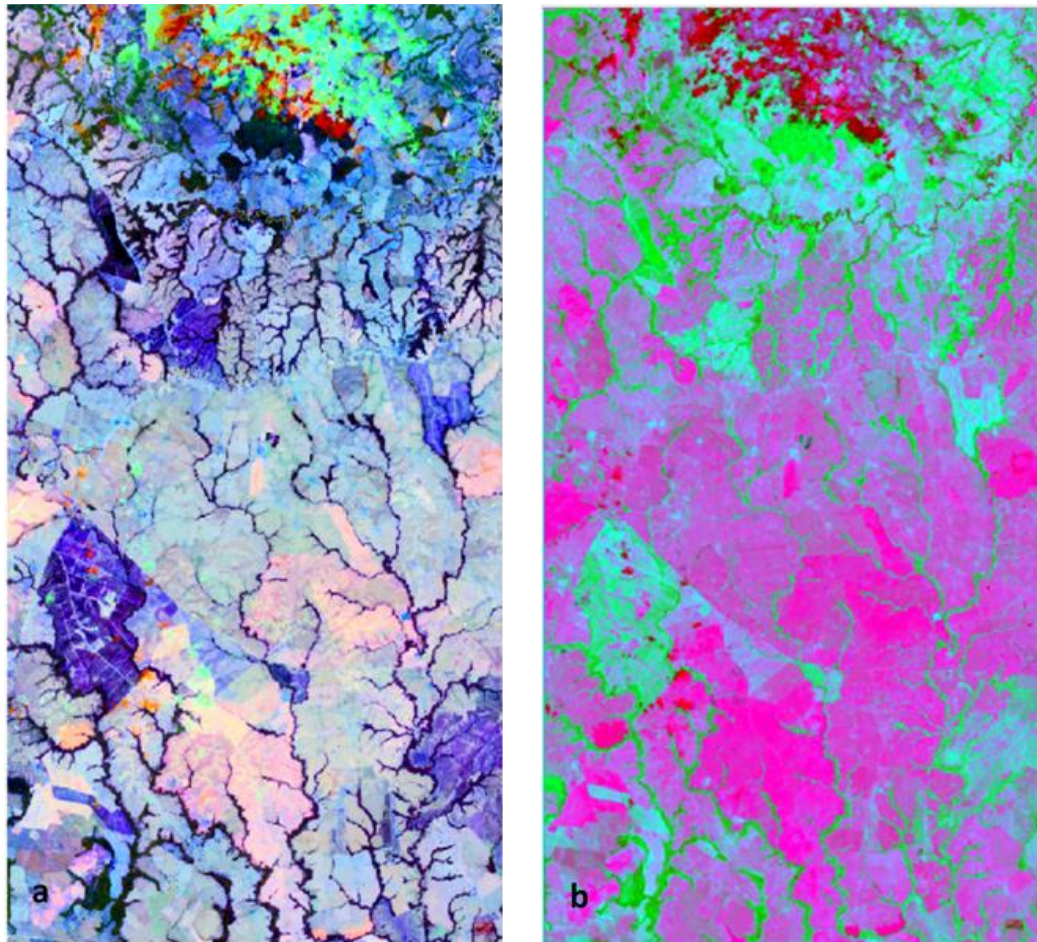
GUEJAR	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	0,5048	-0,0509	-0,4671	0,7193	0,0316	0,0095	-0,0753	-0,0173
PC2	0,6916	0,1264	-0,0441	-0,5515	0,264	0,1765	-0,3139	0,0154
PC3	0,0509	0,611	0,4821	0,3113	-0,0176	0,5138	0,009	-0,1743
PC4	-0,1978	0,0462	-0,3905	-0,1474	-0,1504	0,1336	-0,1962	-0,84
PC5	0,0589	0,1516	-0,2065	-0,105	0,4826	0,0177	0,8122	-0,1644
PC6	-0,34	-0,2373	-0,3153	-0,0102	0,2705	0,7358	-0,1258	0,3134
PC7	-0,2949	0,2722	0,0004	0,1549	0,7057	-0,3666	-0,4263	-0,0281
PC8	-0,1382	0,6727	-0,503	-0,1572	-0,3198	-0,1044	0,0036	0,3708
LLANOSUR	B2/B1	B2/B3	B4/B1	B4/B2	B4/B3	B4/B5	B4/B7	B4/B7*B5
PC1	0,4712	-0,0454	-0,4548	0,7518	0,0203	0,0103	-0,0554	-0,0191
PC2	-0,7152	-0,0018	0,1205	0,5467	-0,2875	-0,1009	0,2635	-0,1135
PC3	0,1515	0,648	0,4568	0,2024	0,0117	0,5162	-0,0825	-0,1848
PC4	-0,1194	0,0921	-0,3983	-0,1974	-0,2019	0,0178	-0,2931	-0,8079
PC5	0,011	-0,1662	0,2627	0,1048	-0,4803	-0,1012	-0,7755	0,2235
PC6	-0,2502	-0,3853	-0,2466	-0,0301	0,0276	0,8317	-0,0867	0,1649
PC7	-0,3995	0,2877	-0,1948	0,1037	0,6665	-0,1438	-0,4666	0,1621
PC8	-0,0836	0,5574	-0,4935	-0,1827	-0,4477	0,0166	0,0903	0,4433

A partir de la matriz Eigenvector del área LlanoSur se definieron los PCs para generar la imagen falso color. Los PC1, PC2, PC4, PC5 y PC6 fueron seleccionados por poseer mayores pesos en la matriz, los cuales corresponden a

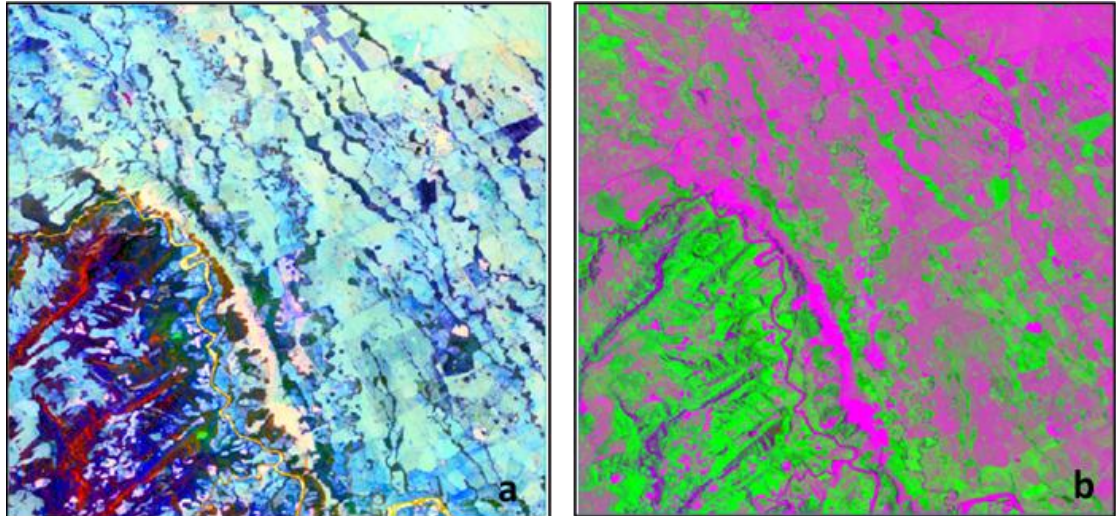
los ratios  $B4/B2$ ,  $B2/B1$ ,  $B4/B7 \cdot B5$ ,  $B4/B7$  y  $B4/B5$ . Se generaron dos imágenes RGB con las combinaciones PC4, PC5, PC6 y PC1, PC2, PC6 (Figura 40).

Para la zona Guejar se seleccionaron los PC 1, 2, 4, 5,6 para generar dos imágenes RGB cuyas combinaciones corresponden a PC1, PC2, PC6 y PC4, PC5, PC4 (Figura 41).

**Figura 40. Imagen IMG\_4090 del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA a) RGB PC4, PC5, PC6, b) RGB PC1, PC2, PC6**



**Figura 41. Imagen IMG\_4090 del polígono Guejar luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC2, PC6, b) RGB PC4, PC5, PC4.**



- PCA Aplicado A Dataset De Imágenes

Se seleccionan dos imágenes en periodos de sequía y lluvia de los años 80 considerando este periodo de tiempo con menores extensiones de tierra destinadas a los cultivos extensivos (Tabla 16).

**Tabla 86. Imágenes LANDSAT seleccionadas para realizar data set y aplicar PCA**

Imagen	Fecha adquisición	Sensor
IMG_8011	11-ene-88	TM 4
IMG_6237	25-ago-86	TM 5

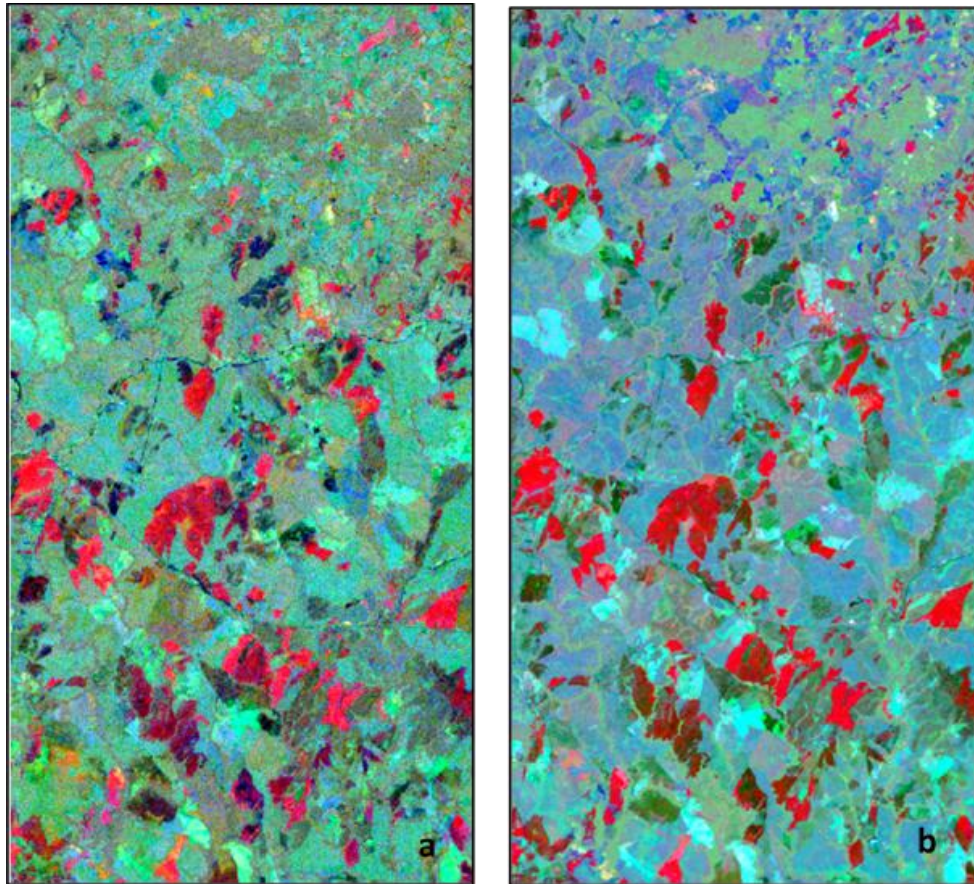
Las imágenes de 6 bandas cada una son sometidas a una “layer staking”, para generar un dataset con 12 bandas espectrales. Sobre el dataset se aplica PCA para cada par de imágenes de la misma banda. En el PC1 de cada grupo de bandas se obtendrá la información común para las dos bandas, es decir, lo que no cambio, mientras que la PC2 se obtendrá la información que cambio. Se genera un dataset con las PC2 de cada grupo de bandas para ser sometido a un nuevo PCA (Almeida, conversación personal).

A partir de la matriz Eigenvector del área LlanoSur (Tabla 17) se seleccionan los PCs para generar las imágenes falso color RGB. Los PC 1, 2, 5 y 6 fueron seleccionados para generar dos combinaciones RGB: PC1, PC5, PC6 y PC1, PC2, PC5 (Figura 42).

**Tabla 97. Matriz Eigenvector del dataset de imágenes LANDSAT.**

Eigenvector	PC2 B1	PC2 B2	PC2 B3	PC2 B4	PC2 B5	PC2 B7
PC1	0,5684	-0,8106	0,0107	-0,0268	-0,136	-0,0217
PC2	-0,5934	-0,4182	-0,6834	0,0546	-0,0532	0,0119
PC3	-0,3992	-0,1409	0,4673	-0,2242	-0,7168	-0,1959
PC4	0,3658	0,3395	-0,5377	-0,4945	-0,4018	-0,2364
PC5	0,0858	0,0984	-0,079	0,1122	-0,3989	0,8972
PC6	-0,1558	-0,1522	0,1382	-0,83	0,3799	0,3165

Figura 42. Imagen DATASET de LANDSAT del polígono LlanoSur luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC5, PC6, b) RGB PC1, PC2, PC5.

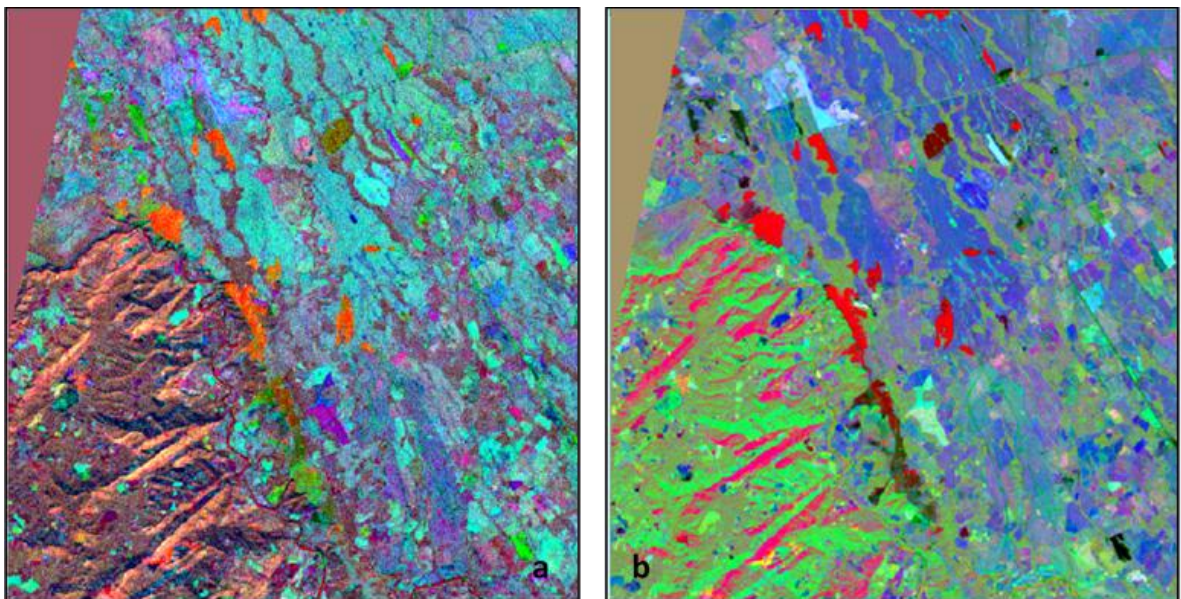


Las combinaciones RGB PC1, PC4, PC5 y PC1, PC2, PC5 (Figura 43), fueron seleccionadas a partir de la matriz Eigenvector de PCA del dataset de PCs para el área Guejar (Tabla 18).

Tabla 108. Matriz Eigenvector de la imagen IMG\_ DATASET para el área del polígono Guejar.

Eigenvector	PC2 B1	PC2 B2	PC2 B3	PC2 B4	PC2 B5	PC2 B7
PC1	-0,2476	0,8745	0,4094	-0,0713	-0,0215	-0,0296
PC2	-0,7869	0,0689	-0,6069	0,0625	0,0536	0,0312
PC3	0,5331	0,444	-0,6075	-0,0278	0,3832	0,0443
PC4	-0,1423	-0,1182	0,2957	0,4322	0,817	0,1549
PC5	0,0771	0,0911	-0,0342	0,4054	-0,335	0,8415
PC6	0,0957	0,1057	-0,0797	0,7995	-0,2646	-0,514

Figura 43. Imagen DATASET de LANDSAT luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC4, PC5, b) RGB PC1, PC2, PC5.



### 7.3.2 Imágenes Aster

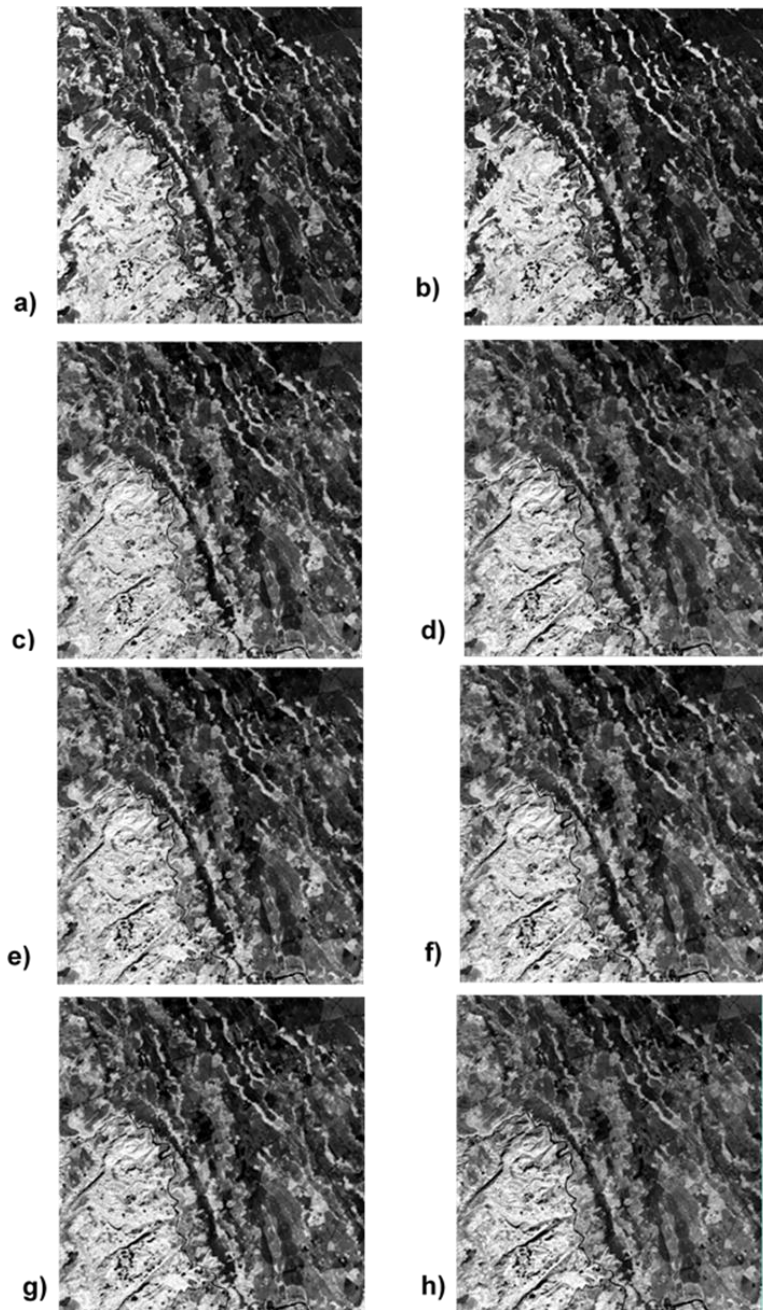
Las imágenes Aster poseen 9 bandas en la región del VNIR y SWIR entre los 0.556 a 2.4 micrómetros. La banda 3 corresponde a la banda del infrarrojo (0.807  $\mu\text{m}$ ), la cual presenta unas características espectrales importantes en la firma de la vegetación, es el punto donde se genera mayor porcentaje de reflectancia. A partir de la banda 3 se generan ratio con cada una de las bandas, es decir, se

generan los ratios B3/B1, B3/B2, B3/B4, B3/B5, B3/B6, B3/B7, B3/B8 y B3/B9 (Figura 44).

Inicialmente se tomó la imagen Aster IMG\_1, la cual cubre el área correspondiente al polígono de la zona Guejar.

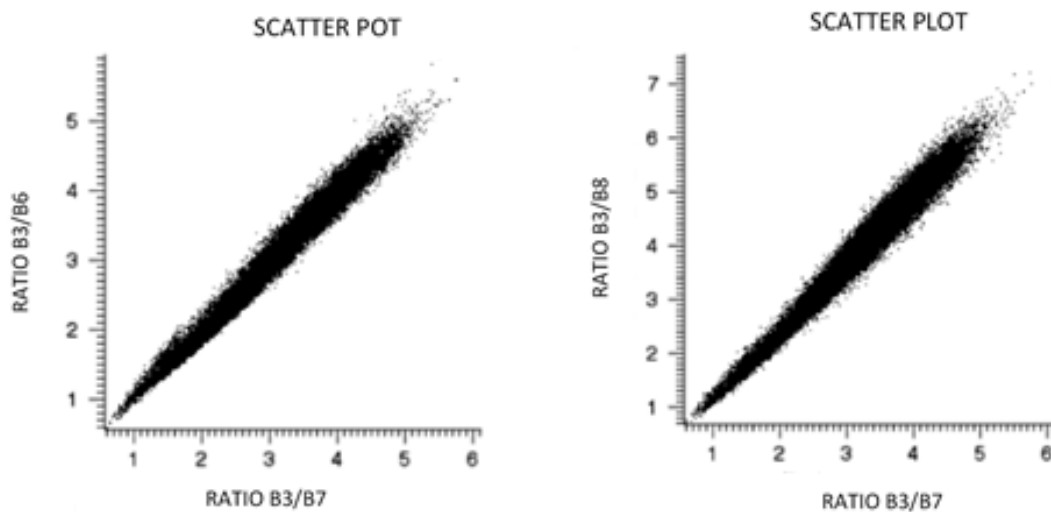
Los ratios B3/B7 y B3/B8 muestran muy baja variación en tonos y brillos de las imágenes esto debido a que las bandas SWIR 7 y 8 presentan alta correlación (Figura 45).

Figura 44. Imagen ASTER IMG\_1 para el polígono Guejar luego de aplicar ratios sobre las bandas a) ratio B3/B1,b) ratio B3/B2,c) ratio B3/B4, d) ratio B3/B5,e) ratio B3/B6,f) ratio B3/B7,g) ratio B3/B8, h) ratio B3/B9



Luego del análisis de correlación de los ratios se seleccionan seis ratios para generar un dataset (layer staking) de 6 bandas correspondientes a los ratios B3/B1, B3/B2, B3/B4, B3/B5, B3/B6 y B3/B9.

**Figura 45. Grafica tipo ScatterPlot a) ratio B3/B6 Vs B3/B7, b) ratio B3/B8 Vs B3/B7, mostrando la correlación existente entre las bandas**



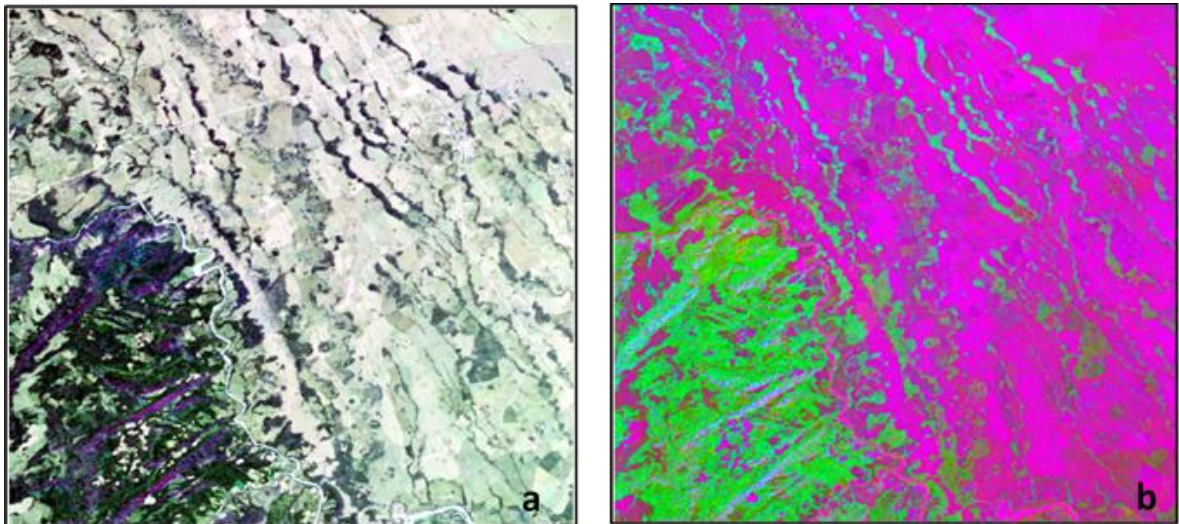
La imagen de los ratios es sometida al proceso de PCA, donde se seleccionan los PC con las bandas de mayor peso a partir del análisis de la matriz Eigenvector (Tabla 19).

**Tabla 11. Matriz Eigenvector de la imagen ASTER IMG\_1 del área Guejar**

Eigenvector	B3/B1	B3/B2	B3/B4	B3/B5	B3/B6	B3/B9
PC1	-0,706	-0,6032	-0,1054	0,3543	-0,0316	-0,0064
PC2	-0,644	0,7126	-0,0368	-0,0973	-0,2125	0,1465
PC3	0,1763	0,2992	0,193	0,9169	-0,0091	-0,036
PC4	-0,0525	-0,1542	0,8908	-0,1159	-0,2239	0,3412
PC5	-0,0541	0,0472	-0,0468	0,0377	0,7581	0,6454
PC6	-0,2236	0,113	0,3932	-0,0971	0,5735	-0,6665

A partir del análisis de los valores obtenidos en la matriz Eigenvector se definen las bandas (PCs) para generar las imágenes falso color RGB. La primera combinación seleccionada corresponde a los PCs 1, 2, 3, cuyos mayores pesos se encuentra concentrados en los ratios B3/B1, B3/B2 y B3/B5 respectivamente; una segunda combinación corresponde a los PCs 3, 4, 5, los cuales poseen los mayores pesos en toda la matriz Eigenvector de la imagen PCA, cuyos valores máximos están concentrados en los ratios B3/B4, B3/B5, B3/B6 respectivamente (Figura 46).

**Figura 46. Imagen IMG\_1 del área Guejar luego de aplicar PCA sobre la imagen de los ratios, a) PC1, PC 2, PC3 y b) PC 3, PC4, PC 5**



Para el cubrimiento del área LlanoSur se cuenta con la imagen Aster IMG\_2, un data set de 9 bandas, de las cuales se obtienen los ratios con la banda 3 como numerador y el resto de las ocho bandas como denominador, generando ocho imágenes para cada uno de los ratios B3/B1, B3/B2, B3/B4, B3/B5 B3/B6, B3/B7, B3/B8, B3/B9 (Figura 47).

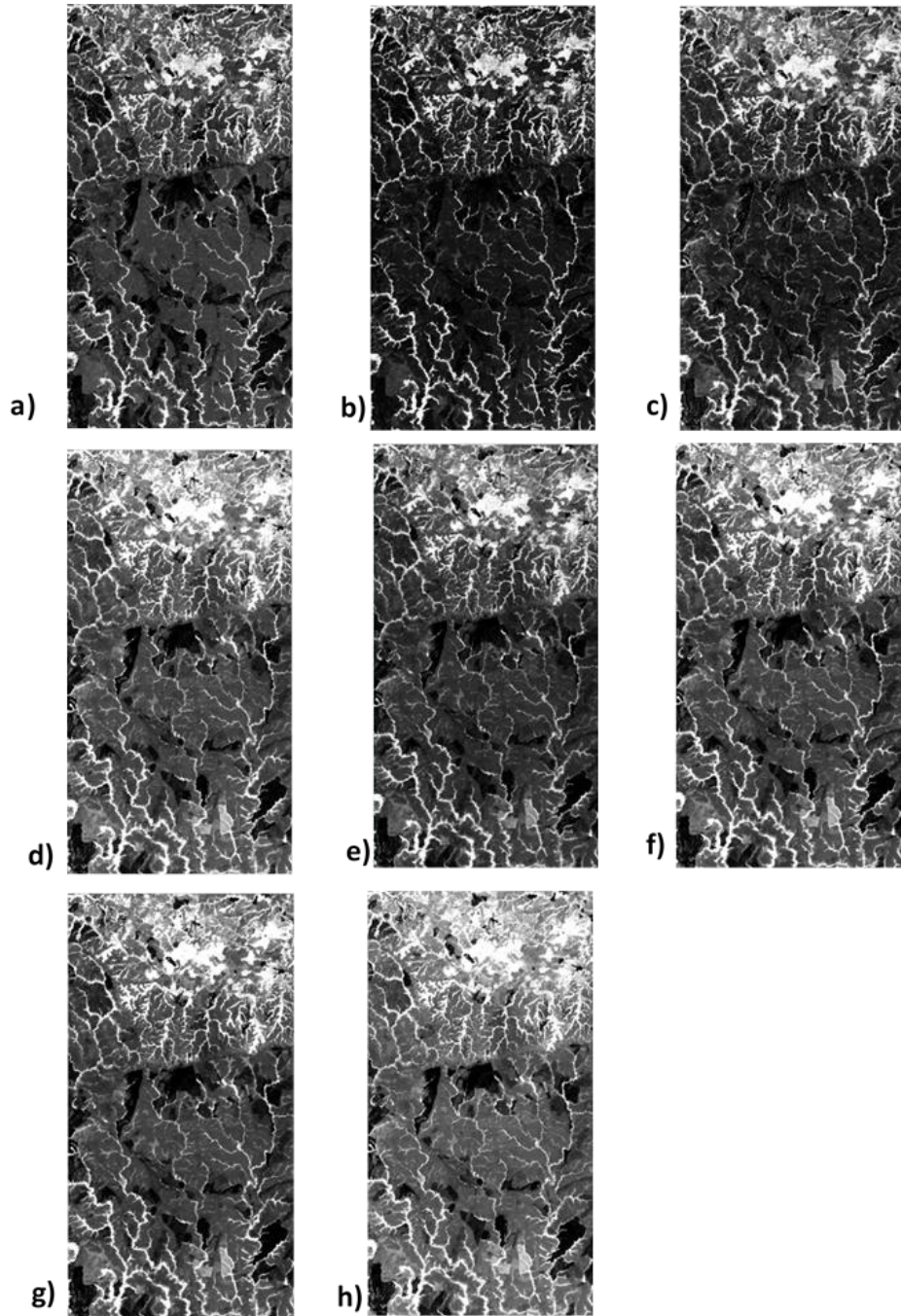
El ratio B3/B8 presenta alta correlación con respecto al ratio B3/B7, esto se observa en la ausencia de variación de tonos de la imagen. Esto conlleva a la eliminación de la banda al momento de realizar un layer stacking para generar una imagen con 7 bandas que corresponden a los ratios seleccionados.

Se aplica PCA a partir del dataset para seleccionar los PCs con los mayores pesos dentro de la matriz Eigenvector (Tabla 20). Se seleccionan las combinaciones PC1, PC2, PC3 y PC1, PC6, PC7 para generar dos imágenes falso color RGB (Figura 48).

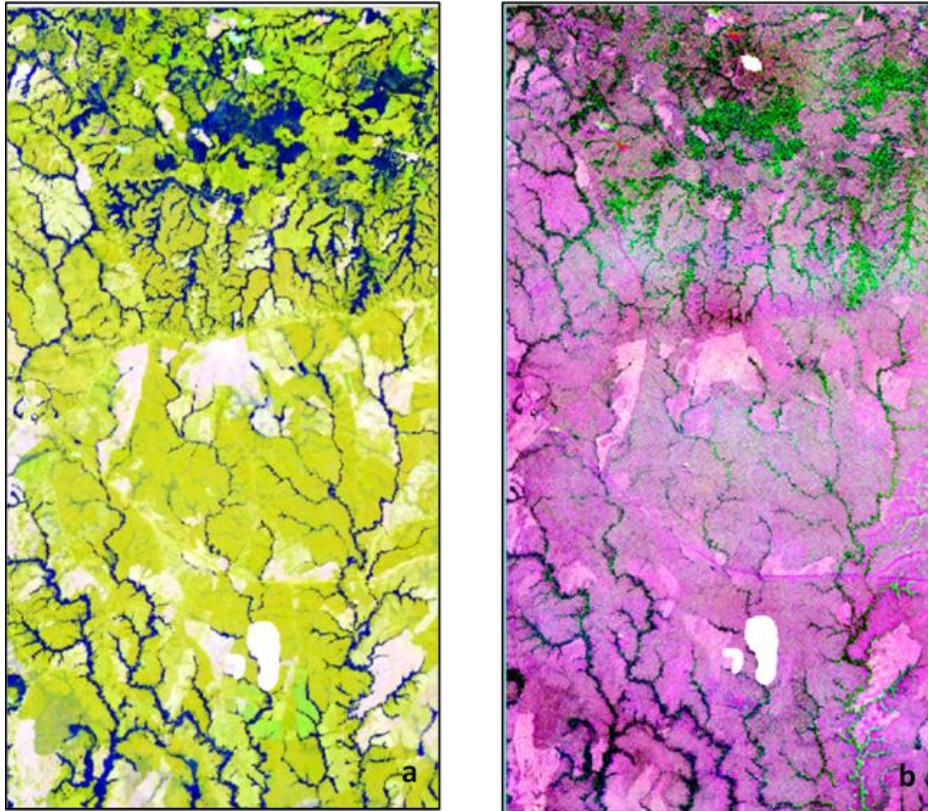
**Tabla 120. Matriz Eigenvector de la imagen ASTER IMG\_2 para el área LlanoSur.**

Eigenvector	B3/B1	B3/B2	B3/B4	B3/B5	B3/B6	B3/B7	B3/B9
PC1	-0,7612	-0,5998	0,0033	0,2395	0,056	-0,0035	-0,0195
PC2	-0,6091	0,6974	-0,226	-0,1224	-0,2761	-0,0142	-0,0083
PC3	0,0414	-0,358	-0,5708	-0,7052	-0,2159	-0,0055	0,017
PC4	-0,0759	-0,1035	0,7287	-0,3772	-0,5222	-0,1148	0,1563
PC5	-0,1816	0,1142	0,2253	-0,4735	0,7346	-0,3726	-0,0249
PC6	0,0813	-0,0282	-0,2022	0,2493	-0,1645	-0,8383	0,3998
PC7	-0,0507	0,0338	-0,0217	-0,0408	0,1863	0,3808	0,9025

Figura 47. Imagen ASTER IMG\_2 del área LlanoSur luego de aplicar ratios sobre las banda, a) ratio B3/B1,b) ratio B3/B2, c) ratio B3/B4, d) ratio B3/B5 e) ratio B3/B6, f) ratio B3/B7,g) ratio B3/B8, h) ratio B3/B9.



**Figura 48. Imagen ASTER IMG\_2 para el área LlanoSur luego de aplicar PCA, a) RGB PC1, PC2, PC3 b) RGB PC1, PC6, PC7.**



#### **7.4 CALCULO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL**

Geocientíficos en el campo de la exploración de hidrocarburos han reportado la existencia de anomalías termales sobre campos petrolíferos y han sugerido que los perfiles termales puedan ser usados como una herramienta de bajo costo por la exploración de hidrocarburos<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> Gupta, R. P., Chakraborty, R., Awasthi, A., K., 2009. Satellite Data Can Cost Effectively Show Oil Field Thermal Anomalies. Oil and Gas Journal

Sin embargo, la distribución de la temperatura superficial sobre los materiales de la superficie terrestre está ampliamente afectada por el calentamiento solar, factores meteorológicos y el comportamiento termal de los rasgos de la superficie terrestre (topografía, usos del suelo, etc.). Las anomalías termales sobre las cuencas petrolíferas pueden posiblemente ser detectadas provistas de varios otros efectos termales, estos deben ser excluidos o minimizados<sup>73</sup>.

Existen métodos relacionados con la aplicación de logaritmos, es decir, combinaciones matemáticas desarrollada por varios autores para determinar la temperatura superficial a través de las bandas termales disponibles en los diferentes satélites.

#### 7.4.1 Algoritmo Monowindow

El desarrollo del algoritmo Monowindow<sup>74</sup> para determinar la temperatura superficial de la tierra a través de los sensores TM y ETM de los satélites Landsat, a partir de la banda termal TM6, se define con la concepción previa de que la temperatura de brillo de la banda termal en el satélite puede ser calculada con los datos obtenidos en el archivo de metadato. Los datos de la imagen se obtiene en niveles digitales que son transformados a valores de radiancia, obtenidas durante el pre-procesamiento mediante la aplicación de gain y offset incluidos en el metadato de la imagen, a partir de los datos de radiancia se obtienen los valores de temperatura

---

<sup>73</sup> Gupta, R. P., Chakraborty, R., Awasthi, A., K., 2010. Model Thermal Anomalies Over Petroliferous Basins. Oil and Gas Journal. 108, 72-75.

<sup>74</sup> Qin, Z., Karnieli, A., 2001. A Mono-Window Algorithm For Retrieving Land Surface Temperature From Landsat Tm Data And Its Application To The Israel-Egypt Border Region. International Journal Of Remote Sensing, vol 22 No 18, 3719-3746.

de brillo a través de una fórmula de aproximación de la función de Plank para temperatura desarrollada por varios autores<sup>75, 76, 77</sup>.

$$L_{\lambda} = Gain * valor\ pixel\ (DN) + offset$$

$$\frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} = T_6$$

Donde  $L_{\lambda}$  es la radiancia espectral recibida por el sensor ( $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$ ),  $T_6$  es la temperatura de brillo recibida por el satélite de la banda TM6 en Kelvin (k),  $K_1$ ,  $K_2$  son constantes de calibración (Tabla 21).

**Tabla 131. Constantes de calibración para cálculo de temperaturas de brillo en las imágenes LANDSAT**

SENSOR	K1 ( $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$ )	K2 (kelvin)
LANDSAT 4 TM	671.62	1284.3
LANDSAT 5 TM	607.76	1260.5
LANDSAT 7 ETM	666.09	1282.7
LANDSAT 8 OLI		
B10	774.89	1321.08
B11	480.89	1201.14

Fuente: Chander, G., Markham, B.L., Helder, D. L., 2009. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensor. Remote Sensing of Environment, 113, p 902.

Las constantes  $K_1$  y  $K_2$  para las bandas B10 y B11 de las imágenes Landsat 8 se obtienen de la información del metadato de cada imagen.

Mediante cálculos obtenidos durante su investigación Qin et al 2001, definieron el algoritmo monowindow (1) en función de la emisividad de la superficie. Donde la

<sup>75</sup>Schott, J. R., y Volchok, W. J., 1985. Thematic Mapper thermal infrared calibration. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51, 1351-1357.

<sup>76</sup> Wokelic et al., 1989. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper thermal Band. Remote Sensing of Environment, 28, 339-347.

<sup>77</sup> Goetz et al., 1995. Surface Temperature retrieval in a temperature grassland with multiresolution sensors. Journal of Geophysical Research, 100, 25397-25410.

emisividad a su vez está definida en función del índice de vegetación NDVI según Van de Gried<sup>78</sup> (2).

$$(1) Ts = [a_6(1 + C_6 - D_6) + (b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6)T_6 - D_6T_a]/C_6$$

$$(2) \varepsilon = 1.0094 + 0.045 \ln NDVI$$

Donde Ts corresponde a la temperatura de superficie, a6 y b6 corresponden a coeficientes con valores de -67.35351 y 0.458606 respectivamente

C6 y D6, son variables definidas en función de las propiedades de transmitancia de la atmosfera y la emisividad de los elementos en la superficie.

$$(3) C_6 = \varepsilon * \tau$$

$$(4) D_6 = ((1 - \tau) * [1 + (1 - \varepsilon)\tau$$

Los valores de transmitancia de la atmosfera están en relación lineal con el vapor de agua (w) dado en unidades de g/cm2 (Tabla 22).

$$(5) \tau = A - B * w$$

Los valores A y B corresponden a constantes obtenidas por experimentación.

Generalmente el valor del vapor de agua obtenido se encuentra dentro de dos rangos de la tabla, la transmitancia se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$(6) \tau(C) = \tau(A) - (C - A) * [\tau(A) - \tau(B)]/0.2$$

Donde A y B corresponden a vapor de agua de los límites inferior y superior respectivamente

$$(7) Ta = 17.9769 + 0.91715To \text{ atmosfera Tropical}$$

---

<sup>78</sup> Van de Griend, A.A., 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index surfaces. Internatinal Journal of Remote Sensing 14 /6): 1119-1131.

Ta, hace referencia a la temperatura atmosférica, derivada de una relación lineal de esta con la temperatura del aire cercano al suelo en grados kelvin, donde Ta se ajusta a un modelo atmosférico predefinido para las regiones tropicales.

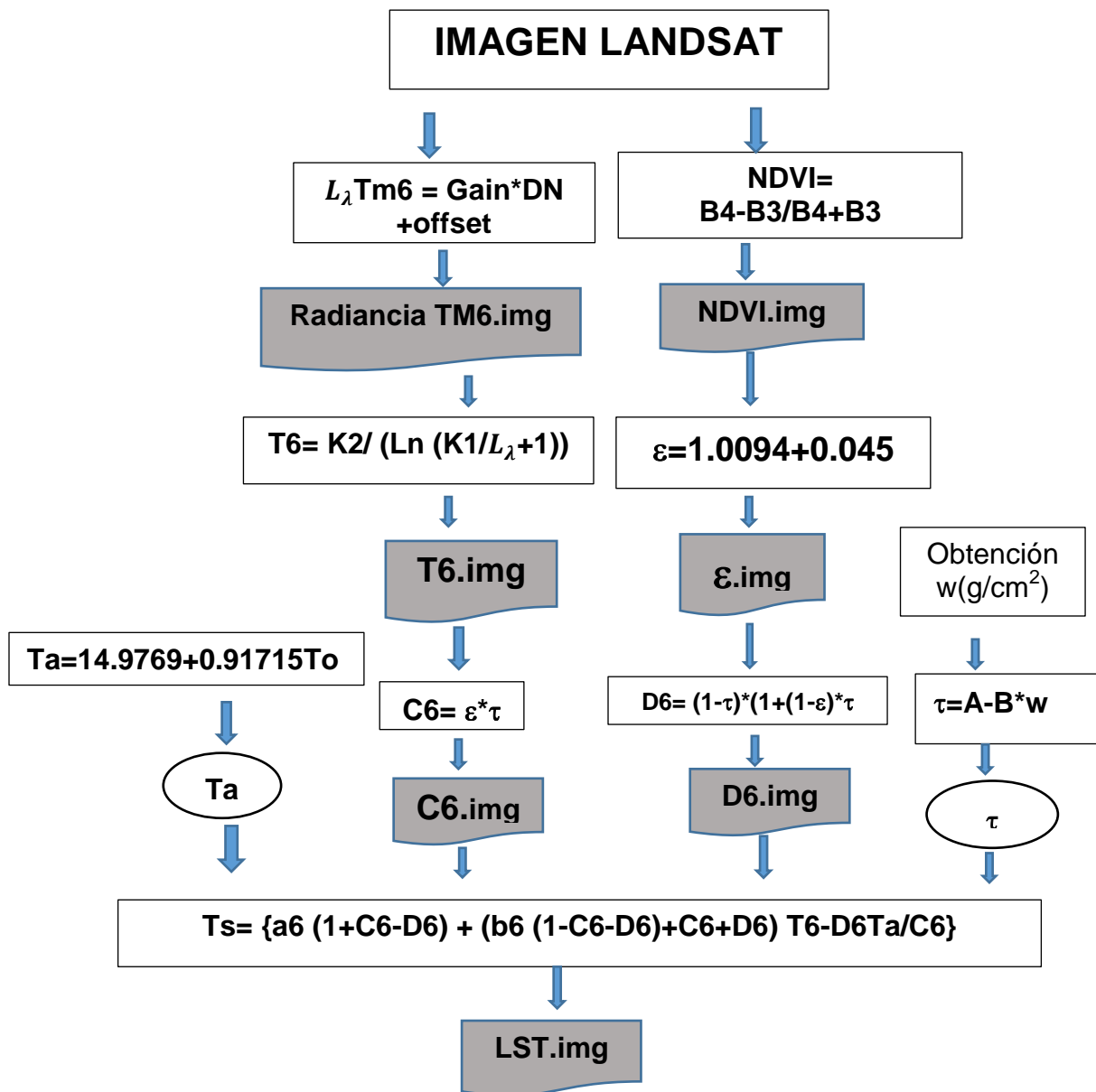
**Tabla 142. Valore de transmitancia en función de la variable w (vapor de agua).**

w(g/cm2)	$\tau$	w(g/cm2)	$\tau$	w(g/cm2)	$\tau$	w(g/cm2)	$\tau$
0,4	0,9395	2,2	0,7795	4	0,553	5,8	0,3348
0,6	0,9261	2,4	0,7562	4,2	0,5268	6	0,3138
0,8	0,9119	2,6	0,7324	4,4	0,5013	6,2	0,2934
1	0,8966	2,8	0,7077	4,6	0,4757	6,4	0,274
1,2	0,88	3	0,6827	4,8	0,4509	6,6	0,2552
1,4	0,8622	3,2	0,657	5	0,4265	6,8	0,2375
1,6	0,8432	3,4	0,6312	5,2	0,4024	7	0,2207
1,8	0,823	3,6	0,6052	5,4	0,3793	7,2	0,2045
2	0,8039	3,8	0,5789	5,6	0,3565		

Fuente: Qin, Z. Comunicación personal.

La Figura 49 resume los pasos seguidos para la aplicación del algoritmo Monowindow usada para el cálculo de la temperatura superficial.

Figura 49. Pasos para obtener los valores de temperatura de superficie siguiendo el algoritmo Monowindow.



#### 7.4.2 Algoritmo Split Window (SWA)

El SWA<sup>79</sup> fue inicialmente propuesto por McMillin quien sugirió usar las diferencias en la absorbancia atmosférica de dos bandas LWIR con el objetivo de obtener con precisión la temperatura de la superficie del agua (SST). Para hacer la transición de SST a LST se debe asumir la emisividad superficial del suelo para ambas bandas (banda 10 y banda 11, Landsat 8).

La LST es obtenida a partir de una serie de cálculos matemáticos en el que interviene la derivación a partir de la linearización con serie de Taylor de primer orden de la ecuación de transferencia radiativa y es expresada con la formula general.

$$(1) \quad T_s = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11}$$

Donde  $T_s$  es la LST,  $T_{10}$  y  $T_{11}$  son las temperaturas de brillo para las bandas TIR 10 y 11, respectivamente,  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$  son coeficientes determinados por la transmitancia atmosférica y la emisividad de la superficie (LSE) para ambas bandas del TIR:

$$(2) \quad A_0 = E_1 a_{10} + E_2 a_{11}$$

$$(3) \quad A_1 = 1 + A + E_1 b_{10}$$

$$(4) \quad A_2 = A + E_2 b_{11}$$

$$(5) \quad A = D_{10}/E_0$$

$$(6) \quad E_1 = D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})/E_0$$

$$(7) \quad E_2 = D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})/E_0$$

---

<sup>79</sup> Rozenstein, O., Qin, z., 2014. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. *Sensors Open Acces*, 14, p 5768-5780. [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).

$$(8) E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}$$

$$(9) C_i = \varepsilon * \tau$$

$$(10) D_i = (1 - \tau) * [1 + (1 - \varepsilon)\tau]$$

Las variables a10, a11, b10, b11 corresponden a coeficientes de regresión determinados por una tabla de temperatura experimental, los cuales corresponden a:

$$a_{10} = -62.8065$$

$$a_{11} = -67.1728$$

$$b_{10} = 0.4338$$

$$b_{11} = 0.4694$$

Las ecuaciones 9 y 10 fueron obtenidas por Qin et al 2001 en el desarrollo del algoritmo Monowindow.

Para el área del polígono LlanoSur se calculó la temperatura superficial en la serie de imágenes LANDSAT entregadas por el USGS (Servicio Geológico de Estado Unidos) con una resolución espacial de 30 m en las bandas TIR.

Las Figura 50, Figura 51 y Figura 52 muestra la distribución de temperaturas superficiales calculadas a partir de la imagen IMG\_8011, IMG\_7347 y la imagen IMG\_1062 respectivamente.

Los cálculos para el área del polígono Guejar no se consideraron debido a que esta zona con menor área total estaba más afectada por pequeñas nubes, por lo que fue más complicado encontrar una serie temporal de imágenes Landsat completamente sin nubosidad.

Figura 50. Mapa de distribución de temperaturas sobre el polígono LlanoSur tomando la imagen Landsat IMG\_8011, aplicando el algoritmo Monowindow.

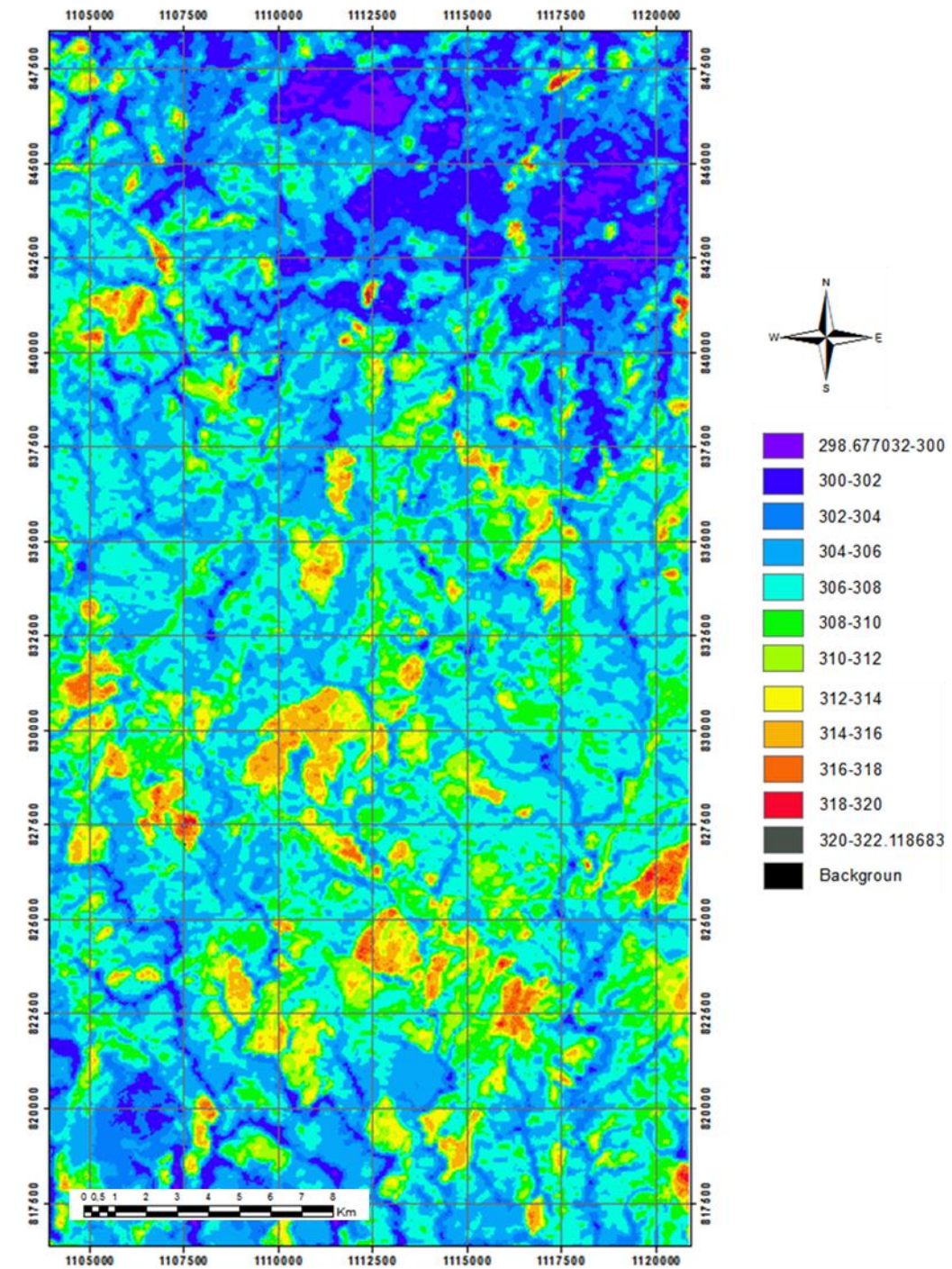


Figura 51. Mapa de distribución de temperaturas sobre el área LlanoSur tomando la imagen LANDSAT IMG\_7347, aplicación de algoritmo Monowindow

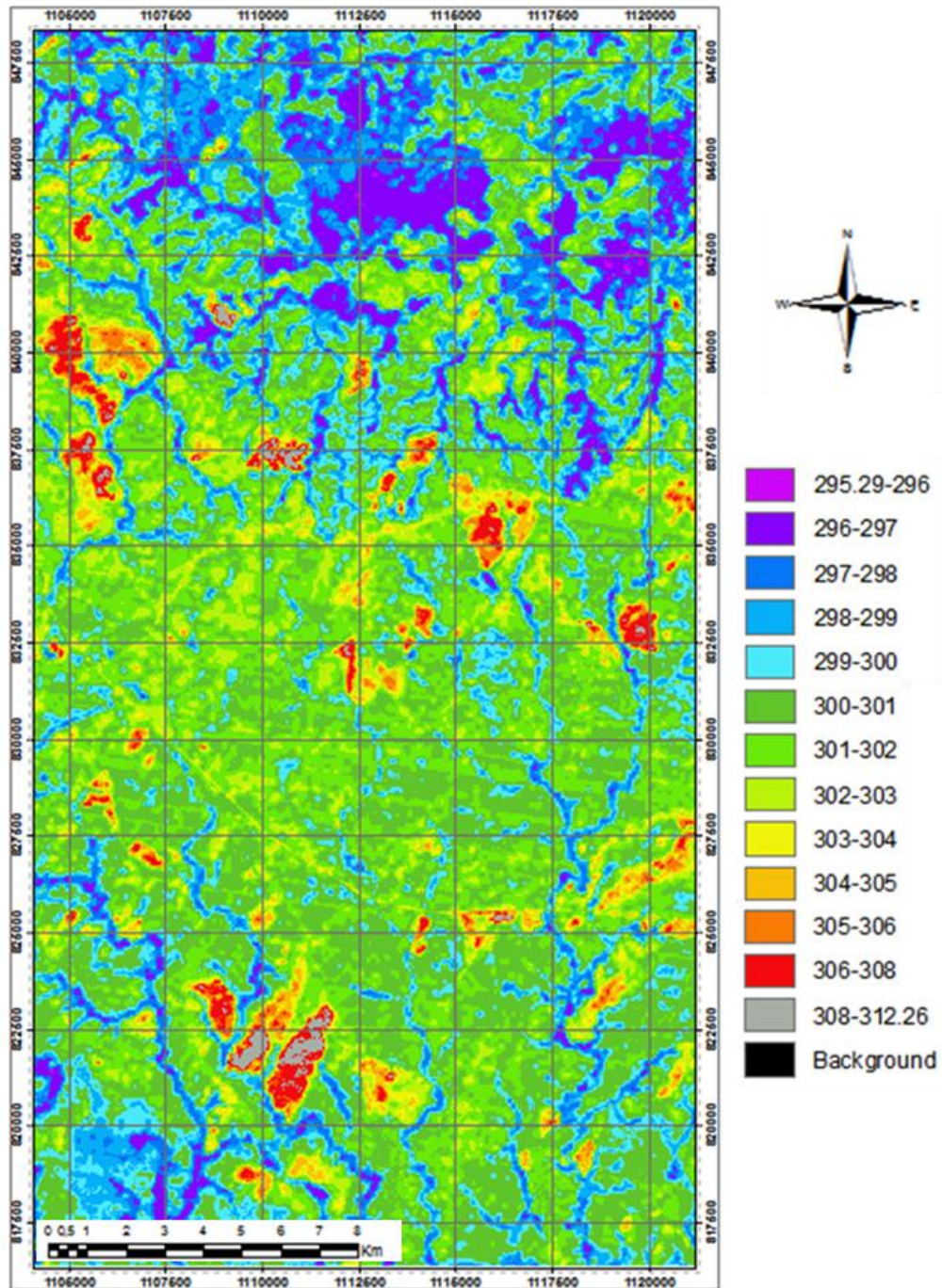
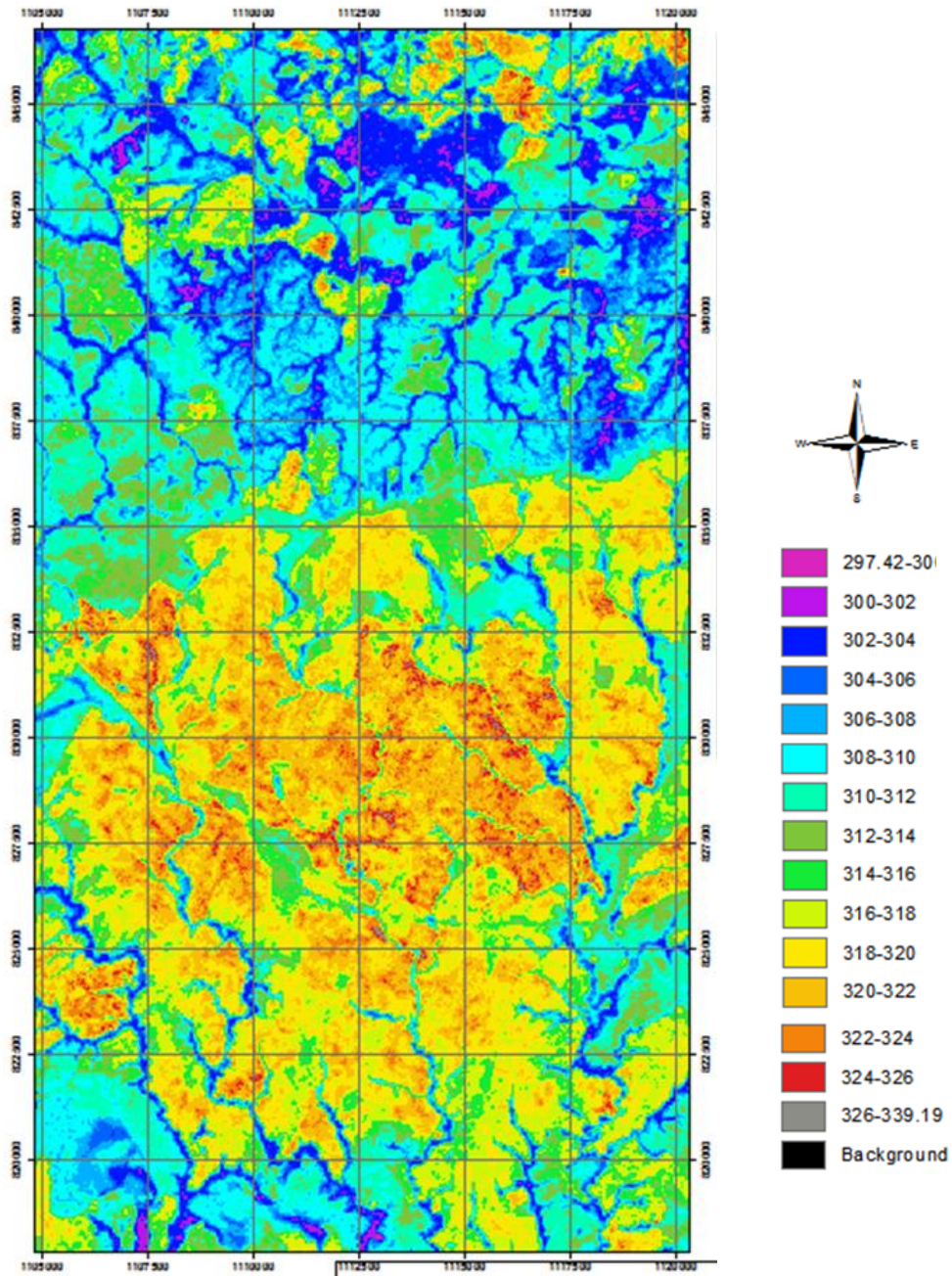


Figura 52. Mapa de distribución de temperaturas sobre el área LlanoSur tomando la imagen LANDSAT IMG\_1062, aplicación de algoritmo Monowindow



## 7.5 ESPECTROMETRÍA DE CAMPO

Mediante los datos obtenidos en campo de las firmas espectrales se pueden realizar cálculos para generar curvas según el índice de vegetación e identificar cambios en la posición REP.

El Red-edge es altamente correlacionable con N y es menos sensible a la reflexión de fondo del suelo<sup>80</sup>. En varios estudios se ha demostrado que el cambio de inflexión en la curva de Red-edge se encuentra relacionado con las condiciones de crecimiento de las plantas. El REP depende de la cantidad de clorofila detectada por el sensor. Está fuertemente relacionado con el contenido de clorofila foliar y presenta un indicador bastante sensible del estrés en la vegetación<sup>81</sup>.

El REP puede ser calculado por tres métodos: 1) Método Gaussiano invertido (IGM), 2) Interpolación lineal y 3) Extrapolación lineal

Para efectos de este trabajo se aplicó el método de interpolación lineal definido por Guyot y Baret<sup>82</sup>, Este método asume que la reflectancia espectral en el red-edge puede ser simplificado como una línea recta centrada alrededor del punto medio entre la reflectancia más alta del NIR cerca de los 780nm, y la reflectancia mínima del rasgos de absorción de la clorofila cerca de los 670 nm. Primero, el valor de reflectancia es estimado en el punto de inflexión (1), luego, un procedimiento de interpolación lineal para los puntos 700 y 740 nm es aplicado para la estimación de la longitud de onda correspondiente al valor de reflectancia estimado en el punto de inflexión (2).

---

<sup>80</sup> Cho, M. A., Skidmore, A. K., 2006. A New Technique For Extracting The Red Edge Position From Hyperspectral Data: The Linear Extrapolation Method. *Remote Sensing and Environment*, 101, 181-193.

<sup>81</sup> Dawson, T.P., Curran, P. J, 1998. A new Technique for Interpolation Red Edge Position. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2133-3139

<sup>82</sup> Guyot, G., Baret, F., 1988. Utilisation de la Haute Resolution Spectrale Pour Suivre l'état des Cpuvert Vegetaux. *Proceeding Of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Object in Remote Sensing. ESA SP-287, Assois, France 279-286.*

$$(1) \quad R_{red-edge} = \frac{(R_{670}-R_{780})}{2}$$

$$(2) \quad REP = 700 + 40 \left[ \frac{R_{red-edge}-R_{700}}{R_{740}-R_{700}} \right]$$

Donde las constantes 700 y 40 resultan de la interpolación entre el intervalo de 700nm y 740nm, R670, R700, R740, R780 son los valores de reflectancia en los valores de 670, 700, 740 y 780 respectivamente.

Los siguientes índices de vegetación fueron calculados usando los datos de reflectancia de campo, donde R corresponde al valor de la reflectancia en la longitud de onda específica, usados en trabajos previos<sup>83</sup>.

$$RI = \frac{R_{531}-R_{570}}{R_{531}+R_{570}}$$

El PRI está relacionado con los cambios sutiles en la salud de la planta como los causados por la influencia del etano

$$LIC3 = \frac{R_{440}}{R_{740}}$$

Este correlacionado con la concentración de oxígeno, se asume que minimiza la diferencia entre el suelo y la vegetación en las coberturas con baja vegetación.

$$Vog1 = \frac{R_{740}}{R_{720}}$$

Correlacionado con la concentración de oxígeno, maximiza diferencias en áreas con alta vegetación.

$$OSAVI = (1 + 0.16) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$$

Correlacionado con concentración de oxígeno

$$RATIO \frac{R_{765}}{R_{735}}$$

---

<sup>83</sup> Noomen, M., 2006. Hyperspectral Reflectance of Vegetation Affected by Underground Hydrocarbon Gas Seepage. Tesis Doctoral. Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC). Universidad de Twente. Holanda.

$$WBI = \frac{R900}{R970}$$

$$NDVI52 = \frac{R805 - R555}{R805 + R555}$$

$$NDVI53 = \frac{R805 - R657}{R805 + R657}$$

$$NDVI54 = \frac{R805 - R710}{R805 + R710}$$

La toma de datos para espectrometría en campo se centró principalmente en el polígono LlanoSur. Se seleccionaron los puntos con mayor contenido de gases totales bajo la premisa que a mayor contenido de gases en suelo mayor es el efecto de estos sobre los suelos y por consiguiente sobre la vegetación.

La toma de datos estuvo condicionada a cuestiones logísticas (préstamo del equipo por parte del IGAC) y climatológicas. Se visitaron diez puntos de los cuales se pudo tomar datos en ocho de ellos (Tabla 23).

La imagen 53 muestra panorámicas de las áreas visitadas para la toma de datos de espectrometría. Se puede observar que en términos generales la zona se encuentra cubierta por pasto, es evidente la homogeneidad de los materiales en superficie en cada uno de los puntos.

A partir de la Figura 54 a la Figura 60 se muestran las gráficas de índices de vegetación aplicados sobre cada uno de los subpuntos tomados en las transectas de cada punto con alto contenido de gases, además del comportamiento de la variable REP (Red Edge Position).

**Tabla 153. Observaciones generales de las áreas donde se encuentran localizados cada uno de los puntos visitados para la toma de los datos de espectrometría.**

Nombre	Este	Norte	Observaciones
Punto 1	1112937	841880	Zona ganadera, pastos de 10-20 cm de altura. Presencia de drenaje con nacimiento cercano, el drenaje presenta una coloración blanca
Punto2	1116797	839584	Zona de ganadería, pastos con una altura aproximada de 10 cm, no se observaron semovientes a la hora de la toma de los datos, el pasto mostraba un aspecto sano. Los datos fueron obtenidos en óptimas condiciones de iluminación con muy baja presencia de nubes 2:42pm
Punto3	1114733	841978	Zona ganadera, con presencia de semovientes a la hora de la toma de los datos. Presencia de pastos de 10 cm de altura aproximadamente. La toma se realizó a las 12:00 pm bajo condiciones de iluminación óptimas con muy baja presencia de nubes.
Punto 4	1116114	824835	Área destinada a la ganadería, con presencia de semovientes a la hora de la toma de los datos. Presencia de alta cantidad de montículos de tierra generado por insectos (hormigueros/termiteros). Se presentaron cambios en las condiciones climáticas lo que

			llevo a la interrupción de la toma de datos al metro 25 de la transecta.
Punto 11	1109068	832347	Zona de ganadería con pastos de 10-20 cm de altura aproximadamente. Presencia de algunos montículos de tierra (hormigueros/termiteros). Se observaron semovientes a la hora de la toma de datos.
Punto 13	1113703	840262	Principal uso del suelo es la ganadería, no se observaron semovientes en el momento de la toma de los datos, los pastos presentaban un aspecto sano con altura de 20 cm aproximadamente.
Punto 14	1117123	826542	Zona destinada a la ganadería, en el momento de la toma de datos no se observó la presencia de semovientes, los pastos presentaban alturas de más de 50 cm. La medición se realiza a la 1:30 pm bajo condiciones de iluminación óptimas con cielo despejado.
Punto 15	1117733	840175	Área destinada a la ganadería. Durante la toma de datos el cielo presentaba nubosidad considerable disminuyendo la luminosidad.

**Figura 53. Vista de los puntos visitados para la toma de firmas espectrales a) punto 1, b) punto 13, c) punto 3, d), e) punto 11, f) punto 4, g) punto 14, h) punto 15.**



**Figura 54. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto1. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.**

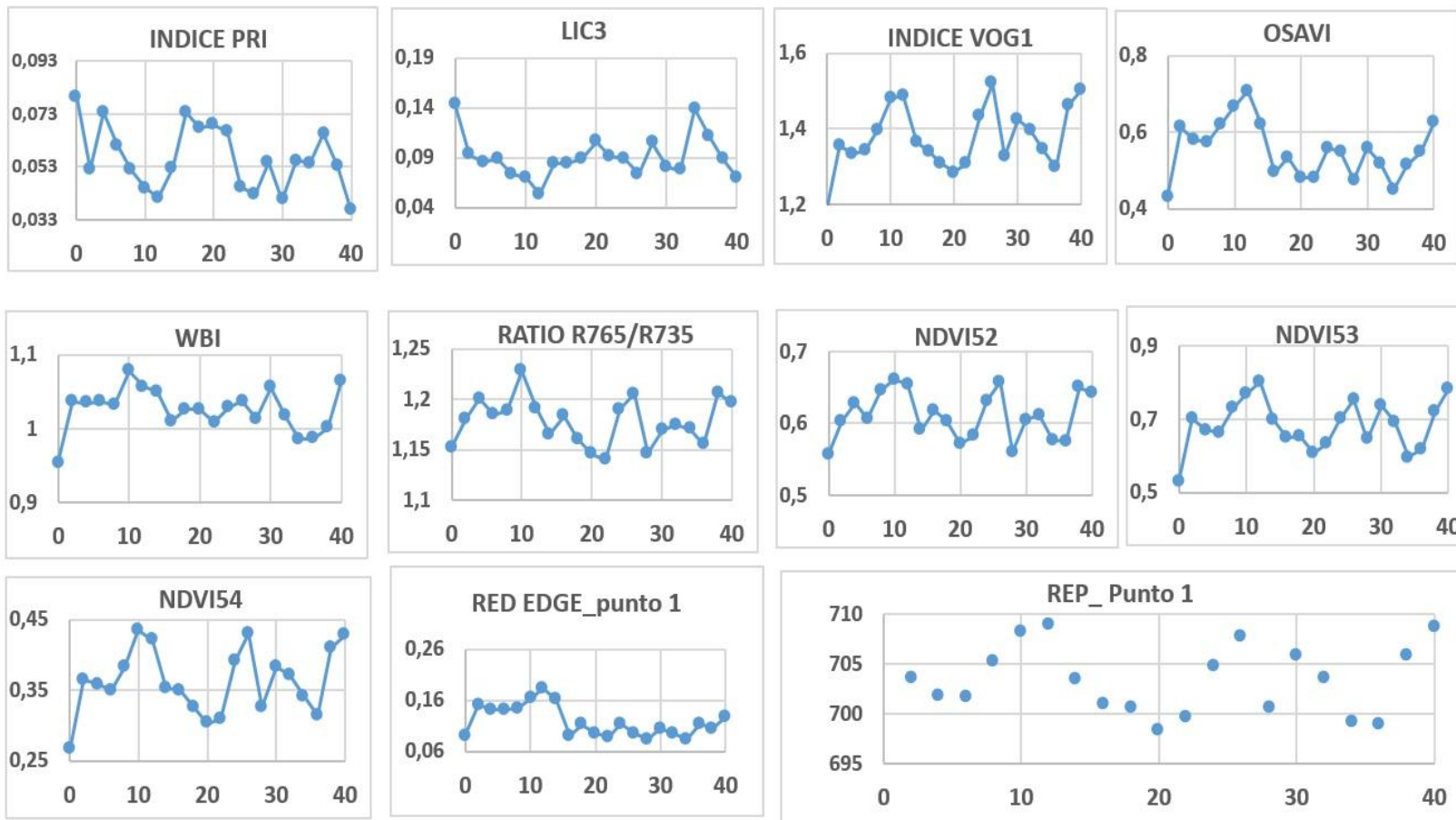


Figura 55. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto2. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.

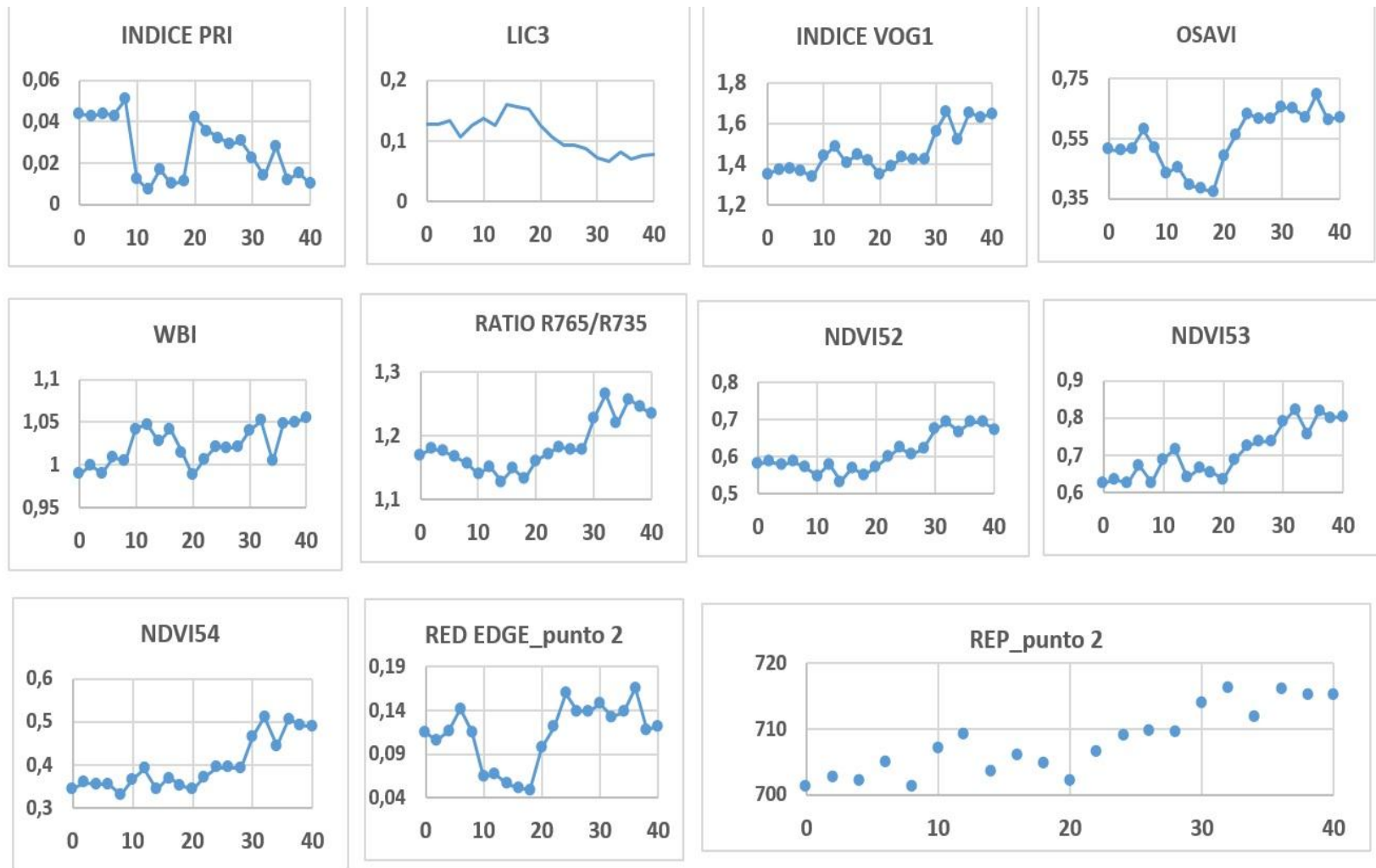


Figura 56. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto3. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.

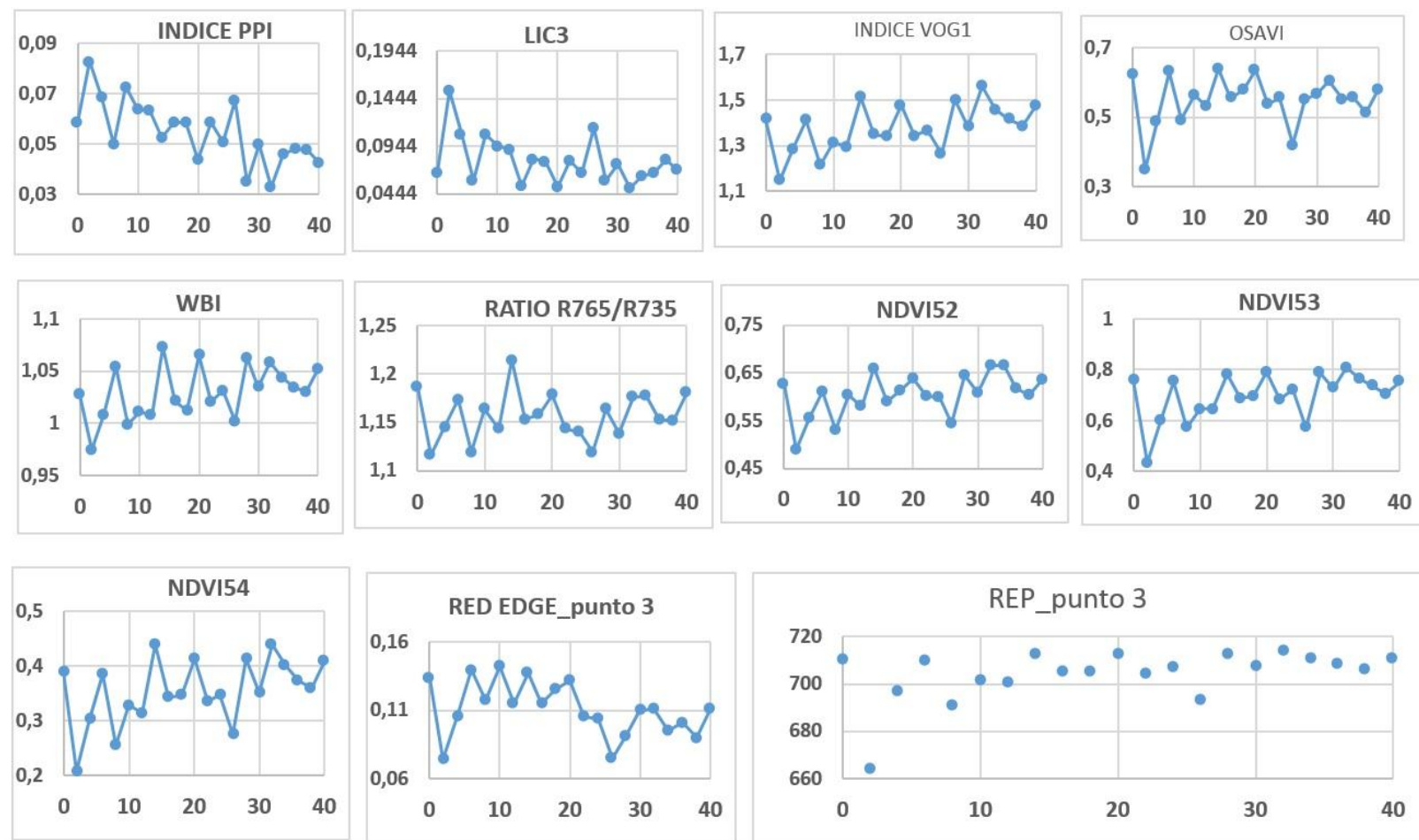
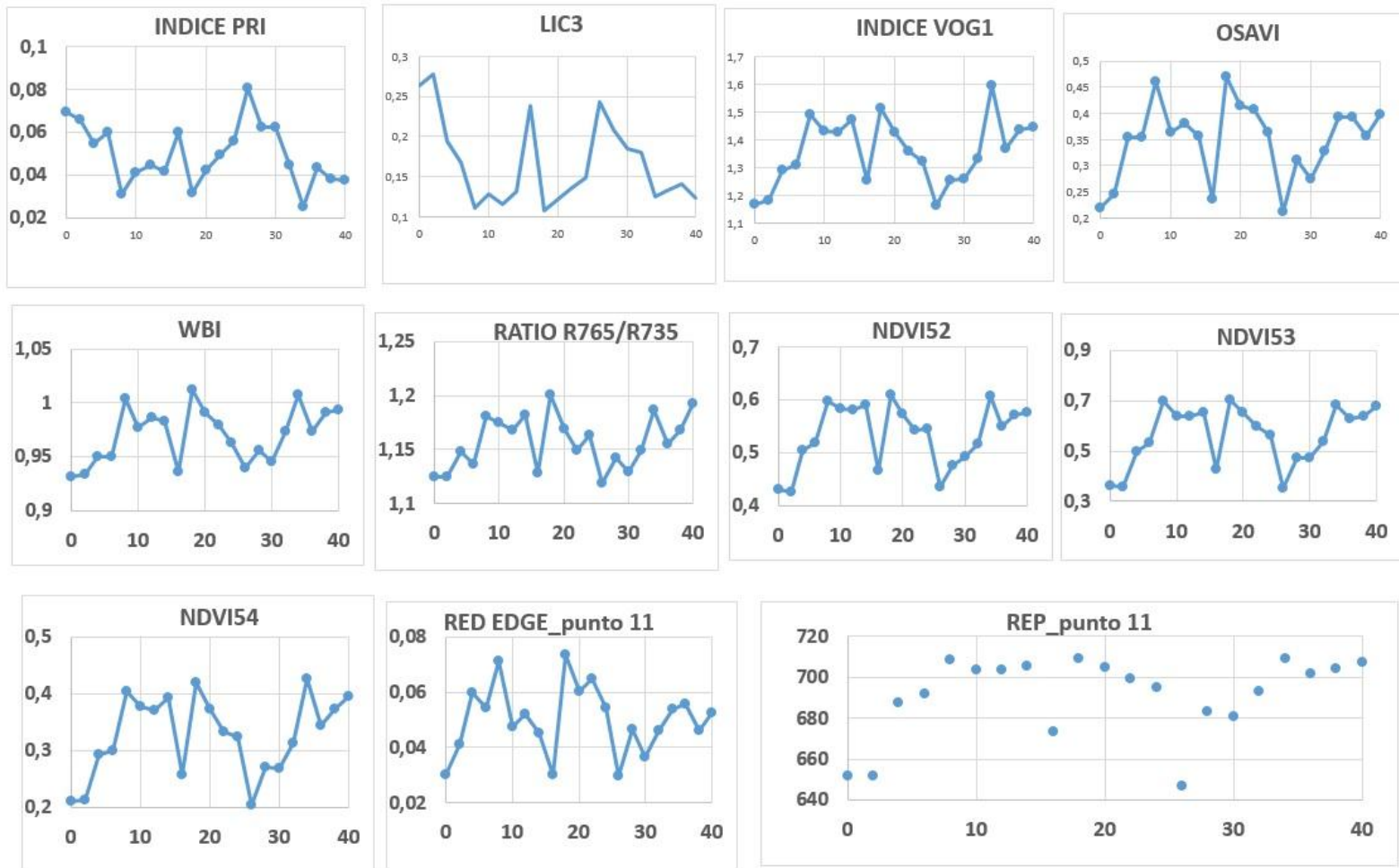
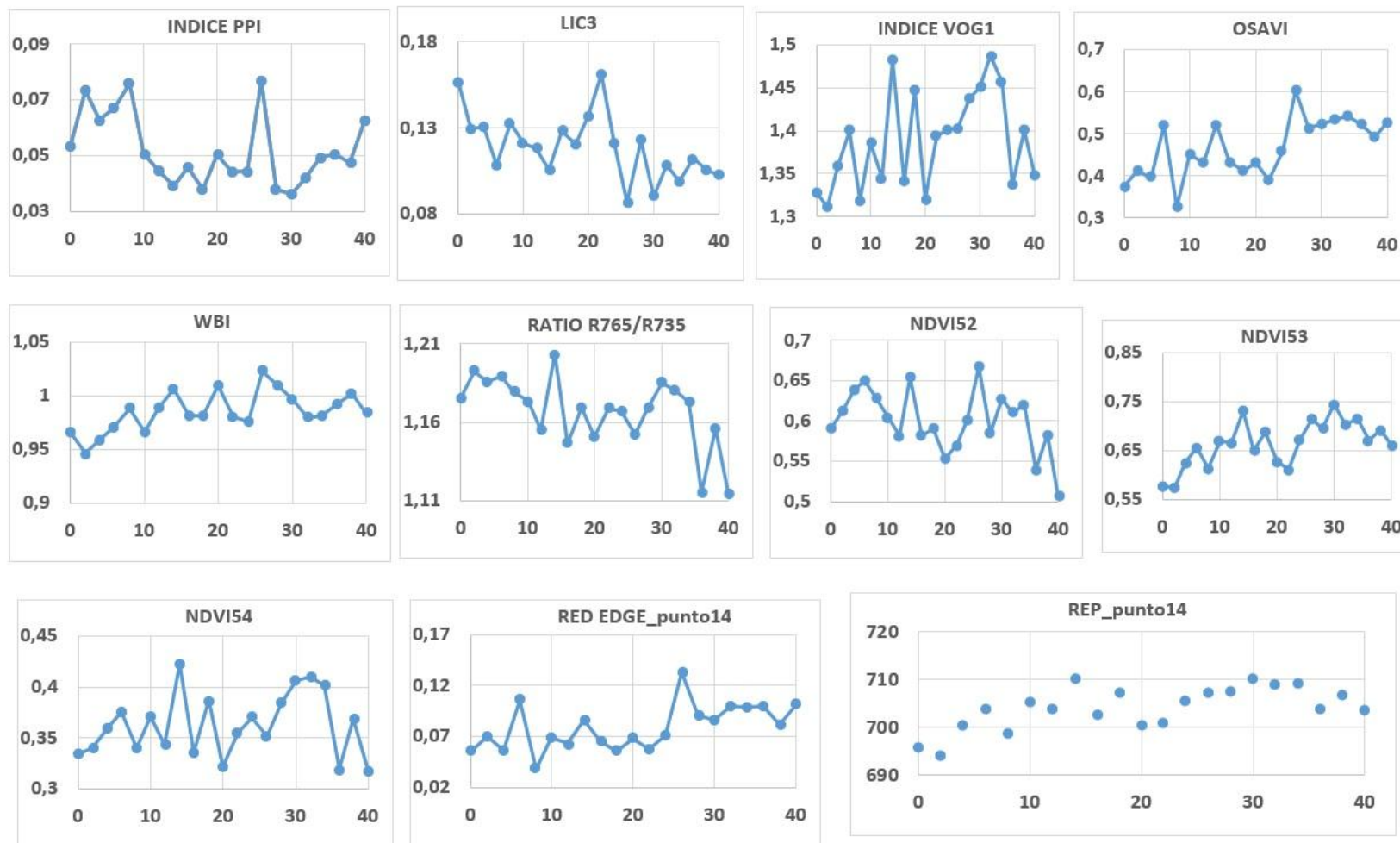


Figura 57. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto11. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.

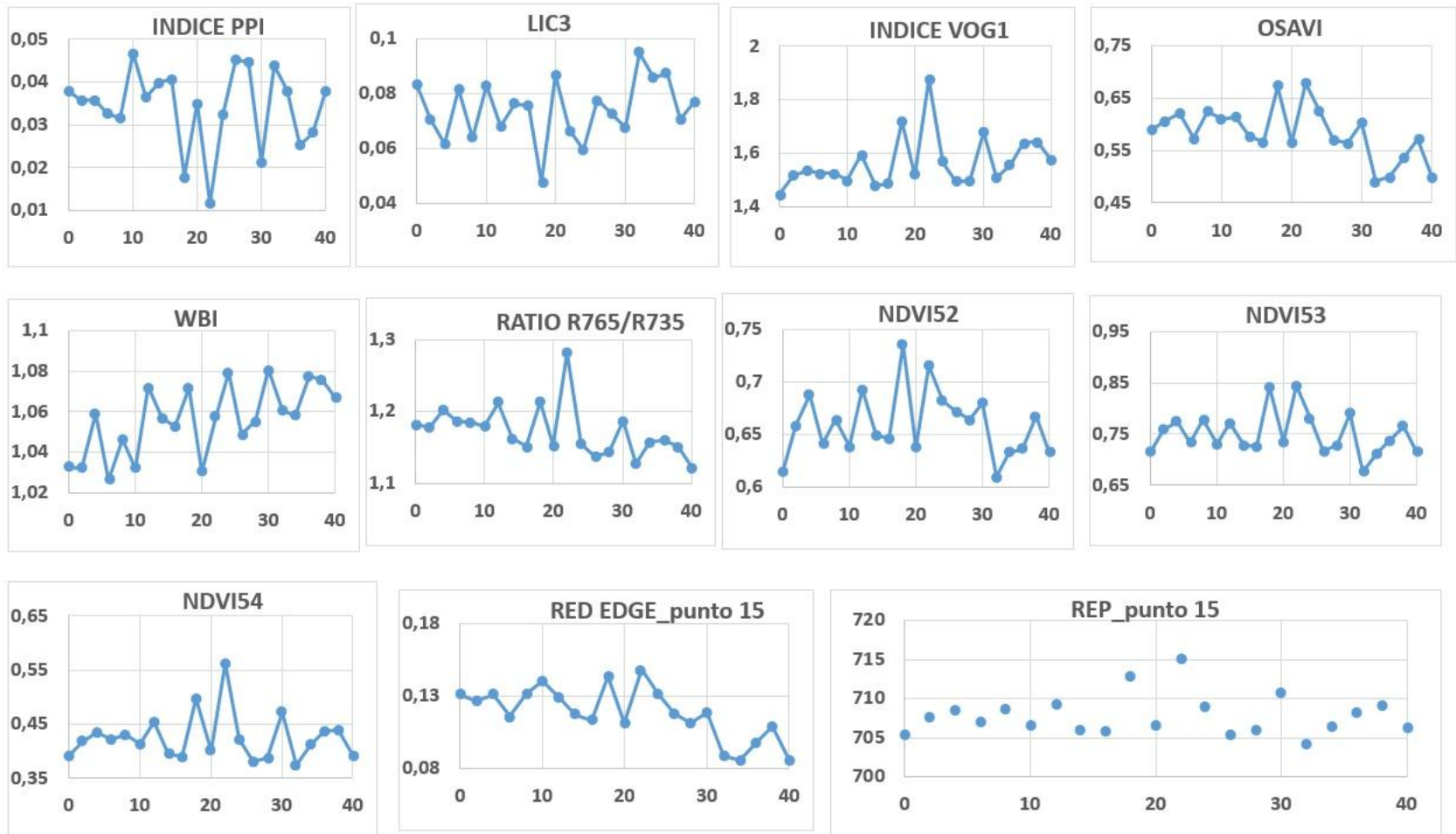




**Figura 59. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto14. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.**



**Figura 60. Aplicación de índices de vegetación sobre la transecta del punto15. El eje X corresponde a la longitud de la transecta (40 m), mientras que el eje Y corresponde a los valores de reflectancia. En la grafica REP el eje Y indica la longitud de onda.**



Como se ha mencionado anteriormente y se puede observar en la figura 53, el área correspondiente al polígono LlanoSur es muy homogénea cubierta por pastos bajos, lo cual se ve reflejado en la baja variación en el comportamiento espectral de los elementos en superficie.

A partir de los gráficos de índices de vegetación en la transecta de cada uno de los puntos visitados se pueden inferir algunas características:

Punto1: En este punto se observa una disminución en los índices NDVI2, NDVI3 y NDVI4, en los puntos correspondientes a 5, 20 y 35 m de la transecta, igualmente en estos puntos se observa un cambio de la posición del REP hacia longitudes de onda más corta.

Punto2: A partir del inicio de la transecta (0m) hasta el metro 20 los puntos poseen valores bajos en los índices NDVI2, NDVI3 y NDVI4, así mismo en este intervalo la posición del REP se encuentra migrado hacia longitudes de onda más cortas.

Punto3: Este punto muestra una homogeneidad en el recorrido de la transecta con respecto a los cambios de posición del REP. Los índices de vegetación muestran una variación constante sin que se permita definir una tendencia clara.

Punto11: Los cambios de posición REP hacia longitudes de onda más cortas se encuentran ligeramente concentrado hacia los intervalos 0-2 y 22-30 m. En estos mismos intervalos se observa la disminución de los valores en los índices de vegetación.

Punto13: Durante esta transecta los puntos no muestran una variación evidente en los índices de vegetación calculados, al igual que en los cambios en la posición del REP.

Punto14: Se observa una ligera tendencia en el cambio en el REP hacia longitudes de onda más corta hacia los dos primeros metros de la transecta y el metro 20. Los índices de vegetación no muestran una tendencia clara, sin

embargo, el índice NDVI3 muestra una disminución en dos primeros metros de la transecta y el metro 20.

Punto15: En este punto se mantiene una tendencia a índices bajos, con algunos picos de mayor. El cambio en la posición de REP muestra algunos punto de mayor longitud de onda que sobre salen en los metros 18 y 24, los cuales corresponden a los puntos de mayor valor en los índice de vegetación NDVI3, NDVI4.

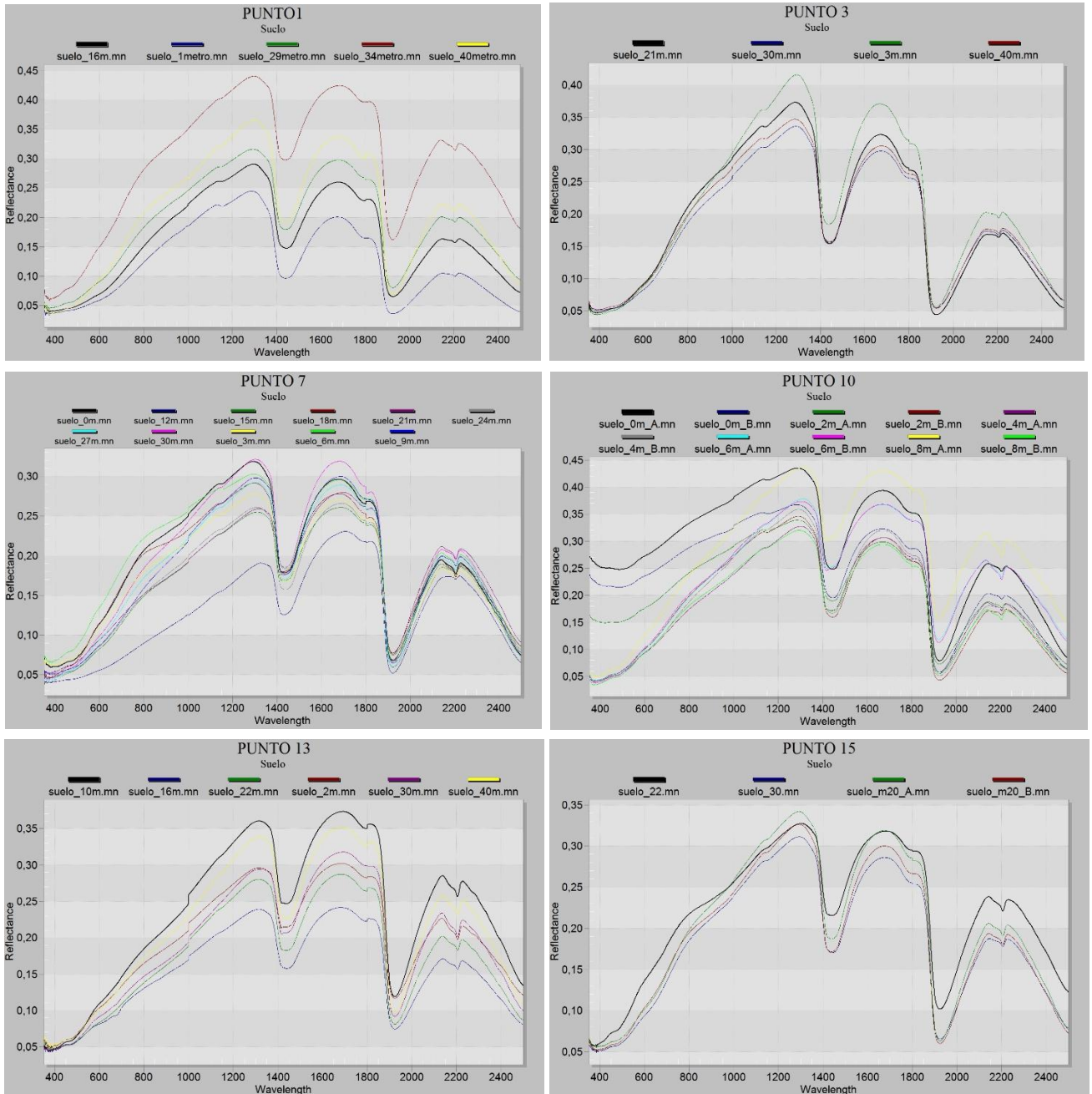
A pesar de que la superficie está cubierta de vegetación (pastos), se tomaron algunas mediciones en el suelo (Figura 61). En general el suelo muestra una coloración marrón oscuro con parches de color negro evidenciando la cantidad de materia orgánica presente. La medición se obtuvo luego de realizar una ligera limpieza para despojar la cantidad de materia vegetal.

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo del marco teórico con respecto al comportamiento espectral del suelo, se puede inferir que los suelos en general al momento de la toma de los datos cuentan con un alto contenido de humedad, el cual se evidencia por los picos pronunciados de absorción en las longitudes de onda de 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

En términos generales se puede observar una homogeneidad de suelos, sin embargo se puede interpretar en algunos casos una variación en la granulometría, indicando mayores o menores contenidos de limo y arcilla.

El tamaño de las partículas que componen el suelo se puede inferir a partir del comportamiento de la firma espectral entre las longitudes de onda de 0.4 y 1.0  $\mu\text{m}$ .

**Figura 61. Grafica de firmas espectrales del suelo tomadas en algunos puntos de las transectas muestreadas.**



## 7.6 ANÁLISIS ESPECTRAL

### 7.6.1 Extracción de endmembers

Para determinar las características espectrales de la imagen se usa el método de extracción de endmembers. Los endmembers son espectros escogidos para representar los materiales de la superficie en una imagen espectral. Los endmembers que se representan en valores de reflectancia aumentan las posibilidades de mejores resultados durante la exploración de la imagen.

El método SMACC (Sequential Maximun Angles Convex Cone) disponible en ENVI, es una herramienta que encuentra endmembers y su abundancia dentro de una imagen satelital.

Las imágenes Aster fueron empleadas para identificar los tipos de materiales dispuestos en la superficie analizando las firmas espectrales de cada pixel. Se extrajeron endmembers para determinar su abundancia dentro de los polígonos Guejar y LlanoSur.

En el polígono LlanoSur se identificaron endmembers que poseen la mayor abundancia dentro del área. Estos endmembers corresponden a firmas espectrales de vegetación con variaciones en sus picos en las longitudes de onda del rojo y el NIR, a partir de esto se calculó los NDVI aproximados para estas clases.

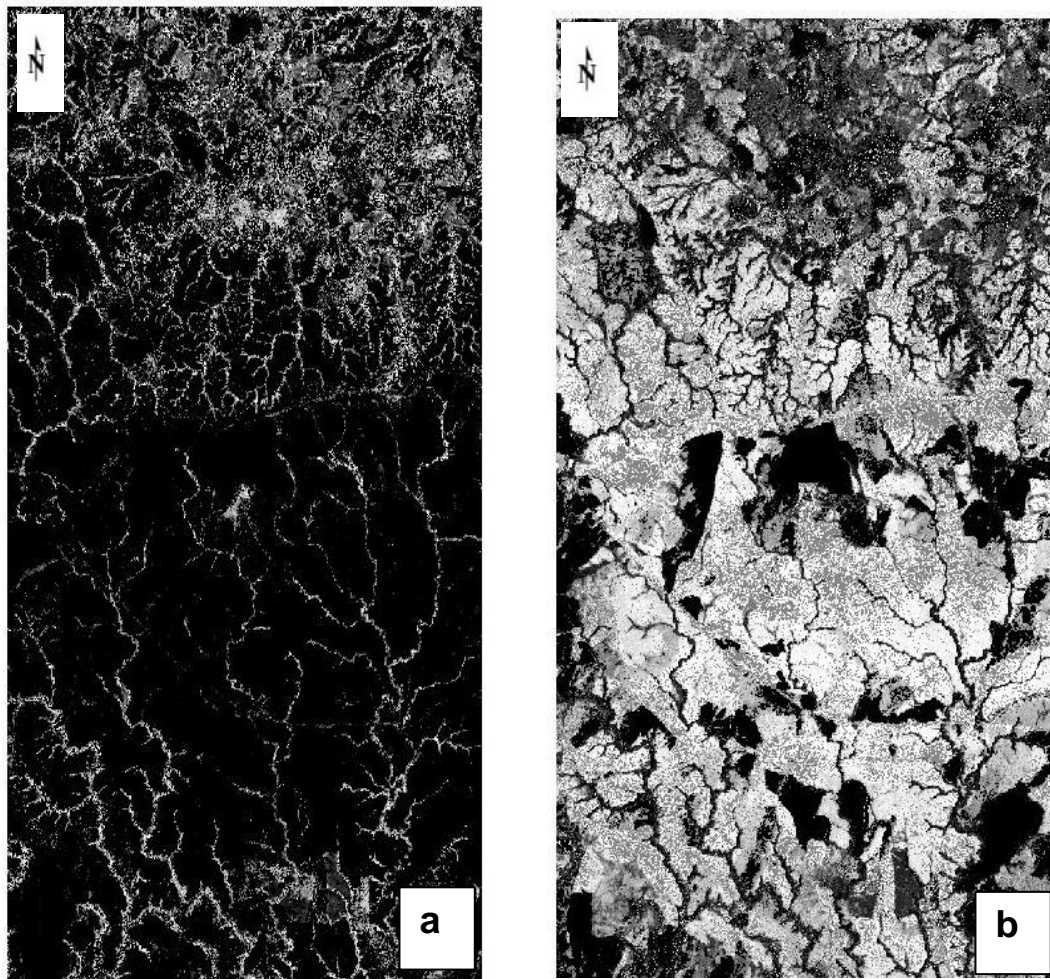
La Figura 62 muestra un mosaico del polígono LlanoSur, exponiendo la abundancia de los endmembers, donde el color negro indica un porcentaje nulo en el contenido de la firmas espectral dentro del pixel, aumentando el porcentaje hacia colores más claros, siendo el blanco un contenido casi del 100% de la firma espectral en el pixel.

La Figura 62a muestra la abundancia de la firma espectral de la vegetación que posee un índice de vegetación NDVI de 0.75, lo cual indica que corresponde a una vegetación abundante y/o vigorosa. Este tipo de vegetación se encuentra

concentrada en los bosques de galería presentes en las líneas de drenaje, al igual este tipo de cobertura se encuentra concentrada hacia la parte norte del polígono.

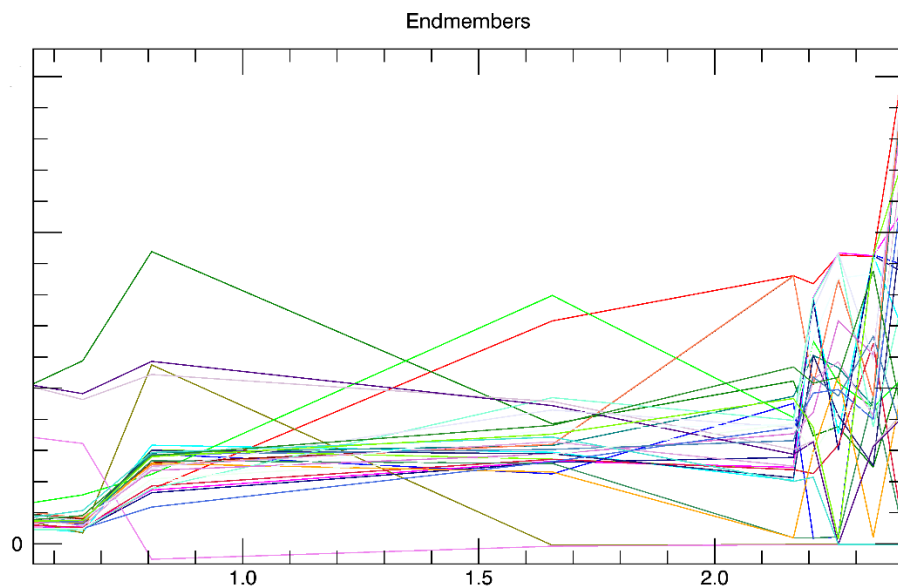
La figura 62b representa un tipo de cobertura correspondiente a vegetación poco sana o disminuida con un índice de vegetación NDVI de 0.6. Este tipo de cobertura cubre la mayor parte del área albergada por el polígono LlanoSur.

**Figura 62. Distribución de endmembers con mayor presencia dentro del polígonos LlanoSur.**



Para el polígono Guejar se extrajeron 30 endmembers (Figura 63), para identificar la abundancia relativa de cada uno de ellos. El grupo de endmembers determinó que el área está cubierta por vegetación casi en su totalidad, con algunas variaciones en el contenido y calidad de la vegetación.

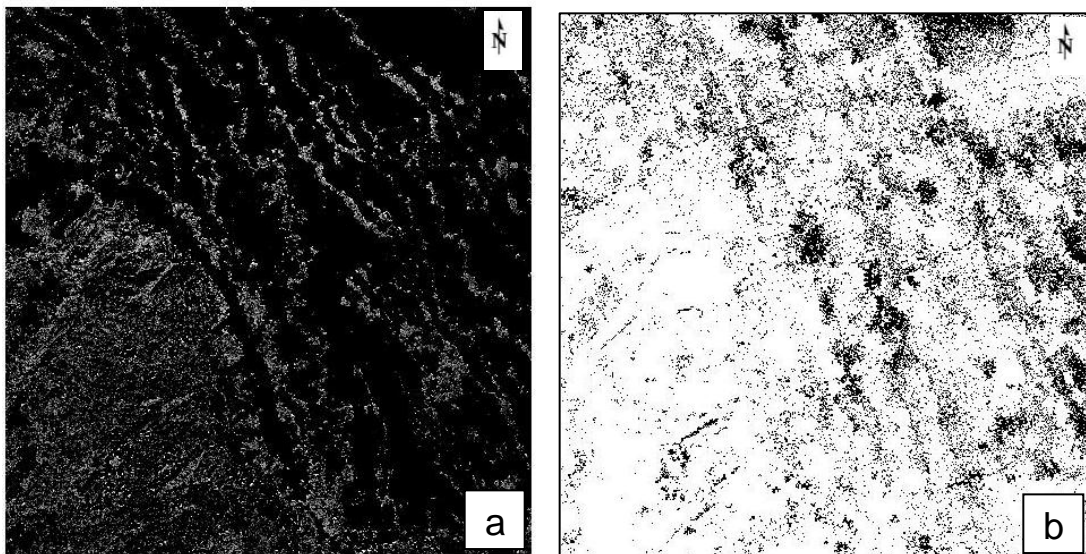
**Figura 63. Endmembers extraídos de la imagen Aster del polígono Guejar. Las firmas espectrales corresponden en su mayoría a vegetación.**



La Figura 64(a) muestra el polígono Guejar y la abundancia relativa del endmember correspondiente a vegetación sana y/o vigorosa que posee un índice de vegetación NDVI de 0.93, la cual se observa concentrada en las líneas de drenajes paralelas las cuales se poseen una cubierta de bosques de galería. Esta vegetación también se encuentra en abundancia hacia la parte sur-oeste del polígono donde se encuentra la zona montañosa donde existe la presencia vegetación más desarrollada y diversidad de especies vegetales.

La Figura 64 (b) muestra la distribución de vegetación cubriendo el mayor porcentaje del área. Este tipo de vegetación posee un índice de vegetación NDVI de 0.71, y no posee un patrón de concentración en el área.

**Figura 64. Distribución de endmembers con mayor abundancia dentro del polígono Guejar**



### 7.6.2 Clasificación SAM

Las principales alteraciones observadas en la vegetación sometida a algún tipo de estrés se basan en las propiedades espectrales de la vegetación en la región del visible, las cuales son alteradas, el estrés también produce cambios profundos en la región del NIR y SWIR. En la región del SWIR la reflectancia tiende a aumentar debido al desequilibrio hídrico foliar, y en la región del NIR, la reflectancia tiende a

disminuir en función de las consecuentes modificaciones en la estructura celular de las hojas<sup>84</sup>.

Teniendo en cuenta las anteriores características se tomaron firmas espectrales a partir de los píxeles de las imágenes Aster (9 bandas VIS-SWIR), dentro y fuera de los puntos donde fueron obtenidos datos anómalos en el contenido de gases en el suelo. La vegetación de la zona es de tipo pastos y rastrojos destinados a la ganadería.

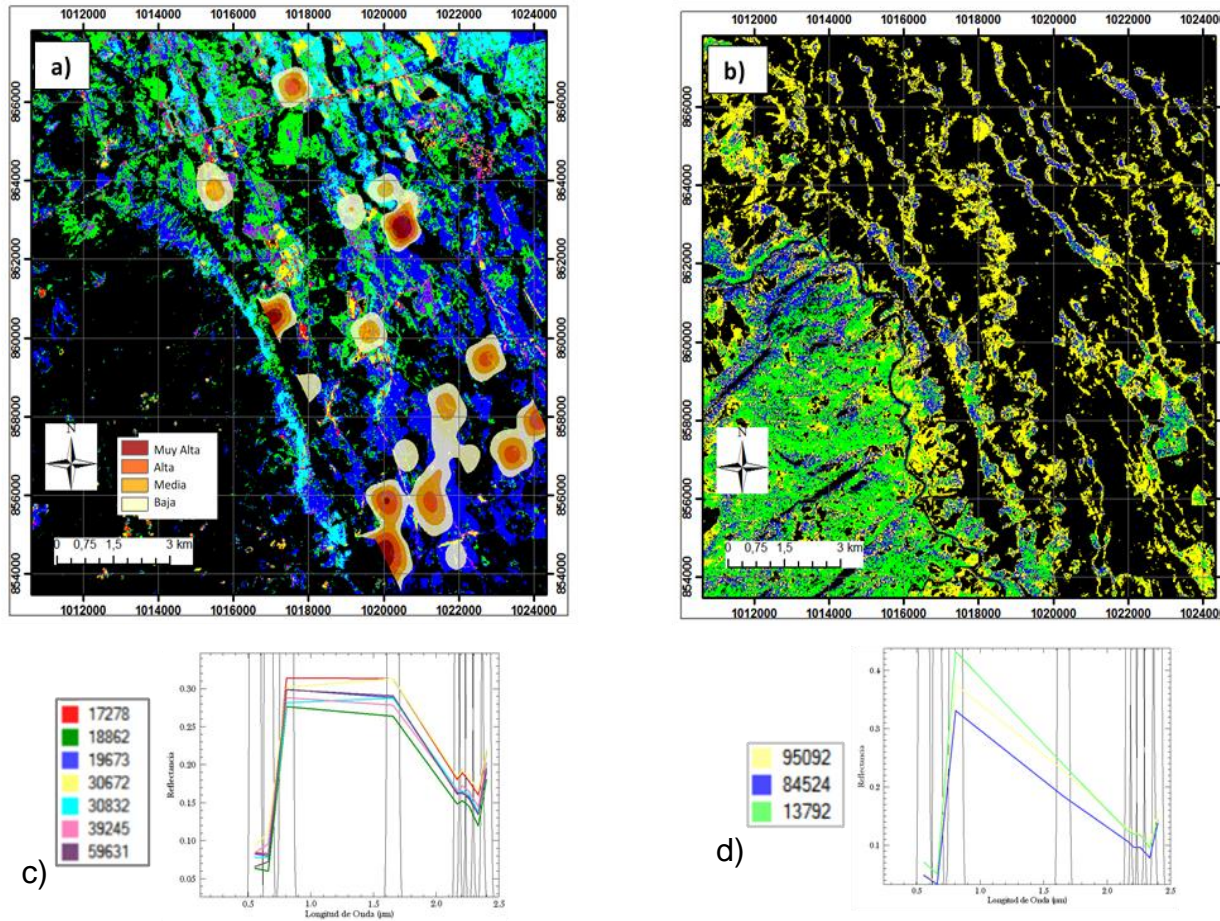
El análisis de espectros posibilita la generación de una biblioteca espectral de áreas con vegetación disminuida o estresada potencialmente afectada por las migraciones gaseosas. A partir de la librería espectral se extraen las firmas que pertenezcan a la vegetación estresada o “disminuida” para llevar a cabo la clasificación espectral de los píxeles por medio de métodos supervisados como la clasificación SAM (Spectral Angle Mapper), la cual está basada en el uso de un ángulo n-dimensional para que coincida un píxel con un espectro de referencia. El algoritmo determina la similitud entre dos espectros calculando el ángulo entre el espectro y tratándolos como si fueran un vector en el espacio con dimensionalidad igual al número de bandas.

En el polígono Guejar se seleccionaron firmas espectrales de vegetación estresada o correspondiente a zonas con disminución en la vegetación (Figura 65c) para realizar una clasificación y exponer las áreas con menor vigor vegetal (Figura 65a). De la misma manera se toman firmas espectrales de vegetación sana (Figura 65d), para generar una imagen de 3 clases de vegetación sana (Figura 65b).

---

<sup>84</sup> Almeida, T.I.R., De Souza Filho, C.R., 2004. Principal Component Analysis Applied to Feature-Oriented Band Ratios of Hyperspectral Data; A tool for Vegetation Studies. International Journal of Remote Sensing. Inglaterra, 25 (22): p 5505-5024

Figura 65. Clasificación supervisada por el método SAM de la imagen ASTER IMG\_1 del área Guejar, a) imagen clasificada a partir de las firmas espectrales de vegetación estresada (7 clases), b) imagen clasificada a partir de firmas espectrales de vegetación sana (3 clases).



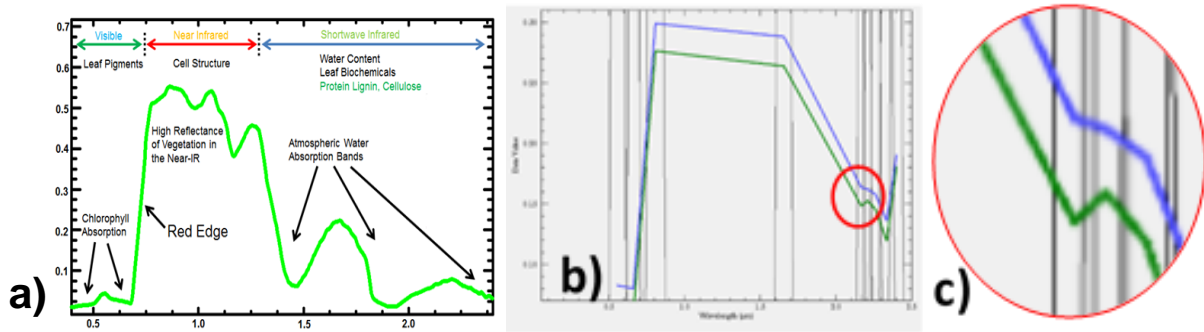
Como se ha expuesto anteriormente el uso del suelo en los llanos está enfocado en el desarrollo de ganadería extensiva, por lo que el suelo está cubierto en su mayor porcentaje por pastos cortos.

Esto se evidencia en el resultado de la imagen clasificada con firmas espectrales de vegetación estresada o de baja densidad, es decir, que el cubrimiento de este tipo de vegetación se encuentra extendido casi que en la totalidad del área a excepción de las zonas montañosas o las franjas alineadas correspondientes a los drenajes que contiene bosques de galería.

A pesar de que la imagen posee una clasificación de siete familias de espectros, se evidencia una marcada tendencia de las clases azul y verde. La clase azul está distribuida hacia la parte sur del área, esta distribución coincide visualmente con el mapeo de las mayores anomalías de gases determinadas en el área.

Comparando las dos firmas espectrales, la firma verde presenta un pico de absorción en la banda 5 más pronunciado que la firma espectral azul, esta banda corresponde a uno de los rangos de absorción de agua de la vegetación, esto quiere decir que el estrés en la vegetación es mayor en la zona clasificada por la firma espectral azul (Figura 66).

**Figura 66. a) Firma espectral de la vegetación mostrando sus picos de absorción característicos, b) firmas espectrales extraídas de la imagen de vegetación estresada, c) detalle de pico de absorción presentes en la firma de vegetación extraídas.**



De igual manera la imagen se clasificó según las firmas espectrales de la vegetación con vigor, generándose una imagen de 3 clases espectrales (Figura 61b).

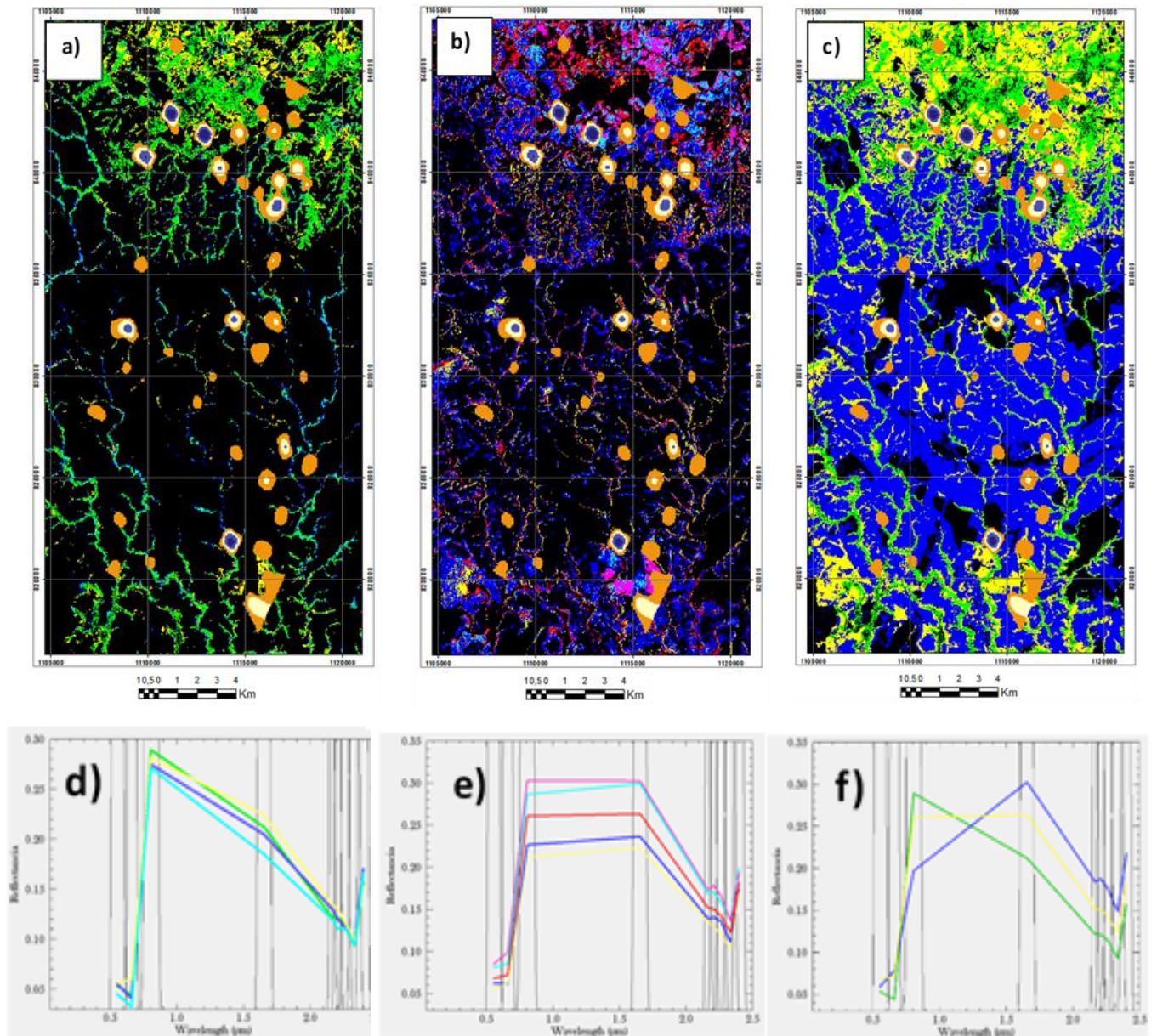
El polígono correspondiente al área LlanoSur fue procesado de la misma manera con una imagen Aster (9 bandas). En la Figura 67 se observan tres clasificaciones supervisadas por el método SAM, sobrepuesta se encuentra la distribución de las anomalías de gases. Para la primera clasificación (Figura 67a) tres firmas espectrales correspondientes a vegetación vigorosa o densa fueron seleccionadas. El color negro corresponde a zonas que no pudieron ser clasificadas con las tres firmas.

La vegetación sana se encuentra distribuida a lo largo de los drenajes a través de los bosques de galerías, igualmente se evidencia claramente una zonificación de vegetación vigorosa hacia la parte norte de la imagen, en esta zona se ha determinado anteriormente que existe la presencia de un área con una mayor densidad de drenajes. La cantidad y distribución de drenajes favorecen la hidratación de la vegetación manteniéndola más sana.

La Figura 67b se generó a partir de la clasificación SAM usando cinco firmas espectrales correspondientes a vegetación estresada. Según los resultados obtenidos la vegetación estresada se encuentra distribuida alrededor de toda el área sin una zonificación evidente.

La Figura 67c es el resultado de una clasificación usando tres firmas espectrales obtenidas después de promediar las firmas espectrales de la vegetación sana, estresada y las firmas de una cobertura correspondiente a vegetación muy disminuida. A partir de esta clasificación se obtiene una clase de color negro que corresponde a zonas que han sido sometidas a quema de suelos.

Figura 67. Clasificación supervisada por el método SAM de la imagen ASTER IMG\_2 del área LlanoSur, a) imagen clasificada a partir de las firmas espectrales de vegetación sana, b) imagen clasificada a partir de firmas espectrales de vegetación estresada, c) Clasificación de tres clases de vegetación; sana, estresada y disminuida, d) firmas espectrales de vegetación sana, e) firmas espectrales de vegetación estresada, f) firmas espectrales de las coberturas representativas del área.



## **8. INTEGRACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

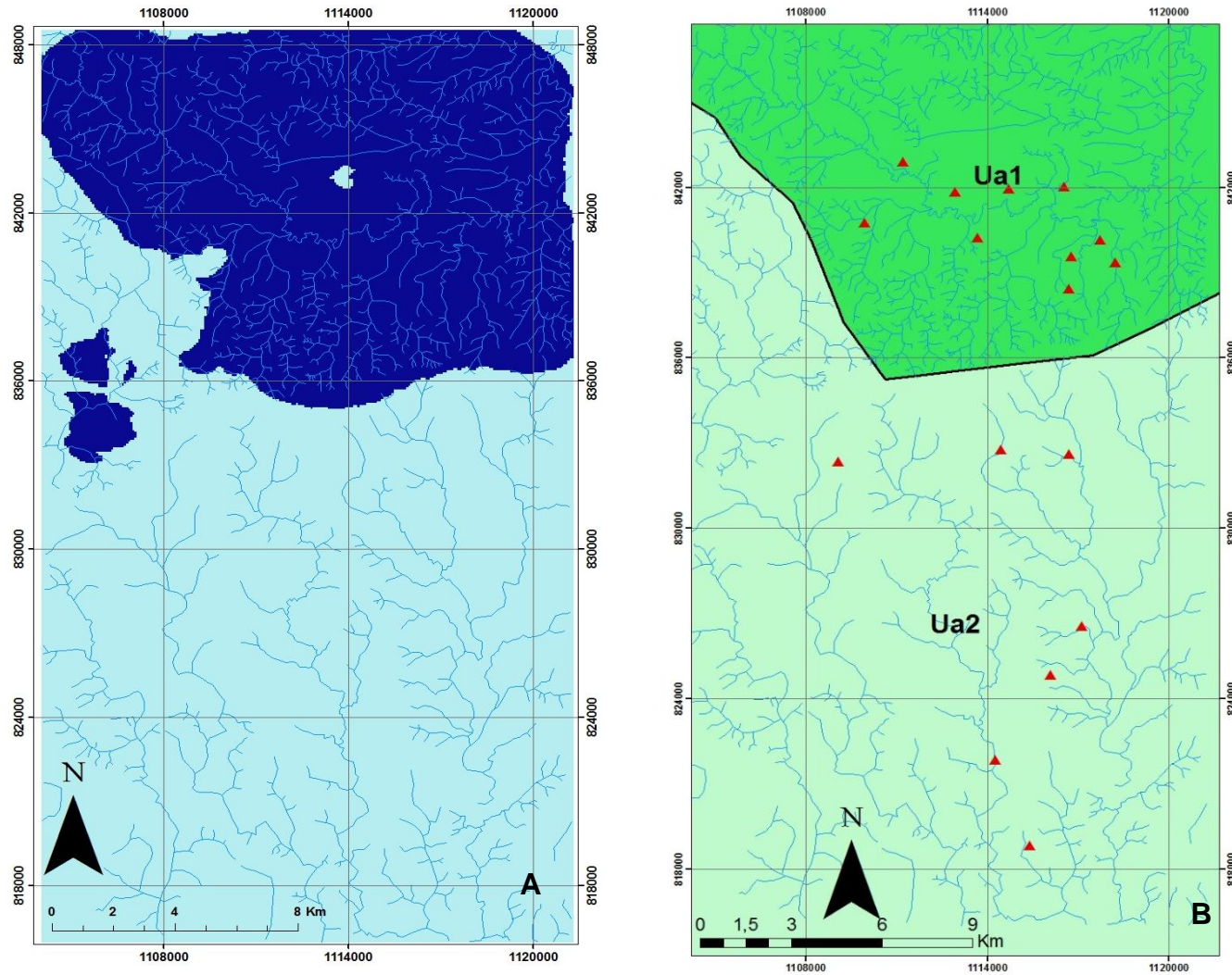
A partir de la información obtenida luego de cada uno de los procesamientos aplicados a cada uno de los polígonos (polígono Guejar y polígono LlanoSur), los resultados se integran dentro de la base de datos georeferenciada (SIG) con el fin de obtener mapas temáticos que evidencien las características relevantes halladas.

### **8.1 POLIGONO LLANOSSUR**

Inicialmente se toma el polígono LlanoSur para realizar el análisis comparativo y hallar correlaciones existentes entre cada capa.

- **Relación Drenaje-Litología-Contenido de gases:** Anteriormente se identificó la presencia de dos zonas completamente definidas como de alta y baja densidad de drenajes. La zona norte cuenta con una alta densidad de drenajes dendríticos, las cuales corresponde con los rasgos litológicos de una roca de grano fino a medio con relieve moderado con presencia de colinas, roca con resistencia uniforme, igualmente este tipo de drenaje se aprecian en zonas litológicamente alterada. La unidad se diferenció debido a los rasgos fotogeológicos. En la imagen se observa una coloración gris oscura moteada. La zona sur clasificada como de baja densidad de drenaje corresponde a una zona de planicies compuestas por unos conglomerados y areniscas poco consolidadas con matriz ferruginosa y arcillosa, según el mapa Geológico de Colombia a escala 1: 1000.000 generado por el Servicio Geológico Colombiano. El patrón de drenaje en esta zona presenta una tendencia sub-dendrítica con componentes paralelos, es decir, los causes principales dejan ver una tendencia paralela en dirección NW-SE (Figura 68).

Figura 68. Comparación densidad de drenajes con la distribución de unidades presentes en el área. A) Densidad de drenaje, B) Unidades geológicas presentes en el área, obtenidas a través de fotointerpretación.



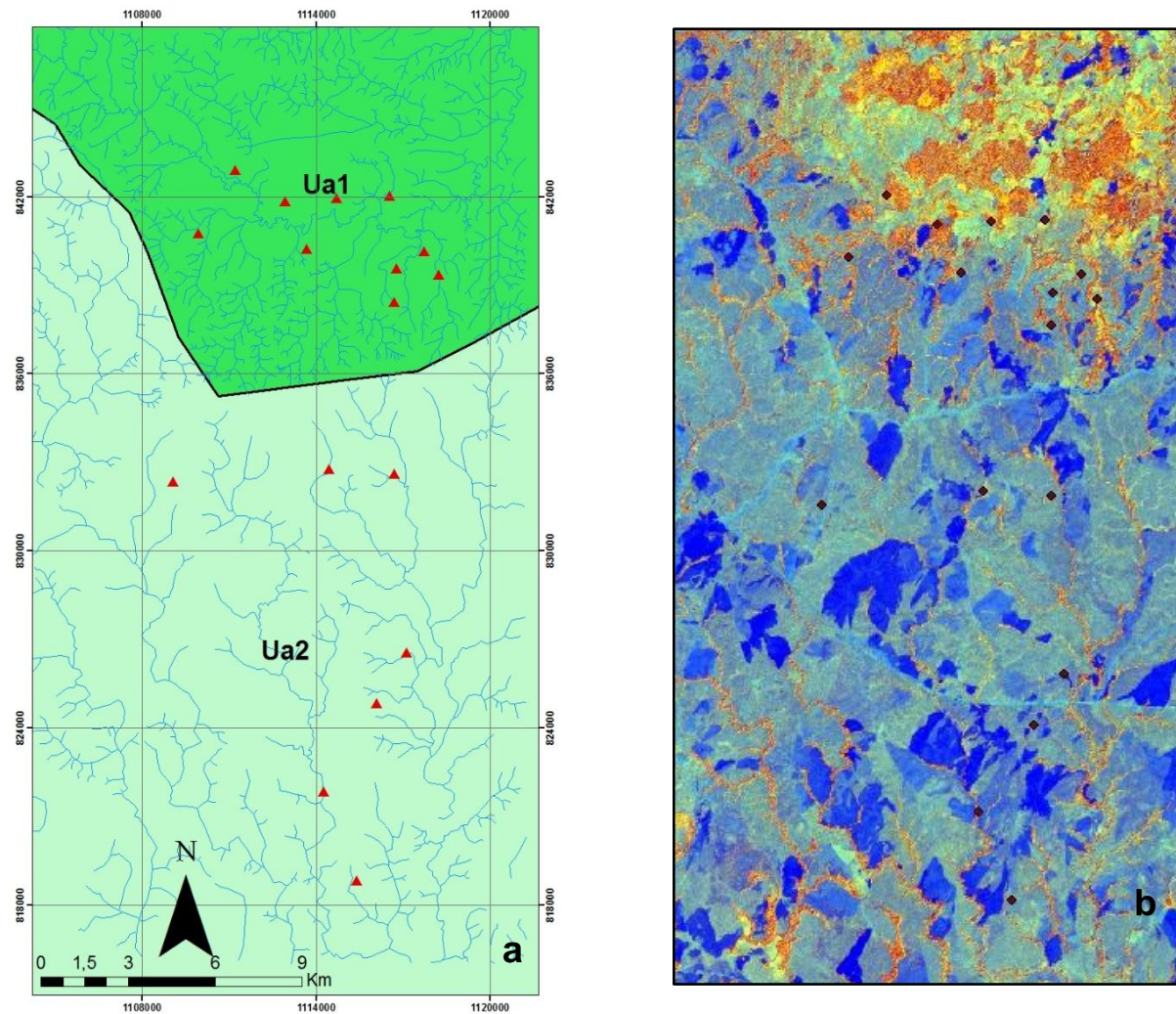
En la Figura 68 A se observa el área con la distribución de densidades de drenajes junto con la Figura 68 B, la cual corresponde al área equivalente con la distribución de la litología definida por fotointerpretación (unida Ua1 y unidad Ua2). Visualmente se identificaron las líneas de tendencia aparente de los drenajes de la zona sur, los cuales presentan una tendencia NW-SE. La imagen muestra los puntos correspondientes a las muestras de suelo con mayor contenido de gases totales, los cuales mostraron contenidos anómalos entre 10.000 a 81.000 ppmV.

La nube de puntos muestra una concentración mayor hacia la zona con mayor densidad de drenajes, la cual corresponderá a una zona de mayores pendientes. El 58% de los puntos se encuentran concentrados en esta zona.

- Relación Drenajes-Litología-Ratios: Ha sido evidente la relación estrecha existente entre la distribución y densidad de drenajes con las características litológicas. En este punto involucramos las características halladas durante la aplicación de ratios entre bandas relacionadas con las características espectrales de la vegetación y los cálculos estadísticos de los PCA de los datasets. Los cálculos de ratios y siguiente aplicación de PCA se hacen con el fin de resaltar características espectrales que reflejen el estado fenológico de la vegetación.

A partir del procedimiento sobre la imagen Landsat IMG\_8011 se obtuvo una imagen falso color RGC con los PC 1, PC 2 y PC 8 en la cual se aprecia en colores cálidos las zonas con vegetación con mayor vitalidad (menor grado de estrés) las cuales se encuentran concentrados a lo largo de las líneas de drenajes y en la parte norte de la imagen, donde existe un cambio litológico. La disminución en la calidad o el cubrimiento vegetal se ve reflejado en el cambio de coloración hacia colores fríos (Figura 69).

Figura 69. A) Distribución de drenajes y unidades litológicas mostrando la tendencia de lineamiento de los drenajes, los triángulos rojos representan los puntos con mayor contenido de gases en suelo b) Aplicación de PCA sobre los ratios calculados sobre la imagen Landsat IMG\_8011.



La nube de puntos correspondientes a altos contenidos de gases que se encuentran relativamente concentrados hacia el norte no coincide con las áreas con vegetación vigorosa, sin embargo los puntos mantiene una tendencia de aparición sobre las líneas de drenaje.

Con este proceso se ha evidenciado zonas con alto contraste de coloraciones frías que corresponden a las zonas donde se han llevado a cabo quemas de suelo y cultivos de pastos, técnica que ha sido usada por muchos años para recuperación de suelo.

- Relación Temperatura de Superficie-Contenido de gases:

Los algoritmos aplicados para el cálculo de temperatura de superficie (LST) se corrieron sobre tres imágenes Landsat las cuales fueron adquiridas en los años 1988, 1997 y 2001. Las tres imágenes obtenidas mantienen una tendencia de concentración de temperaturas menores hacia la parte norte del polígono LlanoSur, donde hay mayor cobertura vegetal y sobre las líneas de drenajes, las cuales se encuentran cubiertas por bosque de galerías.

La mitad sur del polígono corresponde a una zona conformada por planicies dedicadas principalmente a la ganadera extensiva. En esta zona es donde se concentran las mayores temperaturas.

Se evidencian manchas las cuales corresponden a zonas con altas temperaturas que han sido generadas a partir de la práctica de quema para recuperación de suelos que son utilizados para los nuevos cultivos de pastos. La imagen Landsat IMG\_1062 obtenida en el mes de marzo de 2001 muestra una amplia zona con altas temperaturas en la parte central del área del polígono LlanoSur producido igualmente por quema de suelos. A partir de esta fecha las imágenes satelitales

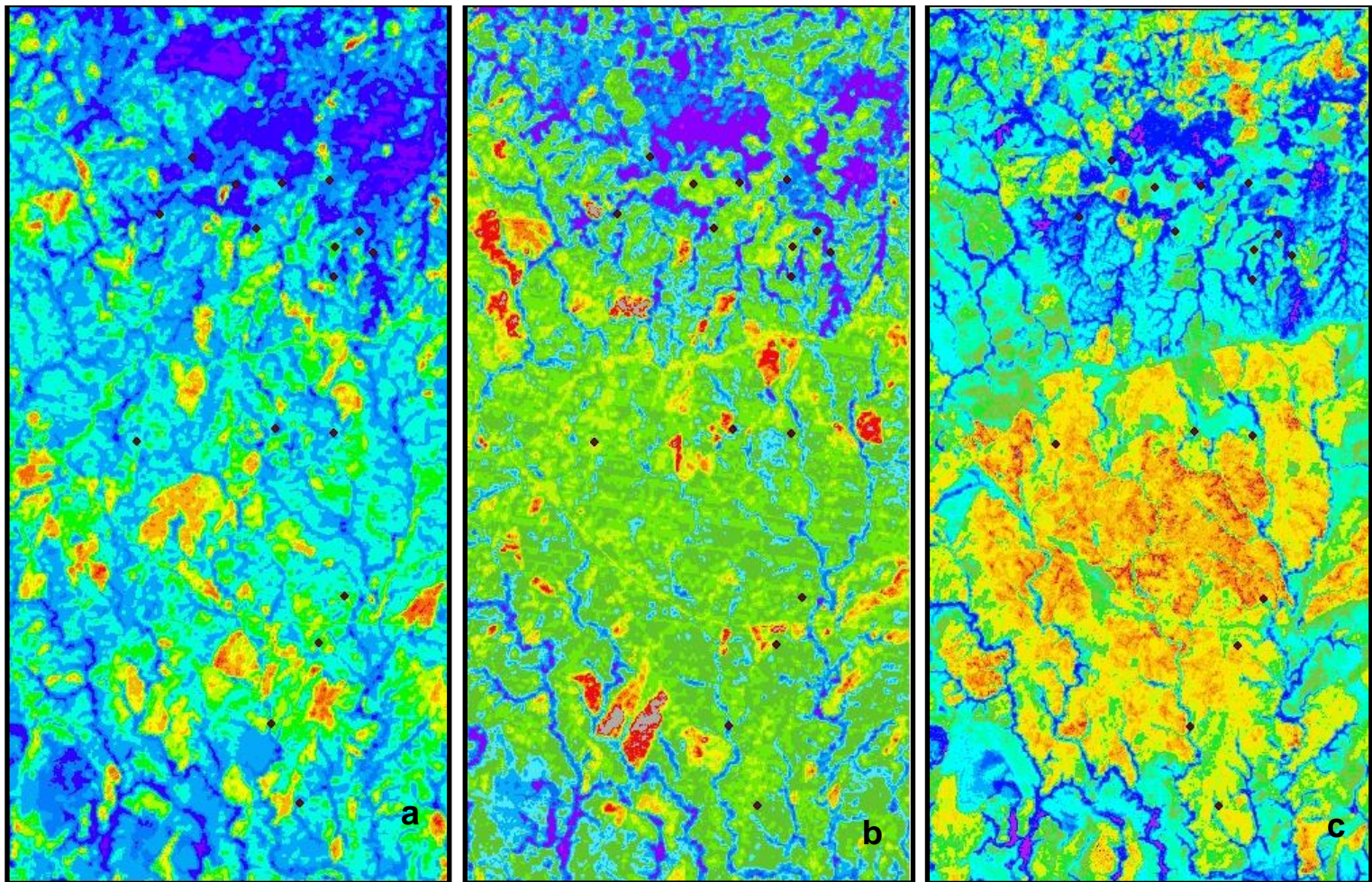
muestran un crecimiento progresivo en el cultivo sistemático de *Elaeis Guineensis*, comúnmente llamada Palma Africana o palma Aceitera.

Las temperaturas obtenidas varían entre 298.67-320 K para la imagen IMG\_8011 adquirida en el año 1988; 295.29-308 K para la imagen IMG\_7347 adquirida en el año 1997 y para la IMG\_1062 adquirida en el año 2001 los rangos de temperatura van desde los 297.42-326 K, siendo esta última la que presenta un área mayor con rangos de temperatura más altos.

La nube de puntos de altos contenidos de gases se encuentra dentro de la zona que presenta menores temperaturas, sin embargo su posición se puede establecer dentro de áreas con temperaturas medias.

La Figura 70 muestra las imágenes según su fecha de adquisición desde la más antigua a la más reciente, en las que sus colores cálidos (rojos, naranjas, amarillos) corresponden a las zonas de mayor temperatura, mientras que las zonas con menores temperaturas se encuentran representadas por colores verdes-azul-violeta.

Figura 70. Calculo de temperatura de superficie (LST) en imágenes Landsat, a) Imagen Landsat IMG\_8011, b) Imagen IMG\_7347, c) Imagen IMG\_1062.



- Relación Clasificación espectral-Litología-contenido de gases:

A partir de las imágenes Aster se extrajeron endmembers correspondientes a vegetación cuya firma espectral se mostrara saludable, vegetación estresada, y zonas con vegetación e influencia de suelos, es decir, zonas con bajo contenido vegetal. A partir de esta serie de endmembers se realiza un promedio por cada tipo de firma espectral, para finalmente definir 3 endmembers y generar una clasificación supervisada SAM.

Como en los anteriores puntos de correlación de imágenes, se obtuvo espectralmente que la zona norte de la imagen presenta vegetación con mejores condiciones en su desarrollo, mezclada con vegetación que presenta moderado nivel de estrés.

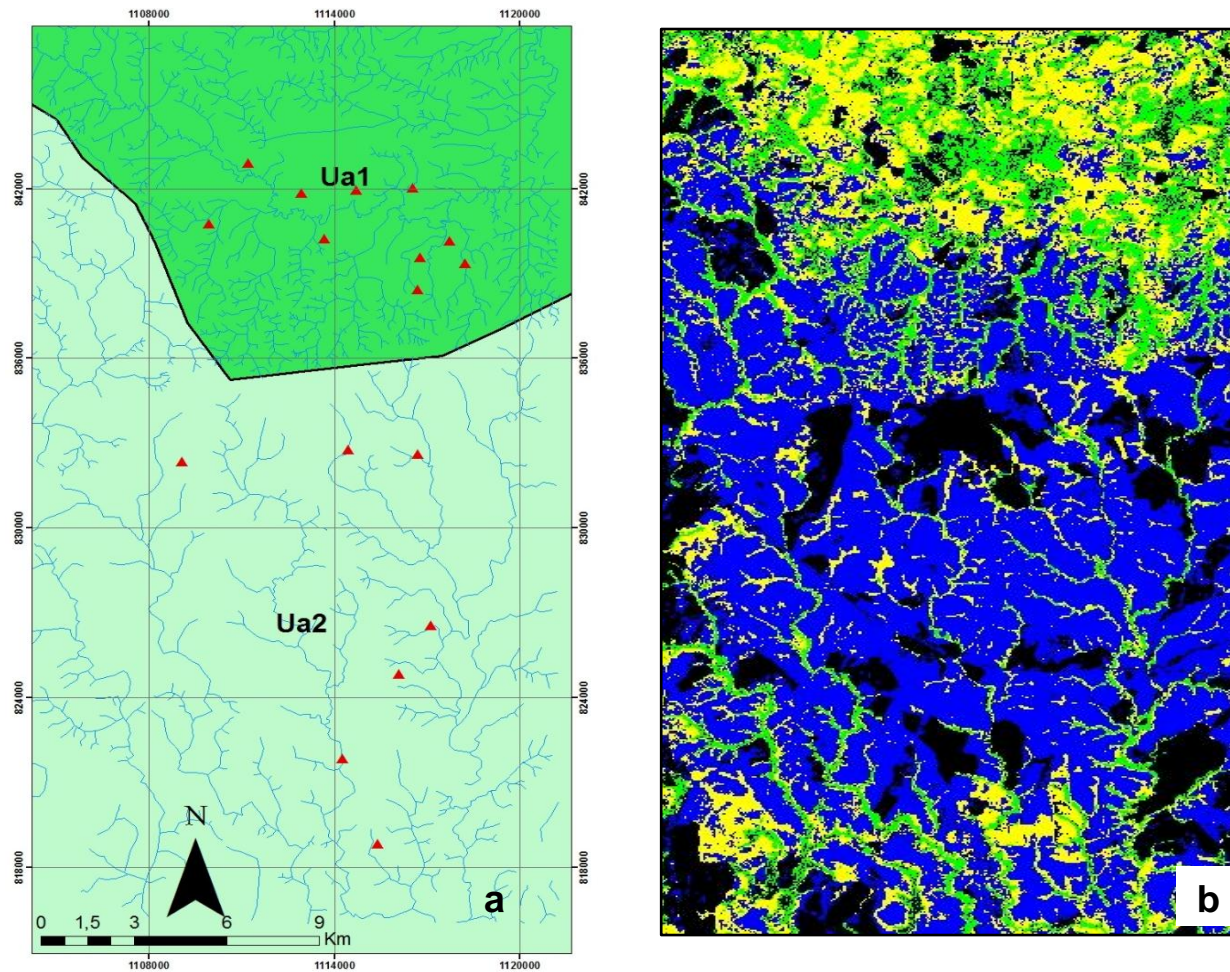
Los puntos de altos contenido de gases se encuentran dispersos dentro del área donde se encuentra la vegetación sana con mezclas de vegetación estresada. En este punto no es contundente la presencia de los contenidos de gases en alguna de las dos categorías.

Igualmente se identifica que en la parte sur de la imagen la vegetación no se desarrolla óptimamente, la disminución y es estrés es ampliamente marcado.

Durante la clasificación se genera una clase que no pertenece a ninguna de las tres categorías, dentro de esta clase se incluyen las áreas que ha sido sometidas a quemas de suelos.

En la Figura 71 se observa la distribución de litologías y los puntos con altos contenidos de gases (71 a), junto con la imagen originada a partir de la clasificación SAM donde se observa una clase de color verde que corresponde a la vegetación sana, una clase de color amarillo la cual corresponde a la vegetación estresada, con una coloración azul encontramos la clase más predominante de la imagen que corresponde a zonas con vegetación muy estresada y mezclada con suelos.

Figura 71. Comparación contenido de gases vs clasificación, a) Geología del área y distribución de puntos con alto contenido de gases; b) Resultado de la clasificación de la imagen a partir de la extracción de endmembers de la vegetación.



## 8.2 POLIGONO GUEJAR

El polígono del área Guejar donde se realizó el muestreo para cálculo de contenido de gases tiene un área aproximada de 115 Km<sup>2</sup>.

La extracción de drenajes a partir del análisis visual de la imagen Rapideye muestra un patrón de drenaje paralelo con una marcada tendencia NW-SE, la cual coincide con el lineamiento del río Ariari<sup>85</sup> (Figura 72), el cual se define como falla profunda que penetra hasta el manto superior y que se manifiesta en superficie por un sinnúmero de indicios geomorfológicos, estructurales, de sedimentación, magmáticos y geofísicos<sup>86</sup>. Estos lineamientos se hacen evidentes por el control regional que se ejerce sobre el drenaje.

Los drenajes no muestran particularidades en su distribución en el área, es decir, no hay concentraciones evidentes de las líneas de drenaje.

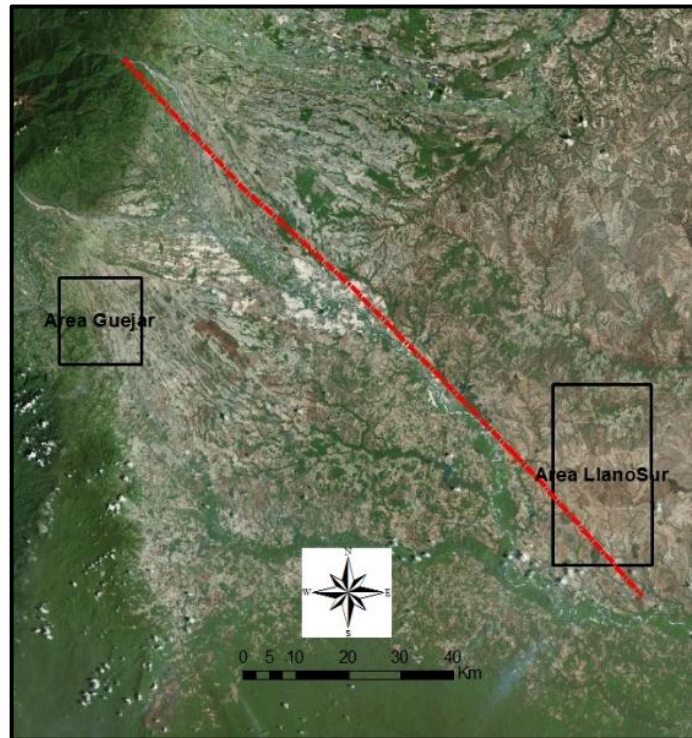
El muestreo de suelos para cálculo de concentración total de gases se llevó a cabo basado en una grilla de 500 m aproximadamente, donde se obtuvieron un total de 314 muestras. En la Figura 69a se observa la distribución de los 24 puntos de mayor concentración de gases, los cuales varían entre los valores de 148100 a 10975 ppmV de gases totales. La nube de puntos se encuentra concentrada hacia la parte Sur-Este del área con un 62% de los puntos con concentraciones de gases consideradas anómalas.

---

<sup>85</sup> Ujueta, G., Op. Cit

<sup>86</sup> Jain, V., E., 1980. Geotectónica General. Editorial Mir, Parte I pag 358, Parte II, pag 304. Moscú.

**Figura 72. Lineamiento del Rio Ariari, esta estructura controla los patrones de drenaje a nivel local y regional.**



El muestreo se realizó en suelos procedentes de la Unidad Q-ca que corresponde a depósitos de abanico aluvial y abanicos coluviales. El 92.68% del muestreo se realizó sobre esta unidad, mientras que el restante 7.32% se realizó sobre suelos de la unidad litológica compuesta por shales, calizas, areniscas, cherts y fosforitas<sup>87</sup>.

A partir de la imagen Aster se extrajeron las firmas espectrales de la vegetación presente en el área donde se encuentra la mayor concentración de puntos con altos contenido de gases totales. Se obtuvieron firmas espectrales de vegetación estresada con variaciones en la banda 5, en la cual se observa un pico de

---

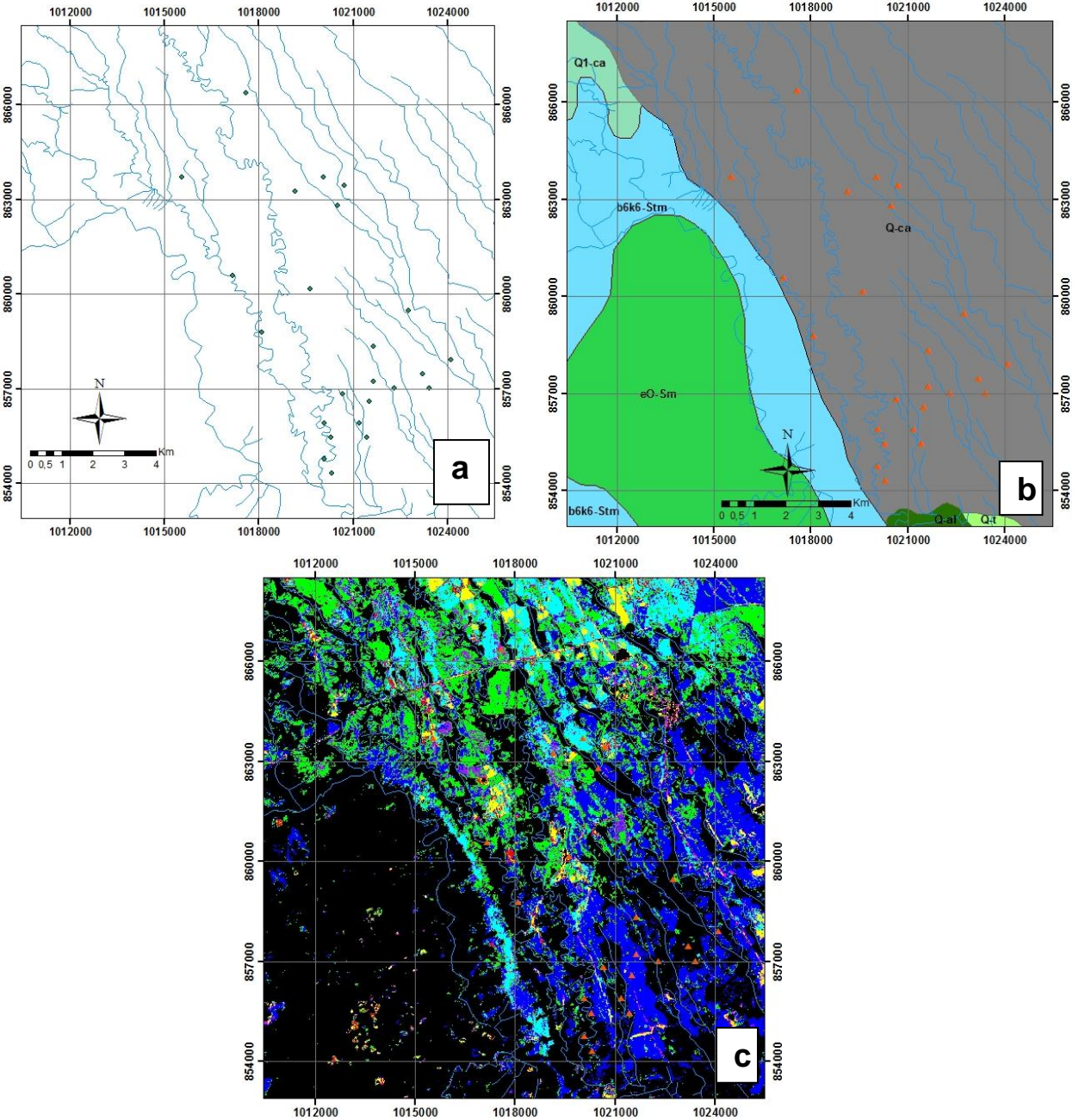
<sup>87</sup> Mapa Geológico de Colombia 2015 a escala 1:1000000 generado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC)

absorción del agua, indicando mayor estrés en la vegetación que presenta menor contenido de agua en su estructura.

Se promediaron las firmas espectrales según sus características para obtener enmembers para ser utilizados para realizar una clasificación supervisada SAM. A partir de esta clasificación se puede observar que la vegetación estresada que presenta menor contenido de agua en su estructura, se encuentra concentrada hacia la parte sur-este de la imagen, lo que indica una correlación existente entre la vegetación mayormente estresada con el aumento de puntos con concentraciones anormales de gases en el suelo.

La imagen 73b muestra la distribución litológica a partir de fotogeología, y se observa la imagen obtenida luego de ser sometida a la clasificación supervisada a partir de las firmas espectrales de la vegetación (Figura 73c).

**Figura 73. Relación entre los parámetros encontrados en la zona Guejar, a) distribución de drenajes y puntos con alto contenido de gases; b) distribución de unidades litológicas; c) resultado de la clasificación a partir de endmembers de vegetación con estrés.**



## 9. CONCLUSIONES

- ✓ La metodología empleada estuvo basada en trabajos previos realizados en otras áreas por diferentes autores. Esta metodología sigue la secuencia de preparación de las imágenes (pre-procesamiento), para luego aplicar procesos de extracción de información espectral (procesamiento). Existe una gran variedad de procesamientos que se pueden llevar a cabo en una imagen satelital, sin embargo, la selección de estos depende del propósito del análisis y las condiciones específicas de cada área de interés.
- ✓ El análisis espectral de las imágenes, la literatura y la evidencia en campo indica que la principal cobertura en los polígonos Guejar y LlanoSur corresponde a vegetación, lo que descarta zonas con suelos descubiertos en los que se pueda identificar los minerales indicadores de alteración por hidrocarburos. El método de extracción de endmembers confirma la ausencia de suelos desnudos.
- ✓ Debido a la homogeneidad litológica, las microfiltraciones de gases en los suelos dentro del polígono LlanoSur no se encuentran controladas por el tipo de roca, en cambio, existe una relación entre el aumento de la densidad de drenajes con el número de puntos con alto contenido de gases totales.
- ✓ Los cálculos de temperatura solo se realizaron en el área del polígono LlanoSur, teniendo en cuenta que es un área mayor y se pudo encontrar una serie de imágenes Landsat con el mínimo contenido de nubosidad para disminuir los errores de cálculo.
- ✓ Con los cálculos de temperatura superficial se constató la existencia de suelos quemados, los cuales mantiene las temperaturas más altas en todas las imágenes. Estas zonas están distribuidas con mayor intensidad en la zona de drenajes de baja densidad, es decir, en las zonas planas destinadas principalmente a la ganadería y agricultura, donde son usuales

las prácticas de quema de suelo para su restauración. En la zona con mayor densidad de drenajes se puede discriminar algunos sectores con mayores temperaturas.

- ✓ El aumento en la temperatura está relacionado con la disminución en la capa vegetal del área.
- ✓ Para el polígono Guejar la clasificación por el método SAM resulto muy efectivo para discriminar zonas de alto estrés en la vegetación, las cuales se pueden correlacionar con las anomalías gasométricas. Esto se logró extrayendo firmas de la vegetación estresada en las imágenes ASTER en los puntos de anomalía de gases. Sin embargo para el polígono LlanoSur esta relación no es muy clara debido a que en este caso la zona con alta migración de gases se encuentra relacionado con la zona de mayor densidad de drenaje, la cual igualmente presenta mayor vigor en la vegetación debido a la hidratación del suelo.
- ✓ Las combinaciones realizadas para obtener imágenes falso color RGB con las bandas obtenidas luego de aplicar PCA sobre los ratios, permiten discriminar la cobertura vegetal con mayor vigor (colores brillantes y cálidos), y las zonas con vegetación estresada. Para algunas imágenes y combinaciones la discriminación es completamente clara, mientras que para otros existen dificultades para determinar las zonas con diferencias en la respuesta espectral de la vegetación.
- ✓ Las firmas tomadas con espectrómetro en campo fueron sometidas a un suavizado para aplicar sobre ellas índices de vegetación. Estos índices mostraron en su mayoría, una variación sin ningún patrón, sin embargo en el punto 1, por ejemplo, se ve claramente la disminución de índices en el punto interno de la anomalía, esto se evidencia igualmente con el cambio de posición en la banda red edge, REP, la cual se mueve hacia longitudes de onda más corta en zonas con vegetación estresada.
- ✓ Las firmas espectrales de los suelo sugieren que estos presentan altos contenidos de humedad y materia orgánica.

- ✓ El alto nivel de alteración de los suelos debido a su uso enmascara cualquier tipo de alteración procedente de microfiltraciones de hidrocarburos o cualquier otro proceso interno.

## 10. RECOMENDACIONES

- Realizar análisis espectrales con imágenes que complemente una mejor resolución espacial y espectral como las WoldView 3. Estas imágenes poseen 8 bandas en el infrarrojo y 8 bandas en la región SWIR con resoluciones espaciales de 1.4 m y 3.7 m respectivamente, además posee la banda Red Edge.
- Identificar por medio de espectrometría de campo las características espectrales a través de un mallado detallado y un mayor número de puntos. Con esto se caracterizaría con mayor detalle el comportamiento espectral de la zona.
- Aplicar las técnicas en otras zonas de interés donde la vegetación no sea la principal cobertura, para poder poner a prueba la capacidad de las imágenes ASTER al momento de la identificación de minerales, a pesar que otros autores lo han realizado. Igualmente se pondrían a prueba las imágenes con mejor resolución espacial-espectral que se puedan adquirir.
- Llevar a cabo un muestreo más detallado de suelos para la identificación de contenido de gases y simultáneamente realizar un muestreo de las aguas de los drenajes del área para determinar su posible contenido de contaminantes relacionados con fugas de hidrocarburos.

## BIBLIOGRAFIA

Almeida T.I.R., De Souza, C. R., Juliani, C., Cardinale, F., 2009. Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect hidrothermal Alteration Facies in Epithermal High-Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. Society of Economic Geologist, Vol 16, Chapter 11, p 135-142.

Alvarado, S., Tellez, A., Pacheco, S., Rojas, N., 2010. Cartografía Geológica de la Zona Centro y Sur del Departamento del Meta Planchas 286, 287, 288, 289, 290, 307, 308 Escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minera INGEOMINAS. Bogotá.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martinez, J., 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, Bogotá.

Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Ortiz, J., 2008. Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. Geología Colombiana No. 33, 23-46.

Brooks, R., R., 1972. Geobotany and Biogeochemical in Mineral Exploration. Harper & Row, Nueva York.

Brunnschweiler, D., 1972. The Llanos, Frontier of Colombia: Environment and Changing Land Use in Meta. Michigan State University, East Lansing, Michigan.

Burrus, M., Vargas, H.M., 2011. Estudio de la Geometría de la Cuenca de los Llanos con Base en Datos Sísmicos, para el Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol S. A. Informe Técnico. AQUATERA INTERNATIONAL INC.

Vera, R., Cere, C. 1985. Sistemas de Producción Pecuaria Extensiva: Brasil, Colombia, Venezuela. Informe Final del Proyecto ETES Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia, 530 p.

Cho, M. A., Skidmore, A. K., 2006. A New Techcique For Extracting The Red Edge Position From Hyperspectral Data: The Linear Extrapolation Method. *Remote Sensing and Environment*, 101, 181-193.

Chuvieco E., 2010. *Teledetección Ambiental*, Primera edición actualizada. Editorial Planeta S.A

Curran, P., J., 1980. Multispectral Remote Sensing of Vegetation Amount. *Progress in Physical Geography*, No 4, 315-341.

Dawson, T.P., Curran, P. J, 1998. A new Technique for Interpolation Red Edge Position. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2133-3139.

De Souza Filho, C.R., Augusto, V., Oliveira, W.J., Lammoglia, T., 2008. Hydrocarbon Seepage Detection Through Geobotanic and Multi-temporal Remote Sensing: A Case study on Remanso do Fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociencias*, 38, suplemento 2, 228-243.

Diaz, L., Contreras, D., 2015. Caracterización De Los Parámetros Morfométricos, En Los Bloques Caño Sur, CPO 16, CPO 17, Río Ariari, En La Zona Llanos Sur De La Cuenca De Los Llanos Orientales, Mediante La Técnica De Modelos De Elevación Digital DEM. Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Drury, S., 2001. *Image Interpretation in Geology*. Third Edition.

Giraldo, B, Rodríguez, J., Rangel, A., Díaz, O., Gamba, N., Torres, V., Moreno, N., Tarazona, D., Naranjo, J., Rubiano, J., 2007. Soporte Geológico al Bloque Llano Sur. Ecopetrol-Instituto Colombiano de Petróleos ICP. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.

Goetz et al., 1995. Surface Temperature retrieval in a temperature grassland with multiresolution sensors. *Journal of Geophysical Research*, 100, 25397-25410.

- Gupta, R. P., Chakraborty, R., Awasthi, A., K., 2009. Satellite Data Can Cost Effectively Show Oil Field Thermal Anomalies. Oil and Gas Journal
- Gupta, R. P., Chakraborty, R., Awasthi, A., K., 2010. Model Thermal Anomalies Over Petroliferous Basins. Oil and Gas Journal. 108, 72-75.
- Guyot, G., Baret, F., 1988. Utilisation de la Haute Resolution Spectrale Pour Suivre l'état des Cpuvert Vegetaux. Proceeding Of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Object in Remote Sensing. ESA SP-287, Assois, France 279-286.
- Horler, D., N., H., Dockray, M., Barber, J., 1983. The Red Edge of Plant Leaf Reflectance. International Journal of Remote Sensing, No 4, 273-288.
- Hunt, G., R., Salisbury, J., 1970. Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks: I Silicates Minerals. Modern Geology, Vol 1, 283-300.
- Jain, V., E., 1980. Geotectónica General. Editorial Mir, Parte I pag 358, Parte II, pag 304. Moscú.
- Jensen, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment an Earth Resource Perspective. Prentice Hall.
- Khan, S., Jacobson, S., 2008. Remote Sensing and Geochemistry for Detecting Hydrocarbon Microseepage. Geological Society of America Bulletin, vol 120, 96-105.
- Leblon, B. Soil and Vegetation Optical Properties. Remote Sensing and GIS laboratory. Faculty of Forestry and Environmental Management. University of New Brunswick, Canada. [www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm](http://www.rsc.org/rsc/Volume4/Leblon/leblon.htm)
- Li, L., Ustin, S., L., Lay, M., 2005. Application of AVIRIS Data in Detection of Oil-Induced Vegetation Stress and Cover Change at Jornada, New Mexico. Remote Sensing of Environment, No. 94, 1-16.

Lillesand, T., Kiefer, R., 2004. Remote Sensing and Image interpretation. Fifth Edition.

Llewellyn, G., M., Kooistra, L., Curran, P., J., 2001. The Red Edge of soil contaminated grassland. Proceeding Eighth Int. Symp.: Physical Measurement and Signature in Remote Sensing. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing and Centre National D'Etudes Spatiales. Aussois, France, 381-386.

McCoy, R., M., 2005. Field Methods in Remote Sensing. The Guilford Press. New York, 159 p.

Meneses, P., R., Maderira, J., S., 2001. Sensoramiento Remoto: Reflectancia de Objetos Naturales. Brasilia, DF: UNB; Planaltina, 262 p.

Merton, R., 1998. Monitoring Community Hysteresis Using Spectral Shift Analysis and the Red-edge Vegetation Stress Index. AVIRIS Airhone Geosciences Workshop Proceedings, JPL Publication 97-21, NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 32-38.

Noomen, M., Van der Werff, H.M.A., Van der Meer, F.D., 2012. Spectral and Spatial Indicator of Botanical Changes Caused by Long-term hydrocarbon seepage, Ecological Informatic 8, 55-64.

Oyubdari, B., 2008. Spectral Indicators for Assessing the Effect of Hydrocarbon Leakage on Vegetation. Tesis Doctoral. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Holanda.

Petrovic, A., Khan, S.D., Chafetz, H.S., 2008. Remote Detection and Geochemical Studies for Finding Hydrocarbon-induced Alteration in Lisbon Valley, Utah. Marine and Petroleum Geology vol.25, 696-705.

Qin, Z., Karnieli, A., 2001. A Mono-Window Algorithm For Retrieving Land Surface Temperature From Landsat Tm Data And Its Application To The Israel-Egypt

Border Region. *International Journal Of Remote Sensing*, vol 22 No 18, 3719-3746.

Railyan, Y., Korobov, R., M., 1993. Red Edge Structure of Canopy Reflectance Spectra of Triticale. *Remote Sensing of Environment*, No 46, 173-182.

Ramoelo, A., Skidmore, A.K., Cho, M.A., Mathieu, R., Heitkonig, I.M.A., 2012. Regional Estimation of Savanna Grass Nitrogen Using the Red-Edge Band of the Spaceborne Rapideye Sensor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 19, 151-162.

Rangel, A., Reyes, A., Pérez, H., Molina, M., Rodríguez, J., Giraldo, B., Bernardo, L., Mogollón, L., Díaz, O., Moreno, N., 2006. Apoyo A La Evaluación De Oportunidades Exploratorias Bloque Caño Sur. Fase I. Ecopetrol-Instituto Colombiano de Petróleos ICP. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.

Rippstein, G., Escobar, G., Motta, F., 2001. Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. Cali, Colombia.

Rozenstein, O., Qin, z., 2014. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. *Sensors Open Acces*, 14, p 5768-5780. [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).

Rueda, J., P., 2011. Cálculo Preliminar De Recursos Potenciales De Arenas Bituminosas En Las Áreas De Florencia, San Vicente, Caño Sur Y Sogamoso. Ecopetrol S.A. Informe Técnico. Piedecuesta, Santander.

Salisbury, J., Walter, L., S., Vergo, N., 1991. Infrared (2.1-25 micrometer) spectra of Minerals. *Jonh Hopkins University Press*.

Saunders, D., F., Burson, K., R., Thompson, C., K., 1999. Model for Hydrocarbon Microseepage and Related Near-Surface Alteration. *AAPG*, vol 83, No 1, 17-185.

Serban, C., Maftai, C., Filip, C., 2011. Assessment of Multispectral Vegetation Indices Using Remote Sensing and Grid Computing. International Journal of Computer. 4 Vol 5, 468-475.

Schott, J. R., y Volchok, W. J., 1985. Thematic Mapper thermal infrared calibration. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51, 1351-1357.

Shi,P., Fu, B., Ninomiya, Y., Sun, J., Li, Y., 2011. Multiespectral Remote Sensing Mapping for Hydrocarbon Seepage-Induced Lithologic Anomalies in the Kuqa Foreland Basin, South Tian Shan, Journal of Asian Earth Sciences 46, 70-77.

Schumacher, D., 1996. Hydrocarbon-Induced Alteration of Soils and Sediments, en Hydrocarbon migration and its nearsurface expression: AAPG Memoir 66.

Souza, P.W.M., Paradella, W.R., 2002. Recognition of the main Geobotanical Features Along the Braganca Mangrove Coast (Brazilian Amazon Region) from LANDSAT TM and RADARSAT-1 data, Wetland Ecology and Management 10, 123-132.

Toselli, F., Bodechtel, J., 1992. Imaging Spectrometry: Fundamentals and Prospective Applications. Kluwer academic Publishers. Holanda.

Ujueta, G., 1982. Geomorfología Aplicada a la Exploración de Hidrocarburos en Tierras Planas. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo. I Simposio Bolivariano. Bogotá, Colombia.

Vargas, C., 2008. Características cuenca de los Llanos Orientales y descripción de bloques. Taller Para Empresas Precalificadas Proceso Licitatorio Proyecto Dcp – Zona Oriental. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

Vásquez, J.M., 2007. Una Metodología para la Especificación, Evaluación y Generación de Información de una Librería de Datos Multiespectrales Próximos y Remotos. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Van de Griend, A.A., 1993. On the relationship between thermal On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14 /6): 1119-1131.

Vincent, R., K., 1997. *Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing*. Prentice Hall series Geographic Information Science.

Wang, Y., Ding, X., 2000. Hydrocarbon Alteration Characteristics of Soil and Mechanism or Detection by Remote Sensing in East Sichuan Area, China, , *Natural Resources Research*, vol.9, No. 4, 295-305.

Wokelic et al., 1989. Radiometric Calibration of Landsat Thematic Mapper thermal Band. *Remote Sensing of Environment*, 28, 339-347.

Yang, H., Van der Meer, F., D., Zhang, J., 2000. *Aerospace Detection of Hydrocarbon-Induced Alteration. Geochemical Remote Sensing of the Subsurface*. Elsevier Science.

Zhang, G., Zou, L., Shen, X., Lu, S., Li, C., Chen, H., 2008. Remote Sensing Detection of Heavy Oil Through Spectral Enhancement Techniques in the Western Slope Zone of Songliao Basin China. *AAPG* vol.93, No. 1, 31-49.