

**DIFERENCIACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES MEDIANTE PERCEPCIÓN  
REMOTA Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE MUESTRAS  
SATELITALES *LANDSAT-7 ETM+* DEL CAUCA Y VERIFICACIÓN MEDIANTE  
DATOS *IN-SITU***

**Yady Tatiana Solano Correa**

**Universidad Del Cauca  
Facultad De Ciencias Naturales, Exactas Y De La Educación  
Departamento De Física  
Ingeniería Física  
Popayán  
2011**

**DIFERENCIACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES MEDIANTE PERCEPCIÓN  
REMOTA Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE MUESTRAS  
SATELITALES *LANDSAT-7 ETM+* DEL CAUCA Y VERIFICACIÓN MEDIANTE  
DATOS *IN-SITU***

**Monografía presentada para optar como requisito parcial para optar al título  
de Ingeniera Física**

**Yady Tatiana Solano Correa**

**Director  
Ing. Leonairo Pencue-Fierro**

**Universidad Del Cauca  
Facultad De Ciencias Naturales, Exactas Y De La Educación  
Departamento De Física  
Ingeniería Física  
Popayán  
2011**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Ing. Edgar Leonairo Pencue Fierro**  
**Director**

---

**Dr. Apolinar Figueroa Casas**  
**Co-director**

---

**Mg. Marta Lucero Bastidas**  
**Evaluador**

---

**Mg. Carlos Felipe Ordoñez**  
**Evaluador**

**Fecha de sustentación: Popayán, Diciembre 6 de 2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme el regalo de la vida y permitirme llegar hasta donde estoy.

A la Universidad del Cauca y los profesores del Dpto de Física, al Grupo de Óptica y Láser, a los profesores Jauri, Echeverri, Washington, Mario, Leo, Felipe, por toda su colaboración y enseñanzas a lo largo de la carrera. Al Grupo de Estudios Ambientales en cabeza del profesor Apolinar Figueroa, por su apoyo durante la realización de este proyecto, a Fernando Muñoz, por su constante colaboración en cuanto al aprendizaje de los nuevos conceptos, a Marta Bastidas y Eduardo Santamaría por sus asesorías y ayuda.

A mi familia, por todo el apoyo que me han ofrecido, por su paciencia y su cariño, a mi madre por todo el esfuerzo que realizó para sacarnos adelante, a mi hermana por estar ahí para escucharme y a mi padre y hermano por ser un soporte en todo este logro.

A mis compañeros de la Universidad del Cauca que me acompañaron a lo largo de toda la carrera y con quienes viví muchas experiencias, aprendí, crecí, reí y disfrute una de las etapas más importantes de la vida. A Luza, Laura V, Laura O, Carlos A, por estar allí como amigos y por ayudarme en tantas cosas. A Oscar, Félix, Julio, Adriana, por toda la ayuda ofrecida. A Fabio, William, Darío, Carlos O, Dagoberto, por todo lo aprendido y todo lo enseñado a lo largo de los años. A todos aquellos que compartieron conmigo y que aportaron para poder crecer.

A UCU Popayán y Nacional, a Guillermo Jaramillo, Leidy, Katerin, David, Ángela, Daniel, Johny, Darío, por ser una familia más, y regalarme el placer de compartir con ellos.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	II
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
1. USOS Y COBERTURAS DEL SUELO.....	4
1.1. USOS DEL SUELO .....	5
1.2. COBERTURAS DEL SUELO .....	7
1.2.1 Coberturas vegetales .....	7
1.3. CONSECUENCIAS DE LOS CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO .....	7
1.4. PROYECTO CORINE LAND COVER (CLC).....	10
1.5. PROYECTO <i>CORINE LAND COVER</i> COLOMBIA (CLC COLOMBIA) .....	12
2. PERCEPCIÓN REMOTA.....	16
2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA .....	19
2.1.1. Ventajas del proceso de la percepción remota .....	20
2.1.2. El Espectro Electromagnético. ....	21
2.1.3. Principios de Radiación Electromagnética .....	22
2.1.4. Reflexión .....	24
2.1.5. Dispersión .....	25
2.2. INTERACCIÓN TIERRA-RADIACIÓN .....	26
2.3. INTERACCIÓN ATMÓSFERA-RADIACIÓN .....	27
3. INSTRUMENTACIÓN SATELITAL DE PERCEPCIÓN REMOTA .....	30
3.1. SENSORES REMOTOS .....	30

3.2. BANDAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	33
3.2.1. Percepción remota del Infrarrojo Cercano y el Visible .....	33
3.2.2. Percepción remota en el Infrarrojo Medio .....	33
3.2.3. Percepción remota en el Infrarrojo Lejano.....	34
3.2.3. Percepción remota en la Zona de las Microondas.....	34
3.3. SISTEMAS Y PLATAFORMAS SATELITALES .....	35
3.4. LANDSAT .....	37
3.4.1. Características del <i>Landsat 7</i> y sus predecesores.....	39
3.4.2. Información Espectral de las bandas del <i>Landsat7</i> .....	41
3.4.3. Combinaciones comunes de las bandas .....	43
3.4.4. Problemas con las imágenes del <i>Landsat7</i> .....	43
4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES .....	46
4.1. PREPROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES .....	46
4.1.1. Correcciones geométricas.....	47
4.1.2. Correcciones Radiométricas .....	48
4.2. LAS TEXTURAS EN LAS IMÁGENES DE LA SUPERFICIE TERRESTRE .....	49
4.2.1. Análisis de las diferentes variables de textura.....	49
4.3. MATRICES DE COOCURRENCIA DE NIVELES DE GRIS .....	52
4.3.1. Cálculo de la matriz de coocurrencia .....	54
4.3.2. Principales características de textura .....	55
4.4. TRANSFORMADA DISCRETA DEL COSENO .....	56
4.5. FILTROS DE GABOR .....	57
4.6. ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES .....	59
4.7. OTROS MÉTODOS PARA CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS .....	61

4.7.1. Transformación de espacios de colores.....	61
4.7.2. Índices de Vegetación (NDVI, SAVI, PVI) .....	62
4.7.3. Transformación Tasseled Cap (TTC).....	62
4.7.4. Comparaciones de cocientes .....	63
4.8. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GIS).....	63
4.9. CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES .....	64
4.9.1. Redes Neuronales .....	65
4.9.2. Sistema Experto .....	66
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	67
5.1. SLC-OFF .....	69
5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES .....	71
5.3. REDUCCIÓN DEL ESPACIO MEDIANTE UTILIZACIÓN DE PCA .....	72
5.4. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS .....	73
5.4.1. SEOF .....	74
5.4.2. Matrices de coocurrencia .....	75
5.4.3. Transformada discreta de coseno.....	77
5.4.4. Filtros de Gabor.....	78
5.4.5. Índices de Vegetación.....	78
5.4.6. Espacios de color.....	80
5.4.7. Transformada <i>Tasseled Cap</i> .....	81
5.4.8. Razones de bandas.....	82
5.5. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EN EL ESPACIO DE CARACTERÍSTICAS .....	86
5.6. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS .....	86
5.6.1. Red neuronal.....	86

5.6.2. Sistema Experto. ....	88
5.6.3. Evaluación de desempeño. ....	96
6. CONCLUSIONES .....	98
TRABAJOS FUTUROS .....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de cobertura vegetal de la Laguna de San Rafael 1965 y 1979 (Muñoz, 2008) .....	6
<b>Figura 2.</b> Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de la Laguna de San Rafael en 1987-1991 (Muñoz, 2008).....	8
<b>Figura 3.</b> Área del proyecto piloto CORINE Land Cover Colombia (IGAC et al., 2008; GEA).....	13
<b>Figura 4.</b> Evolución histórica de los sistemas de percepción Remota (Chuvieco, 1996) ..	16
<b>Figura 5.</b> Principio de Percepción Remota (Gottfried, 2003).....	18
<b>Figura 6.</b> Onda de radiación electromagnética (Castañeda, 1987).....	19
<b>Figura 7.</b> Espectro Electromagnético ( <a href="http://www.cientec.or.cr">http://www.cientec.or.cr</a> ) .....	22
<b>Figura 8.</b> Distribución espectral de la emisión de un cuerpo negro. Tener en cuenta que los dos ejes son logarítmicos (United State Geological Survey) .....	24
<b>Figura 9.</b> (a) Reflexión Especular, (b) Reflexión Difusa (Egan, 2004) .....	25
<b>Figura 10.</b> Interacción Tierra-Radiación (Gottfried, 2003) .....	27
<b>Figura 11.</b> Curvas de reflectividad (Gottfried, 2003).....	28
<b>Figura 12.</b> Ventana Atmosférica (Egan, 2004) .....	28
<b>Figura 13.</b> Percepción Remota ( <a href="http://esospso.gsfc.nasa.gov">http://esospso.gsfc.nasa.gov</a> ) .....	32
<b>Figura 14.</b> Órbita geoestacionaria y polar de algunos satélites ( <a href="http://esospso.gsfc.nasa.gov">http://esospso.gsfc.nasa.gov</a> ) .....	36
<b>Figura 15.</b> Bandas del satélite Landsat ( <a href="http://www.gdsig.com.ar">http://www.gdsig.com.ar</a> ) .....	42
<b>Figura 16.</b> Combinaciones más comunes de las bandas del Landsat ( <a href="http://www.gdsig.com.ar">http://www.gdsig.com.ar</a> ) .....	43
<b>Figura 17.</b> Falla del SLC ( <a href="http://www.engesat.com.br/?system=news&amp;action=read&amp;id=599">http://www.engesat.com.br/?system=news&amp;action=read&amp;id=599</a> ).....	44
<b>Figura 18.</b> Imagen con SCL-off (izq.) e imagen con SCL-on (der.) ( <a href="http://www.engesat.com.br/?system=news&amp;action=read&amp;id=599">http://www.engesat.com.br/?system=news&amp;action=read&amp;id=599</a> ).....	44

<b>Figura 19.</b> División en las 72 escenas del Landsat para cubrir todo el territorio Colombiano (GEA) .....	45
<b>Figura 20.</b> a) Imagen de dimensiones 10x10 píxeles, una ventana móvil de 5x5 en dos posiciones y el píxel central que recibe el resultado. b) todos los píxeles que reciben el resultado y las 2 filas y las 2 columnas del borde de la imagen que reciben el valor de textura calculados en los píxeles cercanos. ....	52
<b>Figura 21.</b> Los 8 píxeles X de acuerdo el ángulo utilizado en el cálculo de la matriz de coocurrencia. ....	53
<b>Figura 22.</b> a) Patrón de información básico de una DCT, b) Coeficiente DC y c) coeficiente AC [24] .....	57
<b>Figura 23.</b> Parte real (izq) e imaginaria (der) de un filtro de Gabor [42].....	58
<b>Figura 24.</b> Arquitectura unidireccional con tres capas de neuronas: una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida (Bishop, 1995).....	65
<b>Figura 25.</b> Localización del Departamento del Cauca (GEA).....	67
<b>Figura 26.</b> Zona de trabajo año 2010 combinación 3,2,1 (RGB) con cambio de contraste (modificada de fuente GEA) .....	68
<b>Figura 27.</b> Imagen de Popayán con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 1 (modificada de GEA) .....	70
<b>Figura 28.</b> Imagen de la Salvajina con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 4 (modificada de GEA) .....	70
<b>Figura 29.</b> Imagen del volcán Puracé con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 4 (modificada de GEA) .....	71
<b>Figura 30.</b> Histograma de la banda 1 (azul).....	71
<b>Figura 31.</b> Combinación 4, 5, 3 para la zona de trabajo (modificada de GEA) .....	73
<b>Figura 32.</b> Primera (izq.) y segunda (der.) componente principal .....	74
<b>Figura 33.</b> Imagen original (izq.) e imagen con sombras segmentadas (der.) .....	75
<b>Figura 34.</b> Mosaico en combinación 4, 5, 3, (RGB) de diferentes coberturas presentes en la zona de trabajo: 1) Salvajina, 2) nube, 3) ciudad, 4) pastos, 5) pasto y ciudad, 6) bosque, 7) bosque, 8) sombra de nube, 9) cultivos, 10) bosque natural y lago, 11) cima del volcán, 12) Bosque y humedal, 13) páramo y laguna, 14) cultivos, 15) bosque y pastos, 16) pastos, nube y sombra de nube.....	75

<b>Figura 35.</b> Características de la matriz de coocurrencia: a) contraste, b) disimilaridad, c) entropía, d) homogeneidad y e) energía en falso color .....	77
<b>Figura 36.</b> DCT para las bandas 4 (izq), 5 (centro) y 3 (der) en falso color.....	77
<b>Figura 37.</b> Filtro de Gabor para las bandas 4 (izq), 5 (centro) y 3 (der) en falso color .....	78
<b>Figura 38.</b> NDVI para el mosaico del año 2010 en falso color.....	79
<b>Figura 39.</b> PVI para el mosaico del año 2010 en falso color.....	79
<b>Figura 40.</b> SAVI para el mosaico del año 2010 en falso color .....	79
<b>Figura 41.</b> Mosaico en combinación 4, 5, 3, en el espacio de color HSV .....	80
<b>Figura 42.</b> Separación en planos H (izq), S (centro) y V (der) .....	80
<b>Figura 43.</b> Mosaico en combinación 4, 5, 3, en el espacio de color YCbCr .....	81
<b>Figura 44.</b> Separación en planos Y (izq.), Cb (centro) y Cr (der.) .....	81
<b>Figura 45.</b> Transformada Tasseled Cap: a) brillo, b) verdor y c) humedad .....	82
<b>Figura 46.</b> Mosaico de bosques, cultivos y ciudad en combinación 4, 5, 7 .....	83
<b>Figura 47.</b> Coeficiente c1 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad.....	83
<b>Figura 48.</b> Coeficiente c2 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad.....	84
<b>Figura 49.</b> Coeficiente c3 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad.....	84
<b>Figura 50.</b> Coeficiente c4 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad.....	85
<b>Figura 51.</b> Coeficiente c5 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad.....	85
<b>Figura 52.</b> Resultado de la clasificación con red neuronal de la Salvajina (izq.) y Popayán (der.).....	87
<b>Figura 53.</b> Rangos de acción para las 11 clases en DCT.....	88
<b>Figura 54.</b> Rangos de acción para las 11 clases en el filtro de Gabor .....	89
<b>Figura 55.</b> Rangos de acción para las 11 clases en desviación estándar .....	89
<b>Figura 56.</b> Convención de colores para la clasificación del sistema experto .....	91
<b>Figura 57.</b> Salvajina en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	91

<b>Figura 58.</b> Popayán en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	92
<b>Figura 59.</b> Cultivos clase 1 y 2 en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	93
<b>Figura 60.</b> Zona San Rafael en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	93
<b>Figura 61.</b> Lago al sur del volcán Puracé en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	94
<b>Figura 62.</b> Cima del volcán Puracé en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto .....	94
<b>Figura 63.</b> Resultado de la clasificación con el sistema experto, de toda la zona de trabajo .....	95

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación <i>CORINE Land Cover</i> (clase de vegetación) (GEA).....	11
<b>Tabla 2.</b> Metodología <i>CORINE Land Cover</i> Colombia (fase piloto) (IGAC et al., 2008)....	14
<b>Tabla 3.</b> Aplicaciones de las diferentes bandas espectrales (Chuvieco, 1996).....	21
<b>Tabla 4.</b> Comparación de los satélites más utilizados con sus respectivas características ( <a href="http://www.gdsig.com.ar">http://www.gdsig.com.ar</a> ) .....	38
<b>Tabla 5.</b> Intervalos espectrales en $\lambda$ y resolución espacial de los sensores TM y ETM+ ( <a href="http://www.gdsig.com.ar">http://www.gdsig.com.ar</a> ) .....	41
<b>Tabla 6.</b> Todas las posibles combinaciones de los niveles de gris en la imagen de prueba .....	54
<b>Tabla 7.</b> Coeficientes propuestos para la obtención de la TTC a partir de una imagen Landsat (Chuvieco, 1996).....	63
<b>Tabla 8.</b> Correlaciones promedio de las imágenes 2008 y 2010 .....	72
<b>Tabla 9.</b> Correlaciones promedio de las imágenes 2008 y 2010 .....	76
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la red neuronal para 7 clases .....	87
<b>Tabla 11.</b> Rangos de las 11 características para las 11 clases del sistema experto.....	90
<b>Tabla 12.</b> Resultados del sistema experto para 11 clases.....	96

## INTRODUCCIÓN

En la ciencia e ingeniería, la toma de cualquier tipo de datos siempre ha sido necesaria, bien sea para la comprobación de cierto experimento o para la obtención de información pertinente en la toma de decisiones. Debido a la naturaleza intrínseca del hombre en su búsqueda de entender todo aquello que sucede a su alrededor y de su necesidad de conocer e identificar el espacio que le rodea, en este caso específico se han venido desarrollando desde ya hace varios siglos ciencias empíricas dedicadas a la interpretación del medio y de la geografía.

Específicamente ha sido de gran interés entender cómo se ha visto afectada la Tierra y el medio ambiente, debido a las diferentes actividades que se han venido desarrollando a nivel global (Lira, 2002). Para tales fines, se encuentran varias ramas de estudio, entre las cuales se puede nombrar la topografía, en el caso del estudio de coberturas del suelo, ó la meteorología en el caso del estudio climático, pero las metodologías utilizadas para la identificación o clasificación en la actualidad no están muy tecnificadas y, en la gran mayoría de los casos, se hace necesario realizar trabajos de campo y desplazarse con numerosos equipos al área de estudio para el desarrollo de la respectiva investigación (GEA; Chuvieco, 1996).

Gracias al auge de las nuevas tecnologías, ahora es posible adquirir y procesar información de una manera nunca antes pensada, dando como resultado una mejor interpretación del mundo que le rodea y permitiendo abarcar el estudio de la superficie terrestre en su totalidad. Uno de los grandes aportes que permitió este avance, fue la construcción y puesta en órbita de satélites que, mediante el uso de la percepción remota, facilitaron el acceso a prácticamente cualquier lugar y a todo tipo de datos.

Estas condiciones, sumadas al gran interés en el estudio de los cambios de uso y cobertura del suelo han llevado a generar proyectos a nivel internacional que registren, identifiquen y sistematicen, por medio de satélites de percepción remota, los cambios de uso y cobertura de suelo producidos en el territorio. Uno de estos proyectos es el programa europeo *CORINE (Coordination of the information on the Enviroment [Land Cover. Guide Technique, 2003.]*), que nació con el objetivo de capturar datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 (con imágenes obtenidas de los satélites *SPOT* y *Landsat*) sobre la cobertura y uso del territorio de la Unión Europea, así como la permanente actualización de esta base de datos.

En el ámbito local, a lo largo de la historia tecnológica de Colombia, se ha visto cómo al intentar sobresalir en algún área del conocimiento, es necesaria la validación de la información, que siempre se realiza del mismo modo, tomando

tablas y referencias de otros países donde las condiciones que se presentan siempre son diferentes a las del territorio colombiano, generando conclusiones erróneas (la mayor parte del tiempo), en un considerable número de casos, como la aparición de lagos o lagunas en lugares donde no existen, ó cambios de coberturas abruptos de un lado a otro de una zona, debidos a las sombras provocadas por nubes o por la orografía de las montañas.

Uno de los casos más comunes es tratar de clasificar algún tipo de muestra vegetal, basado en resultados que probablemente se han conseguido en condiciones totalmente diferentes a las del país. Dentro de esas condiciones se encuentran los cambios climáticos o atmosféricos y las variaciones del terreno, este caso específico hace referencia a la clasificación dada a los diferentes tipos de coberturas y usos del suelo del territorio, realizados a nivel del Cauca por el Grupo de Estudios Ambientales (GEA) de la Universidad del Cauca, pionero al suroccidente del país en el manejo y aplicación de sensores remotos para la evaluación y gestión del territorio, con el proyecto Monitoreo Ambiental para Cambio Climático en Ecosistemas Agrícolas Altoandinos (MACACEA), en el cual se han utilizado referentes europeos dados por el proyecto *CORINE Land Cover (CLC)*.

La utilización de esos referentes ha hecho imposible lograr una clasificación adecuada, con la cual se pueda garantizar la construcción de mapas coherentes con la realidad y la determinación a futuro de los cambios que se han presentado en cierta zona en un período de tiempo. Por eso, es importante establecer e implementar una metodología propia para la clasificación de coberturas que tenga en cuenta todas las variables que pueden llegar a influir en la misma.

En este trabajo, se tomarán como referentes los códigos establecidos por el proyecto original (orientado al territorio europeo), para ser aplicado a una región específica del departamento del Cauca, que al presentar una gran variedad en su topografía, permitirá extrapolar los resultados a todo el territorio colombiano, con el fin de mejorar los resultados de la clasificación realizada actualmente en diferentes proyectos al interior del GEA.

Como parte de los objetivos de este trabajo, se obtendrán y adecuarán las imágenes del satélite *Landsat7* de la zona de estudio suministradas por el GEA, para ser caracterizadas de forma cualitativa y cuantitativa, con base en el análisis del brillo y color de los píxeles en cada banda o en la combinación de éstas, con el fin de extraer un vector de características que permita una diferenciación entre las coberturas. Esta tarea será realizada mediante el análisis de texturas, que se calcula en un conjunto de píxeles conectados y contiene información espacial sobre las variaciones tonales en cada banda, aplicado a imágenes del satélite *Landsat 7 ETM d+*. Para ello se partirá de una reducción dimensional del espacio de trabajo, con la elección e las bandas que aporten mayor información para la clasificación deseada, se combinarán métodos como cálculo de matrices de

coocurrencia, filtros de Gabor, transformadas discretas de coseno, cambios de espacio de color, análisis por componentes principales y algunos índices de vegetación y agua, que permitirán obtener mejores resultados. Finalmente, se validarán los diferentes resultados con datos *in-situ*, para poder determinar el desempeño del algoritmo y a su vez, realizar correcciones, si son pertinentes.

Este documento se ha estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 1 se expone la información requerida para entender los conceptos de cobertura y uso del suelo, al igual que los diferentes proyectos y adaptaciones de los mismos que se han realizado alrededor del mundo y en Colombia.

En el capítulo 2 se describen los fundamentos de la percepción remota, necesarios para comenzar a entender, en teoría, los fenómenos que permiten obtener información de la superficie terrestre.

En el capítulo 3 se presenta la instrumentación satelital de la percepción remota, en donde se describe en detalle, los componentes y funcionalidades de los mismos, las diferentes plataformas satelitales y el estudio a profundidad del satélite *Landsat7 ETM+*.

En el capítulo 4 se abordan los temas relacionados con el procesamiento de imágenes satelitales, haciendo énfasis en los métodos utilizados para la clasificación de coberturas y usos del suelo en el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de la implementación del algoritmo desarrollado en el marco de este proyecto y en colaboración del GEA.

## 1. USOS Y COBERTURAS DEL SUELO

Un país moderno, al igual que un negocio moderno, debe tener suficiente información con el fin de tomar decisiones sobre aspectos de interés (Anderson *et al.*, 2001). Uno de los aspectos importantes para el ser humano a través de la historia ha sido conocer sus suelos y su utilización, debido a ello surgen dos aspectos del conocimiento sobre el uso y cobertura del suelo (Anderson *et al.*, 2001). Además de proporcionar información sobre el ambiente natural, se convierte en una herramienta de apoyo para que los países puedan planear y enfrentar problemas de desarrollo incontrolado, el deterioro de la calidad del medio ambiente, la pérdida de tierras de primera categoría, la destrucción de humedales importantes y la pérdida de hábitats de vida salvaje ([http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change)). Los datos del uso del suelo son importantes en el análisis de los procesos y problemas medioambientales, que se deben entender si se desea mejorar o mantener las condiciones de vida actuales.

Los estudios sobre la cobertura y el uso del suelo tienen como objetivo analizar y clasificar los diferentes tipos de suelo asociados a su utilización en una zona o región determinada (Anderson *et al.*, 2001). Actualmente, los cambios en el uso del suelo están ligados a cambios ligeros en cobertura, sin que en la actualidad se tenga cuantificado este cambio a escala global, regional o local. La mayor parte de los cambios ocurridos en ecosistemas terrestres se deben a tres aspectos: conversión de la cobertura del terreno, degradación del terreno e intensificación en el uso del terreno ([http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change)).

Mientras que la cobertura del suelo puede ser observada directamente en el campo o por sensores remotos, las observaciones sobre el uso del suelo y sus cambios generalmente requieren de la integración de métodos científicos naturales y sociales, para determinar cuáles actividades humanas están ocurriendo en diferentes partes del paisaje, incluso cuando las coberturas del suelo parecen ser las mismas ([http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change)). Por ejemplo, las áreas cubiertas de vegetación o bosques, puede representar un matorral natural inalterado, una reserva forestal que se recupera de un incendio, el crecimiento de nuevos árboles como proceso de regeneración, una plantación inmadura de cierto tipo de árboles (plantación agricultora), las parcelas de una cosecha que están entre los períodos de espera anual para la producción de cierto alimento ó una plantación de té de regadío ([http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change)).

Los cambios en cobertura y uso del suelo son los resultados más visibles de las modificaciones del hombre sobre los ecosistemas terrestres. El uso está

influenciado por factores económicos, culturales, políticos, históricos y de tenencia, a múltiples escalas. La cobertura, por otra parte, es uno de los principales atributos biofísicos que afectan el funcionamiento ecosistémico (Meyer, Turner, 1994).

Los problemas ambientales, económicos y sociales presentes en un territorio pueden ser interpretados integralmente en el contexto del pasado y usados para informar futuras proyecciones de cambio y necesidades de desarrollo dentro de una región.

## **1.1. USOS DEL SUELO**

El uso del suelo, se refiere a la actividad socioeconómica que se desarrolla sobre los diferentes tipos de cobertura que el hombre crea para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales (Anderson *et al.*, 2001). Las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos y los factores culturales ([http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change); Anderson *et al.*, 2001).

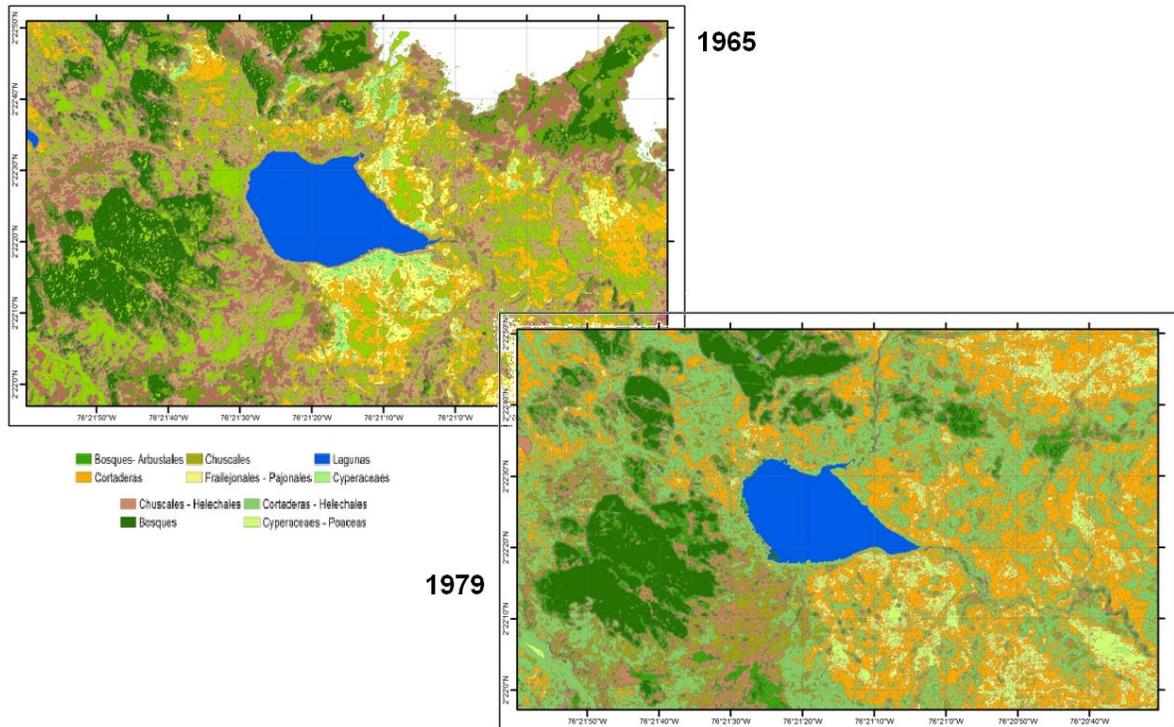
El resultado de la acción del hombre sobre el ambiente natural crea en parte el uso actual del suelo, el resto es el uso de la vegetación natural como resultado de las características del sitio y la competencia entre especies y el lugar que ocupan: humedales, cuerpos y corrientes de agua y afloramientos rocosos.

La clasificación de uso del suelo se ordena en orden ascendente de subíndices, según la cantidad de uso que se le dé al mismo. Se comienza por la clase correspondiente al suelo que recibe la mayor actividad del hombre, donde hace las mayores inversiones por unidad de superficie, transita y desarrolla su vida comercial y cultural, y se continua avanzando en función de la disminución de actividad e inversiones del hombre y en el aumento de la influencia del ambiente natural (Anderson *et al.*, 2001).

La intensificación del uso del suelo se encuentra asociada con sistemas agrícolas, agroforestales y de pastoreo. Un manejo intensificado puede estar basado en técnicas como la irrigación, utilización de fertilizantes, incendios, prácticas de labranza y la integración de diferentes actividades de producción. Esta intensificación afecta la composición del ecosistema, el ciclaje de nutrientes y la distribución de la materia orgánica (Anderson *et al.*, 2001).

La conversión humana de los hábitats naturales es la más grande causa de pérdida de diversidad biológica. El balance entre hábitat natural y el paisaje humano dominado podría determinar el futuro de la conservación de la diversidad biológica en grandes áreas del planeta. Por lo tanto es importante mapear y cuantificar el grado de conversión humana del hábitat natural. El cambio en el uso

del suelo se puede observar con la ampliación o reducción del tamaño de cualquier zona, en la Figura 1, se aprecia un ejemplo de una zona del departamento del Cauca (Laguna de San Rafael), donde se observa este cambio, específicamente en la zona de color azul que representa el agua o laguna, en un período de transición entre 1965-a1979 (Muñoz, 2008).



**Figura 1.** Mapa de cobertura vegetal de la Laguna de San Rafael 1965 y 1979 (Muñoz, 2008)

Un estudio de la cobertura y uso del suelo, supone clasificarlos según el trabajo que el hombre practica en una zona determinada. Su importancia radica en que, a escala global, regional o local, los cambios en el uso del suelo están transformando la cobertura a un paso acelerado. El ejemplo más difundido sobre el cambio en el uso del terreno es la deforestación tropical. “Se ha estimado que la conversión en la cobertura forestal tropical ha alcanzado un promedio de 15.5 millones de hectáreas por año para el periodo de 1981-1990, lo cual se traduce en una tasa anual de deforestación del 8%. Este cambio es particularmente notable en el oeste del continente africano, donde los bosques han sido reducidos en un 44%; en América Latina en un 32% y en el sur y sudeste de Asia 34%” (Meyer, Turner, 1994).

## **1.2. COBERTURAS DEL SUELO**

La cobertura del suelo es todo aquello que cubre la superficie del terreno, y puede originarse de ambientes naturales como resultado de la evolución ecológica (bosques, sabanas, lagunas, entre otros) o a partir de ambientes artificiales creados por el hombre (cultivos, represas, ciudades, entre otros). En forma pragmática, la cobertura describe los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado, debido al cambio del uso del suelo, también se presentan cambios en las coberturas, específicamente en las coberturas vegetales, en la Figura 2, se aprecia otra imagen de los cambios presentados entre 1987-1991 en la Laguna de San Rafael (Cauca-Colombia) (Anderson *et al.*, 2001; Muñoz, 2008).

### **1.2.1 Coberturas vegetales**

La cobertura vegetal se acerca más a un objeto natural, en tanto que otras coberturas resultan de la intervención humana. En algunos casos, las fronteras pueden ser difusas, tal como el caso de los matorrales y pastizales. Aquí pueden usarse los conceptos de cobertura vegetal inducida, como un resultado de la transformación que ejerce el ser humano sobre la cobertura vegetal, lo cual no equivale, necesariamente, a la degradación de la cobertura (Anderson *et al.*, 2001).

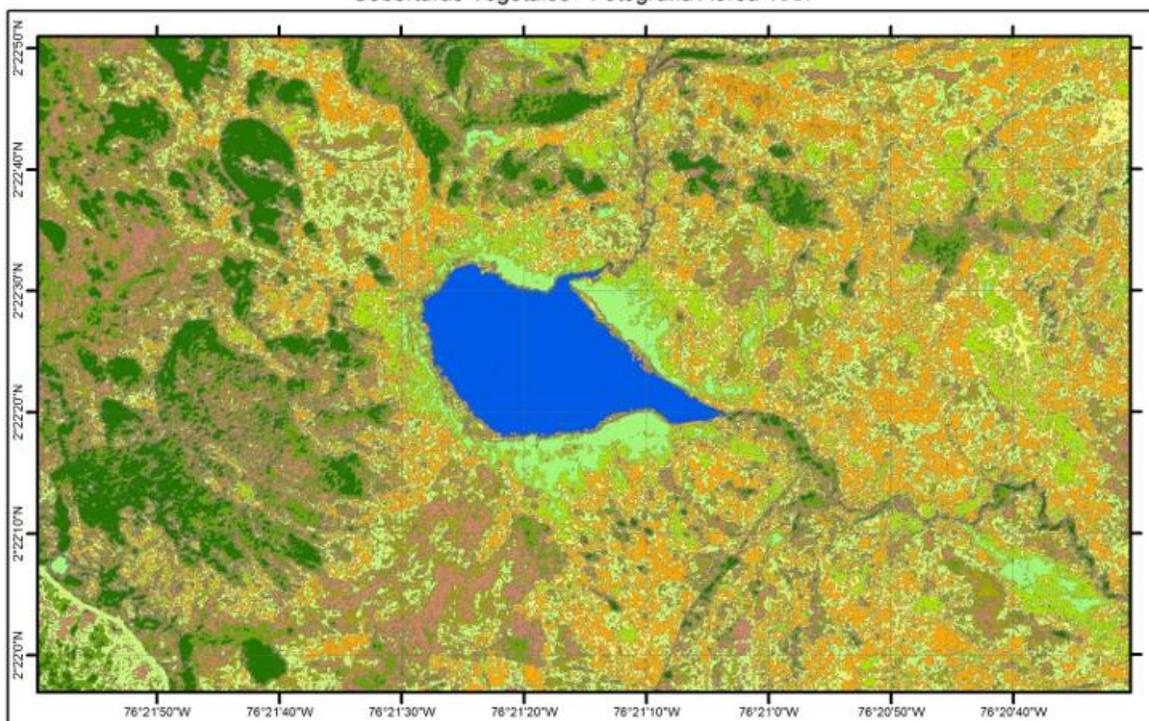
A su vez, debe tenerse en cuenta la vegetación potencial, las características climáticas y fisiográficas de una región y la vegetación actual, que es lo que realmente existe en el momento de realizar un análisis de coberturas. Aquí conviene referirse a los conceptos de zonalidad y azonalidad, como una forma de predecir la cobertura vegetal y entender su transformación (Anderson *et al.*, 2001).

## **1.3. CONSECUENCIAS DE LOS CAMBIO DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO**

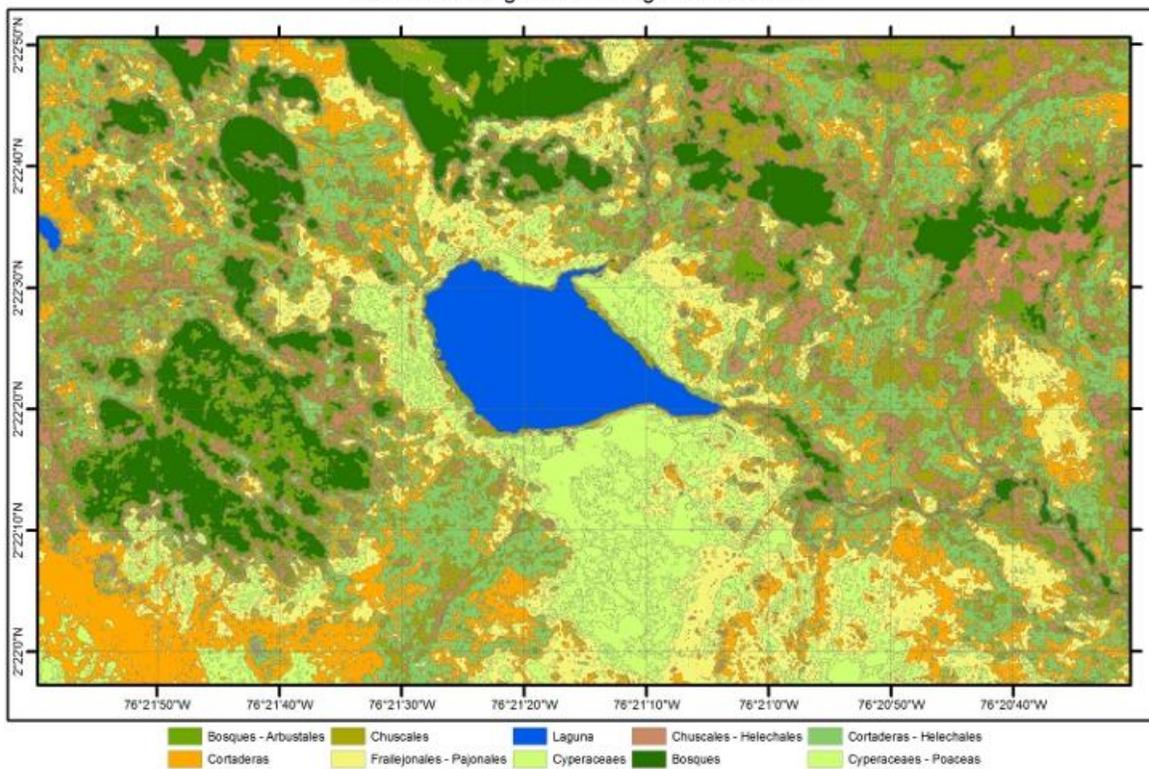
Existe un gran número de estudios sobre los cambios de uso y coberturas de suelo, que se han venido desarrollando, debido a la proliferación y masificación del empleo de los Sistemas de Información Geográfica, conjuntamente con la utilización de sensores remotos.

Además existe un interés en este tipo de estudios ya que constituyen la expresión espacial más evidente de las actividades humanas sobre los sistemas de soporte.

Coberturas Vegetales - Fotografía Aérea 1987



Coberturas Vegetales - Fotografía Aérea 1991



**Figura 2.** Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de la Laguna de San Rafael en 1987-1991 (Muñoz, 2008)

De la misma manera, son considerados como una de las causas de la degradación y pérdida de servicios ambientales en los territorios donde ocurren estos procesos. Estos estudios se convierten en un soporte e información necesaria para la planificación del territorio, debido a su capacidad de reflejar patrones espaciales y temporales como emplazamiento, distribución, estructura y dirección (Aldana, Bosque, 2008):

En los estudios de estos cambios existen básicamente dos términos para su caracterización, el primero es la conversión, que describe el cambio de un tipo de cubierta por otra, y la modificación o transformación en donde no se presentan cambios de categoría, pero si se detecta algún nivel de afectación en los atributos de una cobertura. Se debe entender como cobertura todo aquello que cubre la superficie del suelo, que puede originarse a partir de ambientes naturales o de ambientes artificiales creados y mantenidos por el hombre, mientras que los usos de suelo expresan el destino o uso humano del territorio (Aldana, Bosque, 2008; Britos, Barchuk, 2008):

La expansión física de las ciudades es uno de los mayores causantes de los cambios de uso y cobertura, ésta conduce a un cambio en el patrón del suelo, transformando espacios naturales o seminaturales en urbanos (Aldana, Bosque, 2008). Además, la expansión urbana es la perturbación ambiental más drástica, rápida e irreversible sobre el medio ambiente, que ocurre mediante una serie de cambios de usos y coberturas naturales o seminaturales que son procesos considerablemente dinámicos y continuos en ciudades en proceso de expansión y en las zonas que comprenden sus áreas metropolitanas (Britos, Barchuk, 2008).

La expansión urbana y los cambios de uso y cobertura de suelo asociados tienen diferentes efectos sobre el medio ambiente. Algunos de los principales efectos son (Henríquez, Aguayo, 2006):

- Intensiva reducción de espacios con vegetación natural incluyendo terrenos de cultivo, áreas naturales y humedales.
- Pérdida de biodiversidad y reducción y desaparición de hábitats, corredores y parches de vida silvestre.
- Transformación del paisaje provocando el aumento de la fragmentación y disminuyendo la conectividad entre parches de vegetación.
- Cambios en el ciclo hidrológico.
- Cambios en el clima urbano generando la consolidación de islas de calor al interior de las ciudades.
- Contaminación del aire, agua y suelos

#### 1.4. PROYECTO CORINE LAND COVER (CLC)

Durante muchos años, agencias de varios niveles gubernamentales, han estado recolectando datos sobre la tierra, pero en su gran mayoría, ellos han trabajado de forma independiente y sin coordinación (Bocco *et al.*, 2001). Esto ha significado la duplicación de esfuerzos en la mayoría de los casos, o se ha encontrado que los datos obtenidos para un propósito específico fueron de poco o ningún valor para un propósito similar, poco tiempo después (Bocco *et al.*, 2001).

Hay muchas fuentes de información existentes sobre el uso y la cobertura del suelo y los cambios que están ocurriendo. Las agencias de planeación local hacen uso de información detallada generada durante estudios del suelo, teniendo en cuenta datos numéricos e interpretación de fotografías aéreas a gran escala; en algunos casos, información suplementaria es inferida de las conexiones de servicios públicos, de permisos de construcción e información similar (Meyer, Turner, 1994). Existen varios problemas en esta tarea y la mayor parte de ellos se presentan en la aplicación e interpretación de los datos existentes. Esto incluye los cambios en las definiciones de algunas categorías y en los métodos de recolección de datos utilizados por diferentes agencias, cubrimiento incompleto de los datos, variación en los años de los datos y el empleo de sistemas de clasificación incompletos. Además, es casi imposible integrar los datos disponibles debido al uso de diferentes sistemas de clasificación (Anderson *et al.*, 2001).

La exigencia por la estandarización de los datos de usos y coberturas del suelo, solo puede aumentar a medida que se trata de evaluar y manejar áreas con una importancia crítica para el control ambiental como llanuras aluviales y humedales, el desarrollo de recursos energéticos y áreas de producción, hábitats salvajes, tierras de recreación y áreas que tienen los principales sitios de desarrollo residencial e industrial (Anderson, 2001).

Las técnicas de sensores remotos, incluyendo el uso de fotografías aéreas convencionales, pueden ser usadas efectivamente para complementar las encuestas basadas en la observación del suelo y los datos numéricos, dando así, un inventario puntual y preciso de la utilización actual de los suelos de muchos países. Al mismo tiempo, las técnicas de procesamiento de datos permiten el almacenamiento de grandes cantidades de datos detallados que pueden ser organizados de formas variadas para conocer necesidades específicas (Anderson, 2001).

Este gran interés en el estudio de los cambios de uso y cobertura de suelo ha llevado a generar proyectos a nivel internacional que registren, identifiquen y sistematicen los cambios de uso y cobertura de suelo producidos en el territorio. Uno de estos proyectos es el programa europeo *CORINE* (*Coordination of Information on the Environment [Land Cover. Guide Technique, 2003.]*), que nació

con el objetivo de capturar datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 (con imágenes obtenidas de los satélites *SPOT* y *Landsat*) sobre la cobertura y/o uso del territorio de la Unión Europea, así como la permanente actualización de esa base de datos geográfica.

Su metodología puede resumirse como “fotointerpretación asistida por ordenador de los datos numéricos transmitidos por los satélites de observación de la Tierra” (*Land Cover. Guide Technique*, 2003). La nomenclatura de ocupación del suelo está jerarquizada en varios niveles de información (en el ámbito europeo comprende 3 niveles con 43 clases y en el ámbito español 5 niveles con 64 clases). La revisión del proyecto *CORINE Land Cover* realizada en el año 2004 (con fuentes del año 2000) ha supuesto su definitiva consolidación (*Land Cover. Guide Technique*, 2003). En la Tabla 1 se muestra solo la nomenclatura utilizada para la clase de vegetación.

**Tabla 1.** Clasificación *CORINE Land Cover* (clase de vegetación) (GEA)

3	ZONAS FORESTALES CON VEGETACIÓN NATURAL Y ESPACIOS ABIERTOS	3.1	Bosques	3.1.1	Bosques de frondosas
				3.1.2	Bosques de coníferas
				3.1.3	Bosque mixto
		3.2	Espacios de vegetación y/o herbácea	3.2.1	Pastizales naturales
				3.2.2	Landas y matorrales
				3.2.3	Vegetación esclerófila
				3.2.4	Matorral boscoso de transición
		3.3	Espacios abiertos con poca o sin vegetación	3.3.1	Playas, dunas y arenales
				3.3.2	Ro-queda
				3.3.3	Espacios con vegetación escasa
				3.3.4	Zonas quemadas
				3.3.5	Glaciares y nieves permanentes

Después de la creación del proyecto *CORINE Land Cover* y en vista de su efectividad, muchos países sintieron la necesidad y el incentivo de hacer su propia adaptación del proyecto, pero aplicada a las necesidades y condiciones de su región.

Aparecieron proyectos relacionados, como *Land Cover*, cuyo objetivo era proporcionar información localizada geográficamente sobre los usos y coberturas del suelo de los estados miembros de la Unión Europea (*Land Cover. Guide Technique*, 2003). De este modo, se pretende que esta información, básica para el control medioambiental, sea homogénea para toda la comunidad.

Además se puede encontrar el proyecto *MEDGEOBASE-Marruecos*, cuyo objetivo es la creación y la puesta en marcha de una base de datos geográfica sobre la ocupación del suelo, conforme a las especificaciones del *CORINE Land Cover* de la Comunidad Europea, destinado a la gestión y protección del medio ambiente y la elaboración de políticas equilibradas de desarrollo a lo largo del litoral de Marruecos, entre Tiznit y la frontera Argelina (*Land Cover. Guide Technique*, 2003).

Otro proyecto relacionado es el *LACOST (Land Cover Changes in Coastal Zones)* el cual surgió a partir del programa *CORINE*, constituyéndose en “un proyecto experimental para la recogida, coordinación y coherencia de la información sobre la situación del medio ambiente y los recursos naturales de la Comunidad Europea” (Ezquerro *et al.*, 1998), siendo el principal objetivo el estudio de la evolución de las costas europeas entre los años 1975 y 1987.

En EE.UU., existe el *Land Cover Trends Project* desarrollado por el Servicio Geológico (USGS), que está centrado en la investigación y comprensión de los tipos, tendencias, causas y consecuencias contemporáneas de los cambios de uso y cobertura de suelo, con el objetivo de establecer sus alcances, naturaleza y causas. Se programó su evaluación inicial de 30 años en el año 2010 y proporcionará una base para predecir los impactos del cambio de uso y cobertura de suelo en escenarios futuros (*Land Cover. Guide Technique*, 2003).

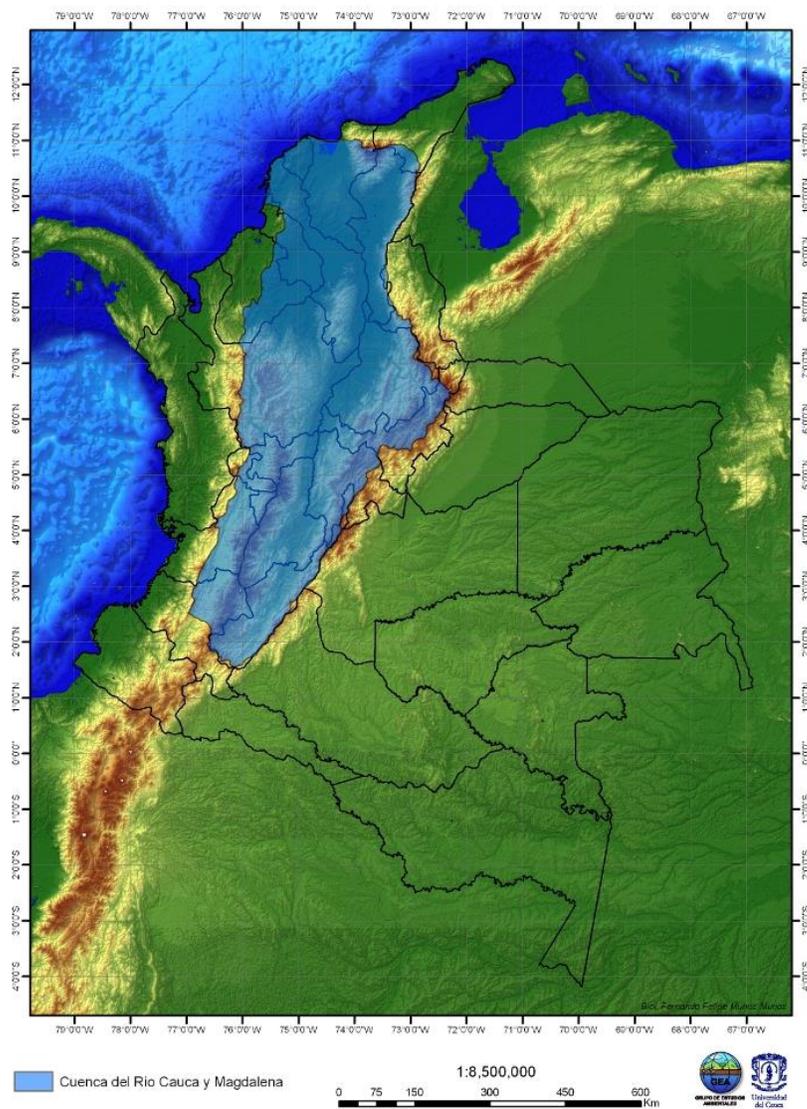
### **1.5. PROYECTO CORINE LAND COVER COLOMBIA (CLC COLOMBIA)**

En Colombia no existía un sistema de clasificación y una metodología uniforme para levantar información de las coberturas del suelo. Para dar respuesta a este problema, el proyecto “*Corine Land Cover Colombia*” busca estandarizar una clasificación de cobertura del suelo, con subdivisiones definidas de acuerdo a la información suministrada por imágenes *Landsat TM* y según las condiciones locales del territorio nacional (IGAC *et al.*, 2008). La adaptación y validación de la metodología *CLC* permitirá comparar estadísticas de ocupación de la tierra y crear líneas de comunicación entre las diferentes instituciones que la adopten y además, homologar la información a nivel mundial (IGAC *et al.*, 2008).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (Cormagdalena) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) acordaron, mediante la firma de un convenio, desarrollar un proyecto para validar la nomenclatura y la metodología *CORINE Land Cover* con el propósito de construir un mapa de cobertura de la tierra a escala 1:100 000 para la cuenca del río Magdalena – Cauca (IGAC *et al.*, 2008).

Durante la primera fase de éste estudio se diseñó un sistema de clasificación estructurado en 3 niveles y 62 clases de coberturas (ver Tabla 2), y con base en él, se combinaron técnicas de procesamiento digital e interpretación visual de imágenes Landsat ETM+ complementadas con el uso de fotografías aéreas y trabajo de campo, para generar la base de datos de cobertura de la tierra en 5 zonas diferentes localizadas en la cuenca del río Magdalena (IGAC *et al.*, 2008).

La fase de producción se extiende sobre la totalidad de la cuenca del río Magdalena - Cauca que se puede observar en la Figura 3. Se ha desarrollado en los departamentos de Huila, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Cauca, Valle del Cauca, Bolívar, Atlántico y Magdalena (IGAC *et al.*, 2008)..



**Figura 3.** Área del proyecto piloto CORINE Land Cover Colombia (IGAC *et al.*, 2008; GEA)

Las imágenes con las cuales se trabajó fueron obtenidas en el año 2000, pero por cuestiones de nubes en algunas de ellas, se amplió el rango al período 1998-2002, para garantizar una mejor clasificación. Todo el análisis y procesamiento de las mismas se realizó por medio de un software comercial *ArcGIS* (Sistemas de Información Geográfica-G/S) y con la capacitación de personal para la utilización de este tipo de herramientas (IGAC *et al.*, 2008).

**Tabla 2.** Metodología CORINE Land Cover Colombia (fase piloto) (IGAC *et al.*, 2008)

NIVEL 1	NIVEL2	NIVEL 3	NIVEL 4
BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	BOSQUES	Bosque natural denso	
		Bosque natural fragmentado	Con arbustos y matorrales
			Con pastos y cultivos
		Bosque de galería y/o ripario	
		Bosques inundables	Bosque de mangle
			Bosque de catival
	Bosque plantado	Coníferas	
		Latifoliadas	
	ÁREAS CON VEGETACIÓN HERBÁCEA Y/O ARBUSTIVA	Pastos naturales y sabanas herbáceas	Pastos naturales
			Sabanas herbáceas
			Sabanas arbustivas y/o arboladas
		Arbustos y matorrales	
		Vegetación esclerófila	
		Vegetación de páramo y subpáramo	
		Vegetación rupícola	
		ÁREAS ABIERTAS SIN O CON POCA VEGETACIÓN	Playas, arenales y dunas
	Afloramientos rocosos		
	Tierras desnudas o degradadas		
	Zonas quemadas		
	Zonas nivales o glaciares		

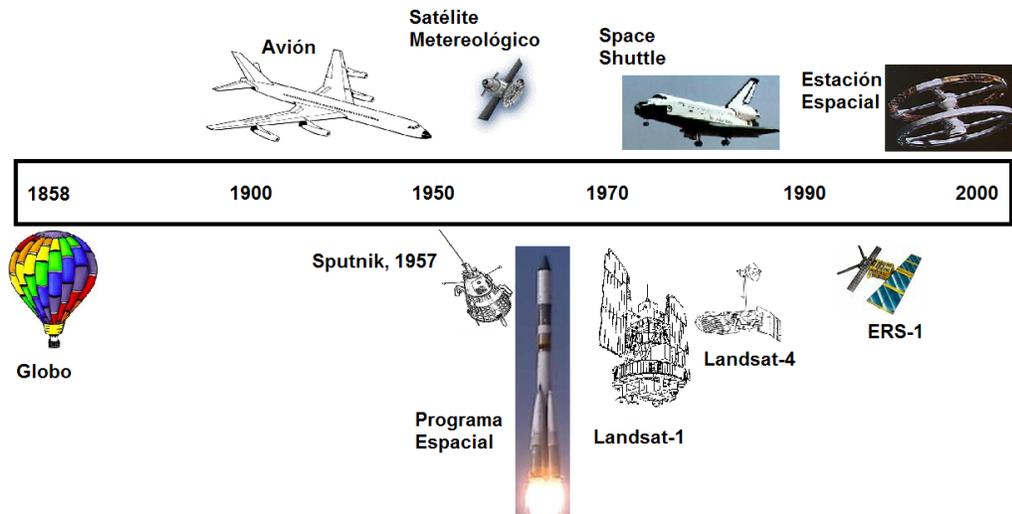
La metodología “*Corine Land Cover*” se está desarrollando en otras áreas de Colombia. El desarrollo de estas bases de datos es independiente del convenio entre IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA, pero se produce en relación con unos de los institutos participantes (IGAC *et al.*, 2008).

- Departamento de Antioquia. El IGAC, a través de la Subdirección de Agrología, produce la base de datos “*Corine Land Cover Colombia*” a escala 1:25 000 en la totalidad del departamento de Antioquia.
- Departamento de la Guajira. El IDEAM, en colaboración con Conservación Internacional, produce la base de datos “*Corine Land Cover Colombia*” a escala 1:100 000 en la reserva natural de la Serranía del Perijá.
- Departamento de Cundinamarca. El IGAC, a través de su Subdirección de Agrología, produce la base de datos “*Corine Land Cover Colombia*” a escala 1:25 000.

## 2. PERCEPCIÓN REMOTA

Debido a la naturaleza intrínseca del hombre en su búsqueda por entender todo aquello que sucede a su alrededor y de su necesidad de conocer e identificar el espacio que le rodea, se han venido desarrollando desde hace ya varios siglos ciertas ciencias empíricas dedicadas a la interpretación del medio y de la geografía, entre las cuales se puede encontrar la topografía, en el caso de coberturas del suelo ó la meteorología en el caso del estudio climático. Pero las metodologías utilizadas para la identificación o clasificación en la actualidad, no están muy tecnificadas, y en la gran mayoría de los casos se hace necesario realizar trabajos de campo y desplazarse con numerosos equipos al área de estudio para el desarrollo de la respectiva investigación, haciendo el trabajo algo complicado, sin contar con las posibles condiciones desfavorables de algunos lugares.

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías y los grandes avances a nivel computacional, las ciencias empíricas y en general, están logrando avanzar hacia nuevos niveles donde la posibilidad de dar soluciones y adquirir un nuevo conocimiento, es ilimitada. Para este caso específico la obtención de información actualmente no requiere de manera imprescindible la presencia física del hombre, equipos como los satélites demuestran la capacidad humana para desarrollar tareas en las que existían limitaciones técnicas y el procesamiento actual de datos resulta ser algo sencillo en donde manejar múltiples variables no es un obstáculo en el momento de obtener resultados instantáneos (Chuvieco, 1996).



**Figura 4.** Evolución histórica de los sistemas de percepción Remota (Chuvieco, 1996)

La percepción remota es una técnica que ha dependido en gran medida de su desarrollo a lo largo del tiempo. Los primeros pasos se dieron cuando Gaspar Félix obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo en 1858, posteriormente se realizan observaciones fotográficas desde avión (1909) (Gottfried, 2003). La primera cámara aérea fue desarrollada en 1915 por J.T.C Moore, y desde ahí empieza el camino de avances en las técnicas de fotografía aérea (Gottfried, 2003). Pero uno de los mayores avances se da durante la segunda guerra mundial cuando se realizan los primeros desarrollos en cámaras de reconocimiento, así mismo surgen nuevos sensores como el radar y los sistemas de comunicación. Estas innovaciones encuentran su principal aplicación en la exploración y control de los recursos naturales (Chuvienco, 1996).

Ya a finales de los años cincuenta durante la denominada guerra fría, el desarrollo de los sistemas de navegación generó un gran interés en la investigación de estos temas, dando paso al lanzamiento del satélite soviético Sputnik (1957), este acontecimiento marcó el inicio de una serie de misiones militares y civiles encaminadas a la exploración del planeta (Gottfried, 2003; Chuvienco, 1996). En 1960 la NASA pone en órbita el primer satélite de la serie *TYROS*, pionero en misiones de observación meteorológica. La NASA interesada en la obtención de datos, adquiere fotografías durante las misiones Apolo y en el Apolo-9 se instala el primer experimento multispectral. Todas estas experiencias permiten que en 1972 se realice el lanzamiento del primer satélite de la serie *Landsat*.

Una de las definiciones más acertadas para los sensores remotos es la concebida por *Richie and Rango* 1996 “los señores remotos han sido definidos como la ciencia y el arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno a través de análisis adquiridos de datos por sensores que no están en contacto directo con el objetivo de investigación” (Chuvienco, 1996).

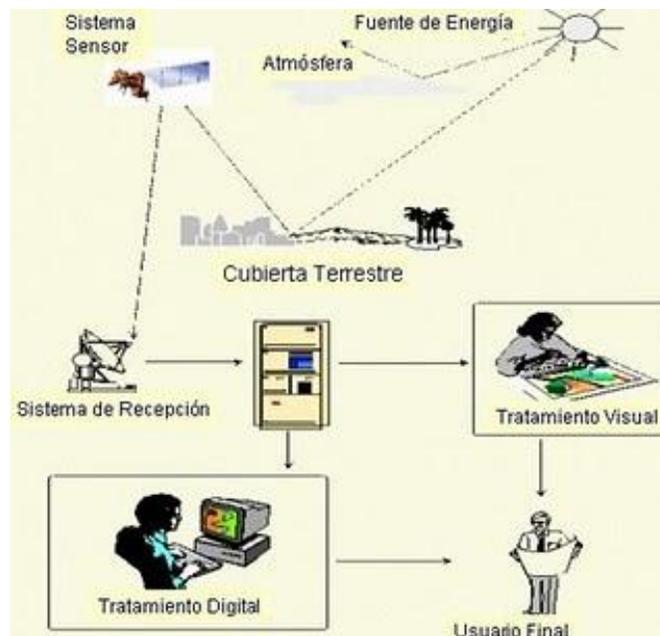
Un sistema de percepción remota está constituido por los siguientes elementos (Gottfried, 2003):

- Una fuente de energía, que supone un creador de la energía que el sensor está detectando, puede tratarse de un actor externo en cuyo caso se habla de percepción remota pasiva, o si es emitida por el sensor se habla de percepción remota activa, la fuente más importante de energía es el sol.
- Objetivo o coberturas del suelo, las cuales reflejan la energía generada por la fuente, cada una dependiendo de sus características propias.
- Sistema sensor que tiene el trabajo de captar la energía procedente de la cobertura del suelo y enviarla al centro de recepción.
- Centro de recepción, donde se recibe la información enviada por el sensor, se graba en un formato adecuado y luego se distribuye a los usuarios.

- Intérprete o usuario final que es el encargado de analizar la información, comúnmente en forma de imágenes digitales para determinar su clave temática.

Entre algunas de las principales aplicaciones de la percepción remota se tiene (Chuvieco, 1996):

- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de impactos ambientales.
- Control del movimiento de Iceberg en zonas polares.
- Inventario del agua superficial.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña.
- Verificación de contenidos de salinidad en las corrientes de agua.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o erosión.
- Realización de inventarios forestales.



**Figura 5.** Principio de Percepción Remota (Gottfried, 2003)

La percepción remota es un conjunto de conocimientos y técnicas utilizados para determinar características físicas y biológicas de objetos a través de datos adquiridos por un sensor que no está en contacto directo con el objeto de estudio, estos sensores remotos son dispositivos que pueden captar la radiación del espectro electromagnético con el fin de caracterizar el paisaje (Pérez, 2005). Con el avance de la ciencia se ha logrado ampliar el rango en el espectro

electromagnético para la obtención de información, dando por ejemplo, sensores remotos de tipo térmico y medidores de microondas (Chuvieco, 1996).

## 2.1. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

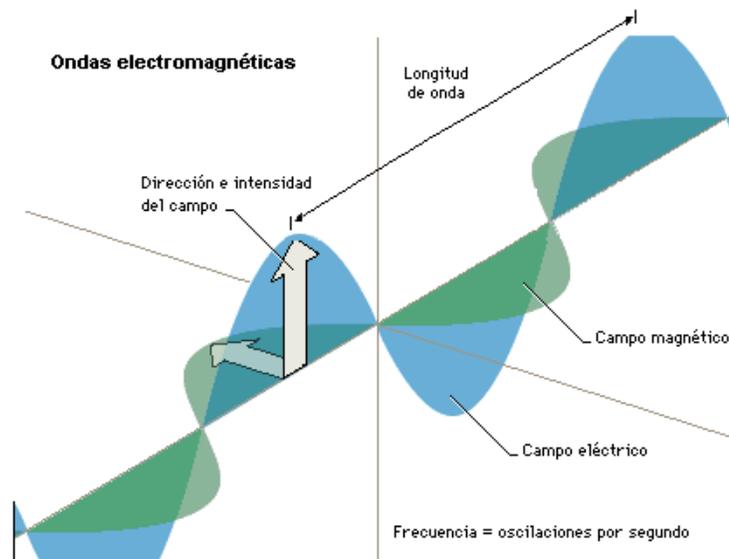
Como ya se había mencionado, todos los sistemas de percepción remota constan de los siguientes elementos: sensor, objeto y fuente de energía, la cual es la responsable de la interacción entre los objetos y puede ser representada por una fuente externa como el sol. Las tres formas de adquirir información mediante los sensores remotos son: reflexión, emisión y emisión-reflexión (Chuvieco, 1996).

Sin importar cual sea el caso, el flujo energético entre la cobertura del suelo y el sensor remoto, constituye una forma de radiación electromagnética, que interactúa de forma primaria en los procesos de percepción remota. Este fenómeno ha sido descrito a lo largo de la historia por dos teorías: haz ondulatorio u onda (Hyugens, Maxwell) y unidades discretas o partículas (Planck, Einstein) (Beiser, 1988).

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. Este flujo es descrito en función de la longitud de onda y la frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\nu$  es la frecuencia.



**Figura 6.** Onda de radiación electromagnética (Castañeda, 1987)

La radiación electromagnética de origen solar es afectada por partículas y gases que se encuentran en la atmósfera a través de los procesos de transmisión, absorción, dispersión y reflexión.

### 2.1.1. Ventajas del proceso de la percepción remota

La percepción remota desde satélites tiene varias ventajas, entre las cuales se encuentra la reducción del tiempo invertido en los trabajos de investigación y de los costos, otras de las ventajas ofrecidas son (Chuvienco, 1996; Gottfried, 2003; Pérez, 2005):

- Debido a las características orbitales de los satélites, se pueden obtener imágenes repetitivas de la gran mayoría de la Tierra, en especial de áreas a las cuales es imposible acceder por otros medios, como es el caso de algunas zonas polares y desérticas. La dimensión global que aportan estas imágenes resultan de gran trascendencia en la gran tarea de entender los procesos que afectan el medio ambiente de nuestro planeta, para esto es indispensable contar con una observación cíclica y permanente ya que buena parte de estos fenómenos tienen un gran dinamismo.
- Debido a la altura orbital de los satélites, se tiene una visión en conjunto de grandes espacios de objeto de estudio y su entorno, lo que facilita su análisis por grupos multidisciplinarios y la realización de estudios más eficientes. Es importante anotar que esta vasta superficie es detectada casi instantáneamente y por el mismo sensor, permitiendo una perfecta comparación.
- Los sensores óptico-electrónicos facilitan el acceso a imágenes sobre regiones no visibles para el ojo humano e incluso para la fotografía convencional, algunos ejemplos son el infrarrojo medio y térmico e incluso las microondas. Gracias a esta facilidad se puede obtener una valiosa información para estudios medioambientales y clasificación de coberturas del suelo que reflejan de un modo diferente en cada región del espectro.
- Las imágenes son obtenidas en formato digital lo cual agiliza el proceso de interpretación y permite generar modelos cuantitativos e integrarlos con otro tipo de información geográfica. Esto no implica, naturalmente, que se considere a la percepción remota como lo mejor para detectar cualquier problema que afecte el medio ambiente, simplemente es una información que se complementa con otras técnicas convencionales, como la fotografía aérea, y no invalida la importancia del trabajo de campo.

Dentro de todas las ventajas que puedan ofrecer los diferentes sensores remotos es importante tener en cuenta la escogencia de los mismos según el objeto de estudio y sus requerimientos, entre estos se encuentran la cantidad de bandas espectrales, los requisitos espaciales y el cubrimiento espacial y temporal.

A continuación se describen las principales bandas espectrales descritas por los sensores remotos con sus respectivas aplicaciones.

**Tabla 3.** Aplicaciones de las diferentes bandas espectrales (Chuvieco, 1996)

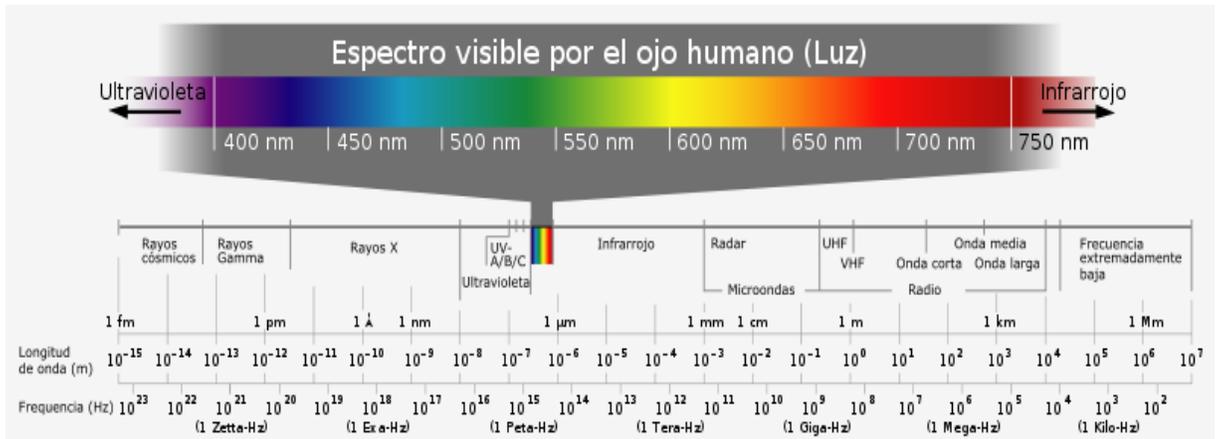
<b>Banda Espectral (<math>\mu m</math>)</b>	<b>Aplicaciones</b>
Azul (0.45-0.5)	Penetración del agua, uso de la tierra, características de la vegetación, sedimentación
Verde (0.5-0.6)	Reflexión verde de la vegetación sana
Rojo (0.6-0.7)	Discriminación de la vegetación por la absorción de la clorofila
Pancromática (0.5-0.75)	Trazado del uso de la tierra
Infrarrojo reflectivo (0.75-0.9)	Biomasa, identificación de cultivos, límites de tierra y agua
Infrarrojo medio (1.5-1.75)	Cantidad de vegetación, zonas áridas, nubosidad, hielo, nieve
Infrarrojo medio (2-2.35)	Geología, formación de rocas
Infrarrojo térmico (10-12.5)	Diferenciación temperatura, descargas térmicas, clasificación de la vegetación, inercia térmica
Microonda de onda corta (0.1-5cm)	Cubrimiento de la nieve, profundidades, contenido de agua en la vegetación
Microonda de onda larga (5-24cm)	Medidas del suelo, límites entre tierra y agua, penetración de la vegetación

Además de todo lo anterior, los sensores remotos también presentan una resolución temporal, esto varía también de acuerdo al tipo de sensor remoto, de la base en la tierra y el sistema de radares, puede ser en cuestión de minutos, horas o días en las que se obtiene la información procedente del sensor (Chuvieco, 1996).

### 2.1.2. El Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético es una sucesión de longitudes de onda continua o radiación electromagnética que es emitida o absorbida por cierta sustancia. Esta radiación sirve para identificar una sustancia de un modo análogo a lo que se hace con una huella dactilar (Beiser, 1988).

Cualquier tipo de energía radiante se puede identificar en función de su longitud de onda o frecuencia. Existe una gama de bandas donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar, la distribución de estas bandas se conoce como espectro electromagnético y comprende tanto longitudes de onda cortas como los rayos gamma hasta longitudes kilométricas como las telecomunicaciones (Castañeda, 1987).



**Figura 7.** Espectro Electromagnético (<http://www.cientec.or.cr>)

### 2.1.3. Principios de Radiación Electromagnética

Aunque muchas características de la radiación electromagnética se describen fácilmente con la teoría ondulatoria, no se puede olvidar ni dejar de un lado la naturaleza corpuscular de la radiación descrita por la teoría cuántica (Beiser, 1988). Esta teoría establece que la radiación está compuesta de muchos elementos discretos denominados cuantos o fotones. La energía  $E$  (en *Joules*) de cada uno de estos elementos viene dada por:

$$E = h\nu \quad (2)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ )

Si se relacionan las dos teorías de la radiación electromagnética, mediante la frecuencia, se puede obtener:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Esta ecuación indica que la energía de un cuanto es proporcional a su longitud de onda, es decir, a longitudes de onda más largas menor cantidad de energía (Castañeda, 1987). Esto tiene implicaciones muy importantes en la percepción remota, de forma que la radiación de ondas largas como las microondas, que emiten los distintos cuerpos naturales de la superficie de la Tierra es mucho más difícil de detectar que la radiación de ondas más cortas como el infrarrojo térmico (Chuvienco, 1996). Así pues, en general, los sistemas detectores que operen a longitudes de onda largas deben observar por un instante de tiempo determinado, áreas de la Tierra lo suficientemente grandes para que se pueda recibir una señal de energía detectable por los sensores (Chuvienco, 1996).

El sol es la mayor fuente de radiación electromagnética para la percepción remota. Sin embargo, se debe recordar que toda materia a temperatura superior al cero absoluto, emite continuamente radiación electromagnética. Así, todos los objetos terrestres (mares, suelos, vegetación, ciudades, entre otros), son también fuentes de radiación, aunque lógicamente de magnitud y composición espectral muy diferente a la del Sol (Fontal, 2005).

La energía que radia un cuerpo por unidad de superficie está en función de la temperatura de dicho cuerpo. Esta propiedad se expresa por la ley de Stefan-Boltzman, que establece (Beiser, 1988):

$$M = \sigma T^4 \quad (4)$$

Donde  $M$  es la emitancia radiante ( $W/m^2$ ),  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman ( $5.6697 \cdot 10^8 W/m^2 K^4$ ) y  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo que emite ( $K$ ). La conclusión importante que se debe extraer de esta expresión es que la energía total emitida por un cuerpo varía con  $T^4$ , y por lo tanto se incrementa rápidamente cuando aumenta la temperatura (Beiser, 1988). Otra consideración a tener en cuenta es que esta ley supone que el cuerpo que emite se comporta como un cuerpo negro, que es un radiador ideal que emite toda la energía que absorbe.

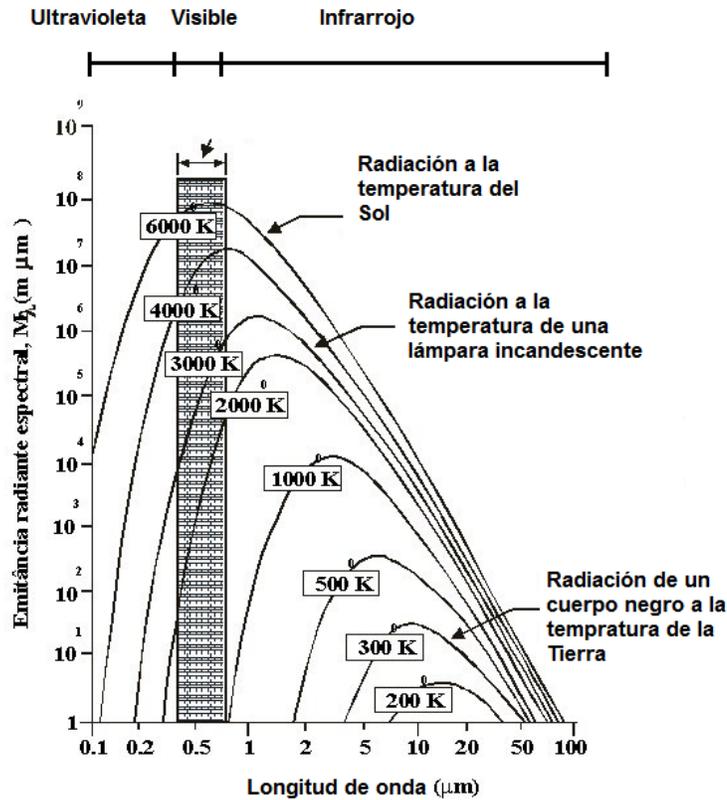
La emitancia radiativa ( $M_\lambda [W / m^2 \mu m^1]$ ) de un cuerpo negro a manera general, viene dada por la ley de Planck, tal que (Castañeda, 1987):

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} \quad (6)$$

En conclusión la ecuación de Planck señala que cualquier objeto a una temperatura superior al cero ( $-273K$ ), radia energía y ésta aumenta proporcionalmente con la anterior, así mismo de las fórmulas descritas anteriormente se puede calcular la emitancia total y espectral si se conoce la temperatura (Beiser, 1988; Castañeda, 1987).

Cuando un cuerpo es calentado emite radiación electromagnética en un amplio rango de frecuencias. El cuerpo negro (ideal) es aquel que además absorbe toda la radiación que llega a él sin reflejarla, de tal forma que sólo emite la correspondiente a su temperatura (Beiser, 1988). A fines del siglo XIX fue posible medir la radiación de un cuerpo negro con mucha precisión. La intensidad de esta radiación puede en principio ser calculada utilizando las leyes del electromagnetismo. El problema de principios del siglo XX consistía en que si bien el espectro teórico y los resultados experimentales coincidían para bajas frecuencias (infrarrojo), estos diferían radicalmente a altas frecuencias. Este

problema era conocido con el provocativo nombre de “la catástrofe ultravioleta”, ya que la predicción teórica diverge a infinito en ese límite (Beiser, 1988).

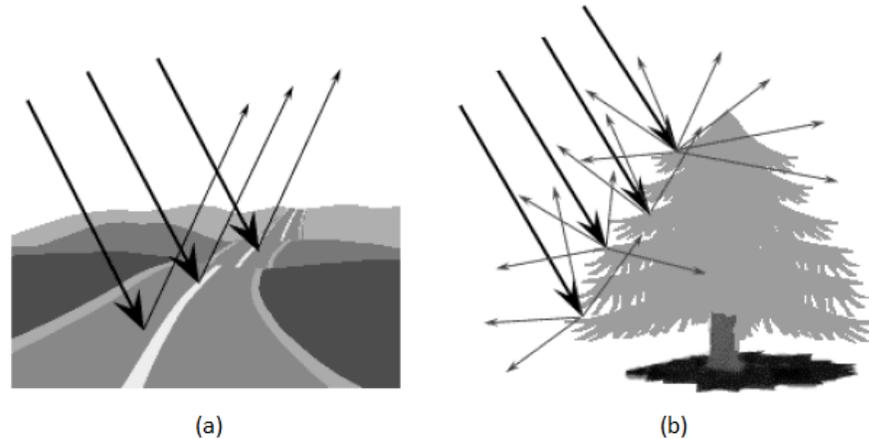


**Figura 8.** Distribución espectral de la emisión de un cuerpo negro. Tener en cuenta que los dos ejes son logarítmicos (*United State Geological Survey*)

#### 2.1.4. Reflexión

En la percepción remota, existe un interés muy particular en medir la energía reflejada de los blancos, que llegan a los detectores a bordo de un satélite o un avión. La reflexión de la energía depende del grado de rugosidad de la superficie del blanco en relación con la longitud de onda de la energía incidente sobre ésta (Chuvieco, 1996). Cuando lo rugoso de la superficie (o la variación de altura) es pequeño en comparación con la longitud de onda de la radiación, la superficie actúa como un espejo donde la energía incidente es dirigida lejos de la superficie en un ángulo igual al ángulo de incidencia, este tipo de reflexión es llamado reflexión especular (Hetch, 2000). El otro caso extremo ocurre cuando la superficie es muy rugosa, por ejemplo, las grandes variaciones de altura de la superficie son mucho más grandes que las longitudes de onda de la radiación. En este caso la radiación es reflejada uniformemente en todas las direcciones, este tipo de reflexión es llamado reflexión difusa (Hetch, 2000). La mayoría de la fisonomía de la Tierra se ubica entre estos dos extremos.

Por lo general, el interés radica en medir la reflexión difusa de objetos a intervalos de una longitud de onda específica. La reflexión característica de la fisonomía de la superficie de la Tierra puede ser cuantificada por mediciones de porciones de la energía incidente, que es reflejada como una función de la longitud de Onda (Hetch, 2000).



**Figura 9.** (a) Reflexión Especular, (b) Reflexión Difusa (Egan, 2004)

La gran mayoría de la energía solar devuelta al espacio y observada por los sensores de los satélites, se encuentra en la banda visible. En esta región las propiedades de reflectividad de la tierra y de la atmósfera son fundamentales. El cociente entre la energía reflejada y la radiación incidente es conocido como reflectancia y puede cambiar dependiendo de varios factores (Chuvienco, 1996):

- El ángulo con que incide la iluminación procedente del Sol, que a su vez es muy dependiente de las coordenadas geográficas de lugar, de la época del año, de la hora, del momento en que pasa el satélite.
- Ángulo formado entre el sol y el objeto de estudio con respecto a la superficie-satélite, lo cual induce cambios debido a orientaciones de ladera o pendientes.
- De los cambios que experimente la propia superficie reflectora. Por ejemplo, el agua del mar en calma puede actuar como un espejo frente a situaciones de fuerte oleaje. Si la superficie de estudio es una nube, reflejarán más las que estén formadas por gotas grandes y más concentradas que las de gotas pequeñas y menos concentradas.

#### 2.1.5. Dispersión

Cuando la radiación electromagnética incide sobre una partícula o molécula de gas presente en la atmósfera, ésta puede extraer una porción de energía de esta onda incidente, mientras que el resto permanece inalterado (Hetch, 2000). La

porción de energía tomada puede ser reemitida en cualquier dirección. A este fenómeno se le conoce como dispersión, difusión o esparcimiento, la cual depende específicamente del tamaño de la partícula. Según el tamaño se tienen (Chuvieco, 1996; Hetch, 2000; Egan, 2004):

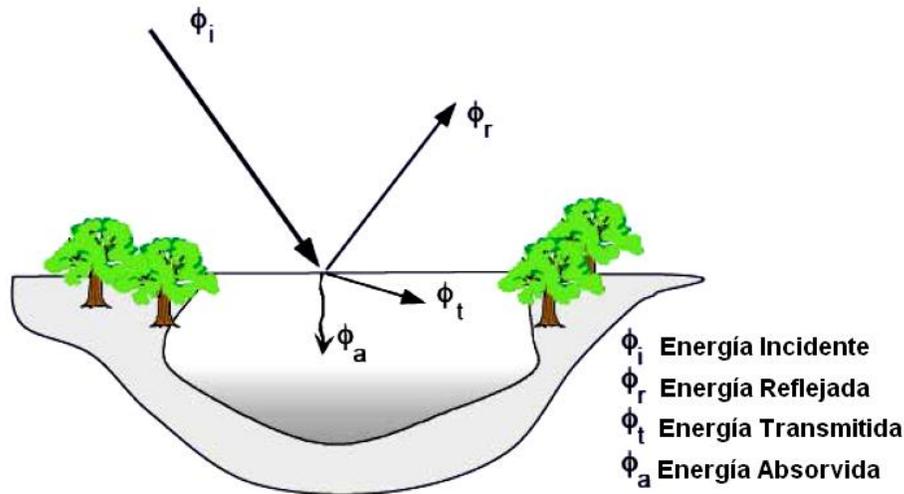
- Dispersión Rayleigh: En este caso el tamaño de las partículas es mucho menor que la longitud de onda incidente. Estas partículas son, generalmente moléculas de oxígeno o nitrógeno que se encuentran en la atmósfera. Las longitudes de onda cortas son mucho más dispersadas que las largas. Este tipo de dispersión es el dominante en las partes altas de la atmósfera. El hecho de que el cielo aparezca azul durante el día se debe precisamente a este fenómeno. La luz solar interactúa con las moléculas de la atmósfera dispersándose de forma más efectiva las longitudes de onda cortas (azul). Sin embargo, al atardecer o al amanecer, la luz solar atraviesa un camino atmosférico mucho más largo, y aunque también tiene lugar este tipo de dispersión, se produce una mayor absorción de dichas longitudes de onda corta, por lo que finalmente los que prevalecen a esas horas son los rojos y naranjas. Este tipo de dispersión es uno de los causantes más importantes de la falta de contraste en las imágenes.
- Dispersión Mie: Cuando las partículas son del mismo tamaño o algo más grandes que las longitudes de onda incidentes, tiene lugar este tipo de dispersión. Como ejemplo de estas partículas se tienen: partículas de polvo del desierto, polen, humo, entre otros. La dispersión de Mie tiende a afectar longitudes de onda más largas que las afectadas por la dispersión de Rayleigh. La dispersión de Mie ocurre sobre todo en las porciones más bajas de la atmósfera, donde son más abundantes las partículas más grandes (Villegas, 2004).
- Cuando las partículas de aerosol en la atmósfera son mucho más grandes que la longitud de onda de la radiación, la dispersión no selectiva ocurre. Las gotitas de agua y las partículas de polvo grandes pueden causar este tipo de dispersión. La dispersión no selectiva toma su nombre del hecho de que todas las longitudes de onda están dispersadas igualmente. Este tipo de dispersión hace aparentar la niebla y las nubes blancas a nuestros ojos, porque la luz azul, verde, y roja se dispersa toda en cantidades aproximadamente iguales (Villegas, 2004).

## **2.2. INTERACCIÓN TIERRA-RADIACIÓN**

Cuando la energía de la radiación entra en contacto con la superficie terrestre, esta presenta cuatro diferentes comportamientos (Gottfried, 2003; Lira, 2002):

- Parte será reflejada con ángulo similar al de incidencia
- Parte será reflejada uniformemente hacia todas las direcciones

- Parte será absorbida por el objeto y se calentara, luego esta será reflejada en la banda térmica hasta que se enfríe.
- Parte es transmitida a otros objetos o a la superficie de la tierra sin ser reflejada hacia el sensor.



**Figura 10.** Interacción Tierra-Radiación (Gottfried, 2003)

La suma de la absorción, reflectividad y transmisividad debe ser igual a 1, y cada una de ellas depende de las características de la superficie en estudio (Gottfried, 2003).

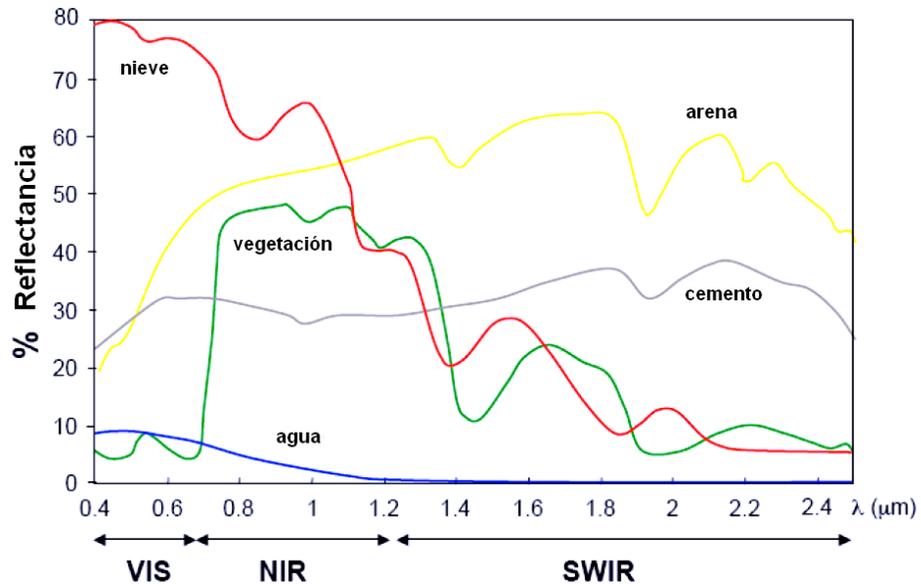
### 2.3. INTERACCIÓN ATMÓSFERA-RADIACIÓN

La radiación solar se origina en la fotosfera, sin embargo, antes de salir del sol tiene que atravesar otras dos capas: la cromosfera y la corona. Los gases en estas capas absorben parte de esta radiación y la reemiten de acuerdo a la temperatura que tienen (Chuvieco, 1996). Después de dejar la atmósfera solar la energía viaja 150 millones de Km hasta la Tierra. Debido a que el ángulo sólido sustentado por el sol con respecto a la Tierra es muy pequeño se considera que la radiación solar incide sobre la cima de la atmósfera en la misma dirección (Chuvieco, 1996).

Como se conoce, la atmósfera está compuesta por gases (anhidro carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno, argón y vapor de agua), estos gases provocan que la energía solar disminuya en su llegada a la superficie terrestre, de donde se definen los siguientes tres fenómenos (Chuvieco, 1996):

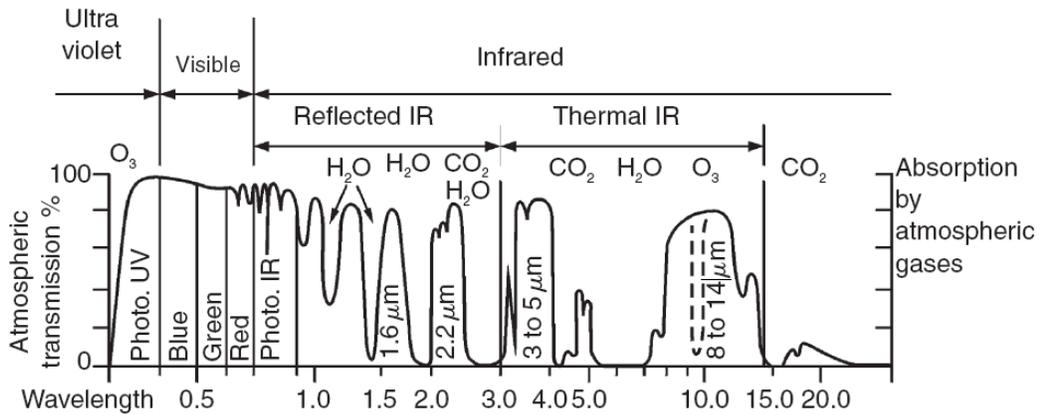
- **Absorción:** el fenómeno es provocado en la atmósfera, por las moléculas que absorben energía en las diferentes longitudes de onda. El resultado final de la absorción es que la energía es atenuada o perdida. El ozono, el dióxido de carbono, y el vapor de agua son los tres componentes

atmosféricos principales que absorben la radiación. El primero, absorbe la radiación ultravioleta dañina del Sol.



**Figura 11.** Curvas de reflectividad (Gottfried, 2003)

El dióxido de carbono, designado un gas de invernadero, tiende a absorber fuertemente la radiación en la porción infrarroja del espectro que sirve para atrapar este calor dentro de la atmósfera.



**Figura 12.** Ventana Atmosférica (Egan, 2004)

Finalmente, el vapor de agua en la atmósfera absorbe mucha de la radiación que ingresa de las ondas largas infrarrojas y las ondas cortas de microondas. La presencia de vapor de agua en la parte baja de la atmósfera varía fuertemente de un lugar a otro y en las diferentes épocas del año.

Estos gases absorben energía electromagnética en regiones muy específicas, y determinan las regiones del espectro para los propósitos de

la percepción remota. Las áreas del espectro que no son seriamente influenciadas por la absorción atmosférica, (áreas espectrales, en donde la radiación es totalmente transmitida a través de la atmósfera), son usadas por los sensores remotos, y son llamadas ventanas atmosféricas.

- **Dispersión:** Causa cambios en la dirección y la intensidad de la radiación. Cuánta dispersión ocurre depende de varios factores, incluyendo la longitud de onda de la radiación, de la abundancia de partículas o de gases, y la distancia que la radiación viaja a través de la atmósfera. En general, la dispersión disminuye al aumentar la longitud de onda de la radiación. Hay tres tipos de dispersión que pueden ocurrir:

**La dispersión de Rayleigh.**

**La dispersión de Mie.**

**La dispersión no selectiva.**

- **Emisión:** debido a que la atmósfera también emite radiaciones de temperatura, la emisión atmosférica resulta fundamental cuando se desea trabajar en el infrarrojo térmico. Para mitigar un poco este comportamiento, se han diseñado en los satélites dos bandas para trabajar en el infrarrojo térmico.

### **3. INSTRUMENTACIÓN SATELITAL DE PERCEPCIÓN REMOTA**

Como ya se había definido en el capítulo anterior, un sistema de percepción remota requiere como mínimo de tres elementos: fuente de energía, objetivo terrestre y sensor. A continuación se aborda la temática referida al estudio de las características del sensor y de la plataforma que lo sustenta.

#### **3.1. SENSORES REMOTOS**

Los sensores remotos han llegado a tener gran importancia en la actualidad debido a que permiten capturar información de cualquier objeto en la superficie terrestre, marítima y atmosférica, sin tener un contacto directo con ellos, su empleo en aplicaciones sobre el manejo de recursos naturales proporciona información confiable sobre superficies extensas con alta precisión y costos razonables. El uso de sensores remotos ha jugado un papel importante en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y superficies, ordenamiento territorial y estudios urbanos. La tendencia actual está orientada hacia el crecimiento de su utilización dado el gran avance tecnológico en cuanto al desarrollo de la computación y bajos costos de obtención de las imágenes.

Una imagen satelital es un arreglo de puntos (equivalente a una fotografía digital), capturada por un sensor montado a bordo de un satélite que orbita alrededor de la Tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita, hace un “barrido” de la superficie con un conjunto de detectores que registran la energía reflejada (Chuvieco, 1996; <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geographymatters.pdf>).

La percepción remota hace uso de las imágenes de satélite como un insumo de datos para extraer información del medio geofísico y geográfico. El número de bandas, las regiones del espectro electromagnético en las cuales éstas se encuentran localizadas, la resolución y el tamaño de las imágenes producidas por los diferentes satélites es variado (Röder, 2009). Dentro de las características mencionadas anteriormente, es importante destacar el concepto de resolución, que implica 4 manifestaciones: espacial, espectral, temporal y radiométrica (Röder, 2009).

La resolución espacial se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen de satélite. Es la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en unidades de longitud, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie. Esa

distancia corresponde al tamaño mínimos de información incluida en la imagen, que se denomina píxel y es la medida más generalizada de la resolución espacial, que se encuentra estrechamente relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de la información obtenida (Chuvieco, 1996; Lira, 2002; Röder, 2009).

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, generalmente la menor resolución corresponde al radar y a los sistemas fotográficos, mientras que para los sensores óptico – electrónicos, se cuenta con un amplio rango de bandas, que da origen al término de imágenes multiespectrales (Chuvieco, 1996; Lira, 2002; Röder, 2009). Es importante tener en cuenta que la escogencia del número y rango de las bandas, depende exclusivamente de los objetivos del diseño que se desea desarrollar (Chuvieco, 1996; Lira, 2002; Röder, 2009).

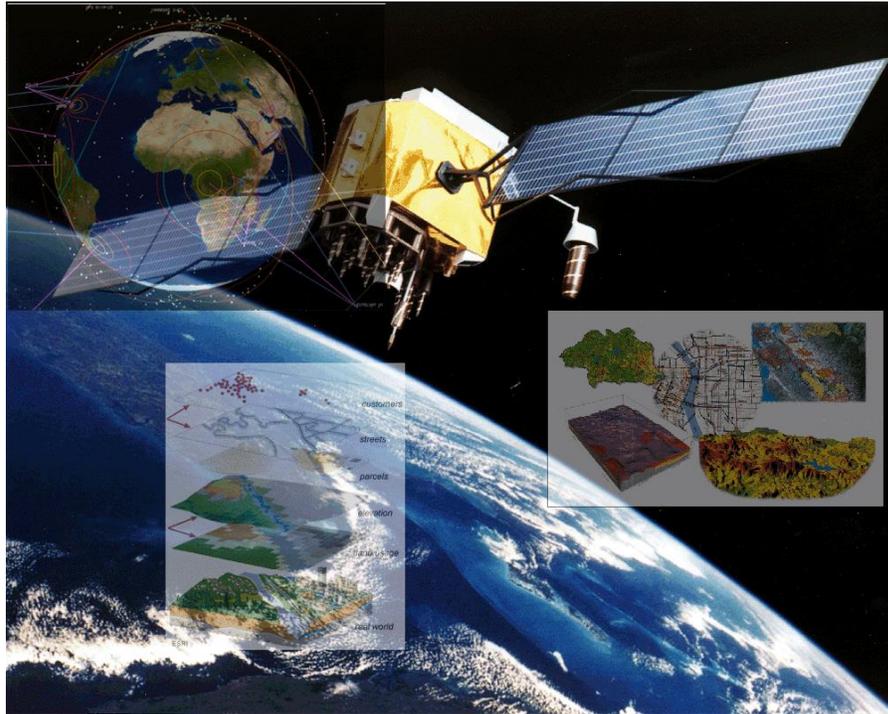
La resolución temporal se refiere a la periodicidad con la que un sensor remoto proporciona “recorre” un punto determinado de la Tierra, esto resulta ser dependiente de la órbita de la plataforma, así como de las características de diseño del sensor, existen sensores capaces de entregar información cada 30 minutos, pero también existen algunos como el Landsat que pueden tardar hasta 20 días en enviar los datos obtenidos (Chuvieco, 1996; Lira, 2002; Röder, 2009).

Finalmente la resolución radiométrica se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radianza espectral que recibe el sensor. En el caso de los sistemas óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión análoga-digital realizada a bordo del satélite. El número de valores incluye ese rango, es decir, el número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor. Actualmente la mayor parte de los sensores ofrecen una resolución de 8 bits, es decir, 256 niveles por píxel (Chuvieco, 1996; Lira, 2002; Röder, 2009).

Las imágenes de satélite, se encuentran en formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles, en donde cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia; ejemplificando, si la resolución espacial de la imagen es de 30 metros, cada píxel muestra un área en la superficie terrestre de 30x30 metros, con esto, la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900m<sup>2</sup> será promediada para darle su valor digital al píxel (Röder, 2009). La información contenida en cada píxel está en formato digital, normalmente de 8 bits ( $2^8=256$ ) en una imagen en blanco y negro, en donde el 0 corresponde al color negro, 255 al color blanco y se encuentran 254 distintos tonos de gris intermedios (Röder, 2009).

Los sensores remotos se clasifican generalmente en dos grupos, los de percepción activa y los de percepción pasiva. Los sensores de percepción activa son los encargados de obtener información de la energía electromagnética proveniente de fuentes artificiales para grabarla y analizarla, la característica

primordial de los sensores activos es la capacidad de proporcionar el haz energético que luego capta tras su reflexión sobre la superficie a observar (Chuvienco, 1996). Para el caso de la percepción remota en general, este tipo de sensores no es el más común o el más utilizado, y se debe prestar mayor atención a los sensores de percepción pasiva (Prasad *et al*, 2011).



**Figura 13.** Percepción Remota (<http://esosps.nasa.gov>)

Un sensor de percepción pasiva, es el encargado de obtener la información de la energía electromagnética proveniente de fuentes naturales que son reflejadas por la superficie de la tierra, estos se distribuyen en tres grupos bien diferentes: los fotográficos, los óptico-electrónicos y los de antena (Chuvienco, 1996; Prasad *et al*, 2011). En el primer grupo están las cámaras fotográficas, en el segundo los exploradores de barrido, de empuje y las cámaras de “vidicon” y en el tercero los radiómetros de microondas.

Las subcategorías más destacadas son las de barrido y empuje:

- Sensores de barrido (*scanners*): un espejo móvil permite explorar una franja del terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por éste componente óptico, se dirige a una serie de detectores que la amplifican y la convierten en una señal digital. Los más utilizados han sido los incluidos en los programas Landsat (*MSS: Multispectral Scanner* y *TM: Thematic Mapper*) y *TIROS-NOAA (AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer)* (<http://www.gdsig.com.ar>).

- Sensores de empuje (*pushbroom*): se elimina el espejo oscilante gracias a disponer de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor. Están incorporados a varios proyectos como en el caso del satélite francés *SPOT* y del indio *IRS-1* (<http://www.gdsig.com.ar>).

### 3.2. BANDAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

Entrando un poco más a fondo acerca del significado de resolución radiométrica en un sensor remoto, es importante estudiar las diferentes bandas o los diferentes rangos del espectro electromagnético en los cuales operan todos los satélites que se encuentran actualmente en el espacio. Es importante aclarar que no todos los sistemas de percepción remota trabajan en todos los rangos y es aquello lo que marca la diferencia entre un satélite y otro, así como la plataforma de la cual se obtendrán las imágenes para realizar un cierto estudio.

#### 3.2.1. Percepción remota del Infrarrojo Cercano y el Visible

El hecho de poder reconocer este rango del espectro electromagnético, se debe a una percepción remota de tipo pasivo, donde la información se logra obtener a partir de la reflectancia de los objetos, estos equipos capturan en forma digital la información, generalmente en más de una banda con el factor de que en estas longitudes de onda ( $0.4-0.9 \mu m$ ), es limitada la penetración de los cuerpos sólidos, aunque tanto en la vegetación como en los suelos, resulta fácil discriminar sus características, por esta razón, la mayor aplicación del reconocimiento del espectro visible e infrarrojo cercano, han sido las investigaciones ambientales en donde se ha logrado el monitoreo de agua, la verificación del estado de la vegetación, identificación de suelos y rocas, así como el estado actual de la nieve (Chuvieco, 1996; Lira, 2002).

Debido al gran avance tecnológico de las últimas décadas, hoy se puede encontrar una gran variedad de sensores remotos encargados de capturar imágenes en este rango del espectro, sin embargo, aún son muy utilizadas las cámaras fotográficas para realizar o identificar la cartografía, también son usados los *scanner* electro-ópticos con mecanismos de barrido (Lillesand, Kiefer, 2000).

#### 3.2.2. Percepción remota en el Infrarrojo Medio

Se puede considerar que se encuentra en el rango comprendido entre  $1-8 \mu m$ , y a diferencia del infrarrojo cercano y visible, en este espectro es posible obtener información de muestras sólidas. En algunas ocasiones, y según la definición de

los rangos que se dé, también se le puede llamar infrarrojo térmico, en realidad casi siempre se obvia esta definición y simplemente se habla de infrarrojo cercano y lejano (Skoog *et al*, 1992).

### 3.2.3. Percepción remota en el Infrarrojo Lejano

Al basarse en las leyes descritas por Planck y Wien, se puede fijar entre 8-14  $\mu m$  la banda espectral en donde se manifiesta con mayor claridad la emitancia de la superficie de la Tierra, debido a su temperatura (300K), este sector es también conocido como el infrarrojo térmico (Skoog *et al*, 1992). En el infrarrojo termal se utiliza la energía emitida por el propio objeto, de la cual el sensor capta la información gracias a la propiedad de los cuerpos con temperatura mayor al cero absoluto (0K) de radiar energía, este fenómeno de radiación varía según su emisividad entre longitudes de onda cortas y largas, así mismo depende de la hora del día (Skoog *et al*, 1992).

El agua es el elemento con mayor inercia térmica, propiedad que le permite estar más cálida de noche que de día, en el caso de la vegetación sus propiedades térmicas dependen de su estructura, densidad y otros, pero el mayor consumo de energía se da para el desarrollo de su proceso calorífico, esta energía es devuelta al medio durante la noche, lo que provoca temperaturas muy bajas durante el día. Los suelos secos poseen menor inercia térmica que los suelos húmedos, por lo cual tienen mayor temperatura en el día que en la noche (Skoog *et al*, 1992).

Debido a la larga longitud de onda de la radiación termal, la dispersión atmosférica es casi despreciable, pero, por esta misma razón la resolución espacial de los sensores de infrarrojo térmico, es menor comparada con los del visible (Chuvieco, 1996). La mayoría de estos sensores utilizan la tecnología de barrido mecánico, en donde la radiación emitida por el objeto es recibida por un detector fotoeléctrico previamente enfriado, esta información es capturada tanto de día como de noche y sus principales aplicaciones se encuentran en trabajos de operación militar y prevención de desastres (Skoog *et al*, 1992).

### 3.2.3. Percepción remota en la Zona de las Microondas

Hasta el momento se ha hablado de longitudes de onda bastante pequeñas que se encuentran en el orden de los  $\mu m$ , adicional a ese rango, se encuentra una banda del espectro que nace en las longitudes de onda de los milímetros que se denomina región de las microondas, se trata de las mayores longitudes utilizadas en la percepción remota (Skoog *et al*, 1992). La emisividad de las microondas del medio natural depende de las propiedades dieléctricas, la rugosidad de la superficie y la estructura interna. La percepción remota en esta banda implementa los dos tipos de percepción, la pasiva y la activa. Los sensores pasivos de esta

banda se conocen como radiómetros de microondas, poco utilizados y compuestos por una antena de alto alcance, un sistema de intercambio, una o varias fuentes de energía usadas para calibración, un filtro de banda, amplificadores y un detector, por el otro lado se encuentran los sensores activos, los cuales emiten un haz de microondas con el fin de capturar la reflexión emitida por el objeto en estudio, y se clasifican en dos, los que crean imágenes y los que las capturan, de los primeros se pueden encontrar los altímetros y escaterómetros, y en los últimos se encuentra el más conocido de todos el RADAR (*Radio Detection and Ranking*), el cual posee una gran resolución espacial (entre 10-100m) (Skoog *et al*, 1992).

### **3.3. SISTEMAS Y PLATAFORMAS SATELITALES**

Un sistema de percepción remota está compuesto básicamente por dos elementos, la plataforma o soporte y el sensor. Por definición, un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, que pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, entre otros (Chuvioco, 1996; Röder, 2009). Para medir estas variables en general, el sensor debe estar en contacto directo con el objeto de estudio; para el caso de sensores espaciales, se puede decir que se obvia esta característica y la variable de análisis es la radiación electromagnética dada en diferentes rangos del espectro. Según el rango del espectro abarcado por un sensor, se pueden encontrar dos tipos: multiespectrales y hiperespectrales (Röder, 2009).

Los sensores multiespectrales capturan imágenes con datos a una frecuencia específica a lo largo del espectro electromagnético. Las longitudes de ondas pueden ser separadas por filtros o por el uso de instrumentos que son sensibles a ciertas longitudes de onda, incluyendo aquellas del espectro visible. Las imágenes multiespectrales permiten extraer información adicional que el ojo humano es incapaz de percibir (Röder, 2009). Es importante tener en cuenta que en este tipo de sensores se cubre casi todo el espectro electromagnético, pero no de forma continua. Un ejemplo de estos sensores son los que se encuentran a bordo del satélite Landsat.

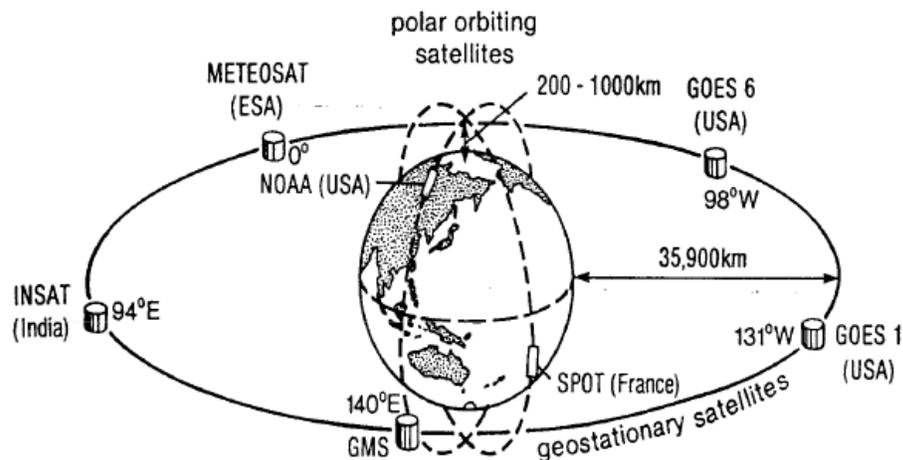
Por otra parte y en complemento a las tradicionales imágenes multiespectrales, algunos sistemas nuevos y experimentales como *AVIRIS* y *MODIS* tienen a bordo sensores hiperespectrales, que permiten la captura de imágenes con este tipo de información, estos sensores cubren longitudes de onda con un rango similar al de los sensores multiespectrales, pero en rangos mucho más pequeños y casi que continuos. Por supuesto esta característica incrementa el número de bandas (y su precisión) disponibles para la clasificación de imágenes (típicamente diez e incluso hasta cientos de bandas muy estrechas). En el caso del *MODIS*, se cuenta con 36

bandas tanto ópticas como termales (Chuvieco, 1996; <http://esospso.gsfc.nasa.gov>).

La plataforma es el medio por el cual el sensor se transporta y ubica para el desarrollo de su labor, estas pueden ser espaciales, aéreas o terrestres. Las terrestres son comúnmente camiones equipados para el manejo con gran exactitud del sensor remoto. Las aéreas son comúnmente aeroplanos con los cuales se realizan trabajos de reconocimiento de áreas de difícil accesibilidad. Las espaciales las conforman los satélites, los cuales son utilizados para lograr una mayor cobertura de la Tierra (Röder, 2009).

Desde el principio de los grandes avances tecnológicos, se ha considerado a los satélites como cuerpos encargados de cubrir un movimiento alrededor de un objeto de mayor tamaño. Existen los naturales, como las lunas, y los artificiales construidos por el hombre. Los sistemas satelitales están compuestos por un medio de comunicación con la Tierra, una fuente de poder y un sistema de control que coordina su labor (Röder, 2009).

La clasificación más importante de los satélites se presenta según la órbita en la que viajan, la órbita se ha definido como la trayectoria de movimiento de los satélites sobre la superficie terrestre, estas varían en términos de altitud y rotación respecto al movimiento planetario, de acuerdo a lo anterior se pueden observar dos tipos de satélites (<http://esospso.gsfc.nasa.gov>):



**Figura 14.** Órbita geoestacionaria y polar de algunos satélites (<http://esospso.gsfc.nasa.gov>)

- Sensores de órbita geoestacionaria: La órbita Geoestacionaria es aquella en la que el satélite siempre está en la misma posición con respecto a la Tierra (que rota). El satélite orbita a una altura de aproximadamente 35790 Km. porque esto hace que el periodo orbital (la duración de una órbita) sea

igual al periodo de rotación de la Tierra (23h 56m 4.09s). Al orbitar al mismo ritmo y en la misma dirección que la Tierra, el satélite está estacionario (sincronizado con respecto a la rotación de la Tierra). Los satélites geoestacionarios proporcionan un panorama de observación muy grande permitiendo cubrir los sucesos relacionados con el tiempo. Esto es especialmente útil para observar tormentas locales severas y ciclones tropicales. Debido a que la órbita geoestacionaria debe estar en el mismo plano que el de rotación de la Tierra denominado plano ecuatorial, proporciona imágenes distorsionadas de las regiones polares con baja resolución espacial.

- **Sensores de órbita polar:** La órbita Polar es aquella en la que el satélite sigue un plano paralelo al eje de rotación de la tierra pasando sobre los polos y perpendicular al Ecuador. Los satélites que vuelan en órbitas polares proporcionan una visión más global de la Tierra, girando con una inclinación (ángulo entre el plano ecuatorial y el plano de la órbita del satélite) cerca de la polar (una verdadera órbita polar tendría una inclinación de 90 grados). Orbitando a una altura de 700 u 800 Km, estos satélites cubren de mejor forma las partes del mundo más difíciles de cubrir in situ (en el sitio). Estos satélites operan en una órbita sincronizada con el sol. El satélite pasa cada día el ecuador y cada latitud a la misma hora solar local, lo cual quiere decir que el satélite pasa por encima de nuestras cabezas a la misma hora solar a lo largo de todas las estaciones del año. Esta característica permite recolección regular de datos en horas consistentes así como comparaciones a largo plazo. El plano orbital de una órbita sincronizada con el sol debe también rotar aproximadamente un grado al día para mantenerse con respecto a la Tierra.

Hay muchos satélites en operación hoy en día que colectan imágenes que posteriormente es distribuida a los usuarios. Los más comunes se describen en la Tabla 4. Como ya se había mencionado antes, cada tipo de satélite ofrece características específicas que los hacen más o menos apropiado para una aplicación en particular.

### **3.4. LANDSAT**

El primer satélite puesto en órbita para la evaluación de los recursos terrestres por la agencia espacial norteamericana fue lanzado en el mes de julio de 1972, dando inicio con esto, a una nueva era en la forma de captar información sobre los recursos terrestres (<http://landsat.usgs.gov/>). Esta familia de satélites, denominada *Landsat* a partir del segundo lanzamiento en 1975 y tres adicionales en el periodo 1978-1984, han constituido uno de los proyectos más fructíferos en percepción remota, la buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de las

observaciones que realizan y su buena comercialización, explican su gran empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo (<http://landsat.usgs.gov/>).

**Tabla 4.** Comparación de los satélites más utilizados con sus respectivas características (<http://www.gdsig.com.ar>)

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal
LANDSAT	MSS	80m	4 bandas	16 días
	TM	30m	7 bandas	16 días
SPOT	XS	20m	3 bandas	26 días
	P	10m	1 banda	26 días
NOAA	AVHRR	1.1Km	5 bandas	12 horas
		4Km	2 bandas	12 horas
IKONOS		1m	4 bandas	2 días

De los cinco satélites Landsat enviados al espacio, los tres primeros tenían una forma similar a la de mariposa, debido a su disposición de los paneles solares. Su órbita era helio síncrona polar, ligeramente inclinada ( $99.1^\circ$ ), con una altura orbital de 917Km circundaban la Tierra cada 103 minutos, que equivalen a 14 órbitas diarias para volver a la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre 9:30 y 10:30am) (<http://www.gdsig.com.ar>).

El Landsat 4 y 5 modificaron su fisionomía y sus características orbitales. La altura de vuelo se redujo de 917 a 705Km, se mejoró el ciclo de recubrimiento a 16 días, esto, debido a un menor período orbital, el cual es 98.9 minutos. De todos los satélites mencionados hasta el momento, solo se encuentra en funcionamiento el *Landsat 5*, que tenía a bordo un sensor denominado *MSS (Multy Spectral Scanner)* (<http://landsat.usgs.gov/>).

El *Landsat 6* se lanzó en 1993 pero por fallos de comunicación con la plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió. Este fracaso y el dudoso éxito de la gestión privada hicieron temer por el futuro de estos satélites. No obstante, se inicia el proyecto *Landsat 7* bajo un programa en el que participan 3 agencias: la NASA, responsable del desarrollo y lanzamiento del satélite y del sector de tierra, la NOAA se encarga de su operación y mantenimiento durante todo el tiempo de vida del satélite, y la USGS recoge, procesa y distribuye los datos y se encarga de mantener el archivo de datos (<http://landsat.usgs.gov/>).

El *Landsat 7* es el satélite operacional más reciente del programa Landsat, fue lanzado en abril de 1999 con un nuevo sensor denominado *ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)*. Una imagen *Landsat 7 ETM+*, está compuesta por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Entre las principales mejoras técnicas respecto de su antecesor, el *Landsat 5*, se destaca el añadido de una banda espectral pancromática con resolución espacial de 15m.

También cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60m. Permite trabajar aplicaciones directas hasta una escala de 1:25.000, principalmente en áreas rurales o de grandes extensiones (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>).

El *Landsat 7* puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur y obviamente, en todas las longitudes del globo terrestre. Una órbita del *Landsat 7* es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por día, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur, el satélite cruza la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 (hora local) en cada pasaje. Está "heliosincronizado", o sea que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar; en el caso de Colombia que se encuentra casi sobre la línea del Ecuador, pasa a la hora mencionada (<http://www.gdsig.com.ar>).

Un factor importante es que el período de revolución del *Landsat 7* es igual que el del *Landsat 5* (16 días), y una imagen cubre igual área (185 x 185 km por escena). La conservación de estos parámetros técnicos facilita que el proceso de captura de imágenes se pueda realizar con la misma grilla de referencia (*WRS2*) lo que permite una perfecta integración entre el procesamiento de las imágenes del *Landsat 7* con datos históricos del *Landsat 5* existentes desde 1984 (<http://www.gdsig.com.ar>). Esto es especialmente útil cuando es necesario utilizar los dos tipos de datos de un mismo lugar en forma simultánea por ejemplo para un estudio multitemporal.

#### 3.4.1. Características del *Landsat 7* y sus predecesores

En lo que a equipamiento se refiere el programa Landsat puede ser estructurado en 3 generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo equipamiento estaba formado por un explorador de barrido multiespectral *MSS* (*Multispectral Scanner*) y un conjunto de tres cámaras *vidicon RBV* (*Return Beam Vidicon*) (<http://landsat.usgs.gov/>).

Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor *MSS* para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras *RBV* e incorporan un nuevo sensor denominado *TM* (*Thematic Mapper*) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. Con el lanzamiento del Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) se entra en una versión mejorada de la segunda generación con la incorporación de una versión actualizada del *TM* denominado *ETM* (*Enhanced Thematic Mapper*) (<http://landsat.usgs.gov/>).

- Sensor *MSS*

El sensor *MSS* es un equipo de barrido óptico-electrónico con un campo total de visión de 11.56 grados, lo que a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 Km, divididos a ambos lados de la vertical de la traza (<http://www.gdsig.com.ar>).

Con objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor *MSS* registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiación recibida por el sistema focal se transmite a un sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. Por tanto, el *MSS* dispone de 24 detectores (6 líneas x 4 bandas), compuestos por foto-diodos de silicio (banda 7), y por tubos foto-multiplicadores (banda 4 a 6). En el caso del *Landsat 3*, se añadió una banda térmica (banda 8), registrada por detectores de mercurio-cadmio-telurio (<http://www.gdsig.com.ar>).

- Cámaras *Vidicon*

Los dos primeros satélites *Landsat* incorporaron un sistema de tres cámaras *RBV*, cada una de las cuales registraba información en una banda espectral comprendida entre el verde y el infrarrojo cercano. Su resolución espacial se cifraba en 80 m, cubriendo por lo tanto la misma superficie del sensor *MSS*. Este sistema no funcionó adecuadamente en los dos primeros *Landsat*, por lo que fue sustituido en el tercero por otro sistema *Vidicon*. En este caso, el planteamiento se dirigió más a mejorar la resolución espacial que la espectral, por lo que se montaron dos cámaras pancromáticas de alta resolución operando simultáneamente con el *MSS*. Estas cámaras cubrían un abanico espectral de 0.505 a 0.705  $\mu m$ , proporcionando, en cuatro adquisiciones, la misma cobertura del *MSS*, pero con una resolución aproximada de 40 m. El registro entre ambas permitió utilizar el *RBV* como auxiliar del *MSS*, especialmente para mejorar la calidad visual de sus imágenes. Para ello, se emplearon diversas técnicas de fusión, como la normalización de bandas *MSS*, a partir de la proporcionada por *RBV*, o la transformación *HSI* (<http://www.gdsig.com.ar>).

- Sensor *Thematic Mapper (TM)* y el *ETM+*

Al igual que su predecesor, el *MSS*, el *Thematic Mapper* es un equipo de barrido multiespectral. Frente al *MSS*, el *TM* aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el *IFOV* (Campo de visión instantáneo), se aumenta los niveles de codificación y se realiza el barrido en dos direcciones. Todo ello le permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas, y de 6 a 8 bits (<http://www.gdsig.com.ar>; <http://landsat.usgs.gov/>).

**Tabla 5.** Intervalos espectrales en y resolución espacial de los sensores TM y ETM+ (<http://www.gdsig.com.ar>)

Sensor	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda6	Banda7	Banda8
TM	0.45	0.52	0.63	0.76	1.55	10.4	2.08	
	0.52	0.60	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	
Resolución	30	30	30	30	30	120	30	
ETM+	0.45	0.53	0.63	0.78	1.55	10.4	2.09	0.52
	0.52	0.61	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	0.90
Resolución	30	30	30	30	30	60	30	15

En el *TM*, cada oscilación del espejo supone 16 líneas de barrido, frente a 6 en el *MSS*. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo la banda térmica que registra una menor resolución (120 m) y solo requiere cuatro detectores (<http://landsat.usgs.gov/>). Este aumento en el número de detectores complica el proceso de calibración, a la par que aumenta el volumen de datos a procesar (6 veces superior al *MSS*). Los detectores están formados por tubos de silicio, para la bandas 1 a 4, indio-antimonio para las bandas 5 y 7, y mercurio-cadmio-telurio para la banda 6 (<http://landsat.usgs.gov/>).

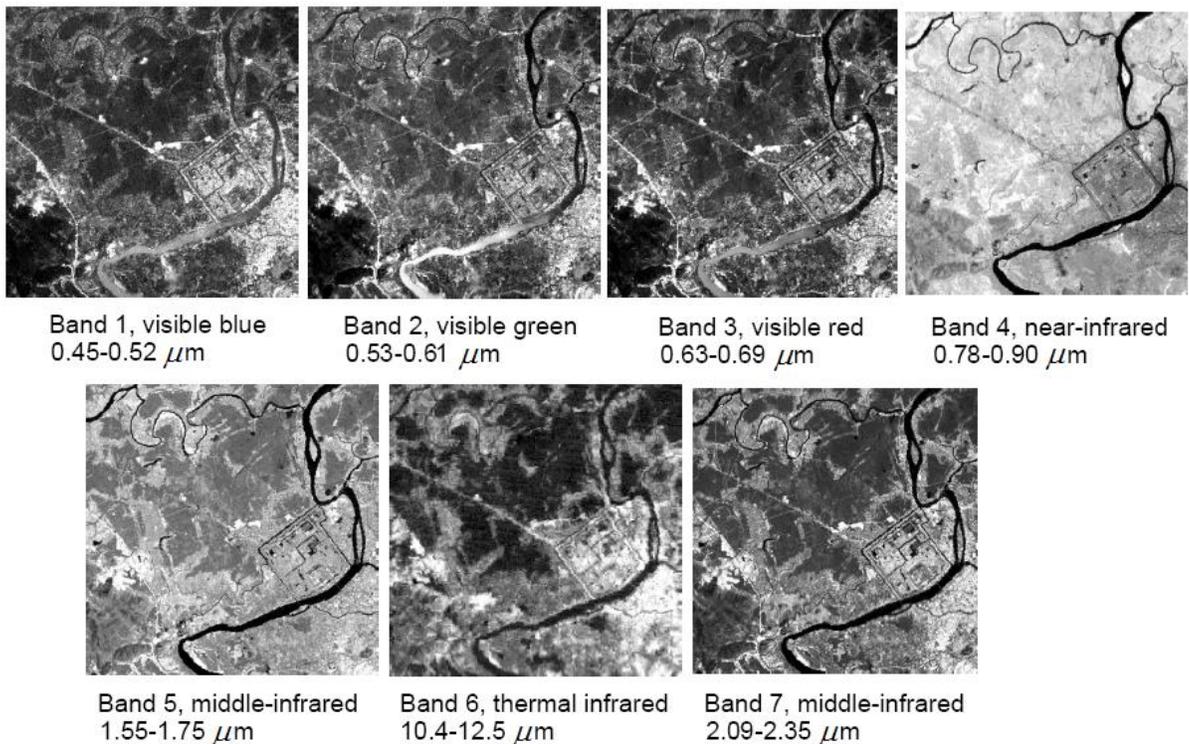
El diseño del *TM* pretendió suplir las deficiencias observadas en las imágenes *MSS*, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en el *MSS* (azul, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico), mientras se sustituían las bandas 6 y 7 del sensor, ambas en el infrarrojo cercano, por una sola. Con esta nueva configuración, los *Landsat* de segunda generación permitieron una sensible mejora en las aplicaciones terrestres y marinas sobre el sensor *MSS*: detección de turbideces y contaminantes en el agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y suelo (infrarrojo medio), detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico) además de mantener las ya existentes para el *MSS* (<http://www.gdsig.com.ar>).

En la actualidad el *Landsat 7* está equipado con una versión mejorada del *TM* denominado *ETM+* (*Enhanced Thematic Mapper*) por lo que todo lo explicado en este apartado para el *TM* es de aplicación para el *ETM+*. El *ETM+* incorpora a mayores una banda pancromática (0.5 a 0.9  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 m (<http://landsat.usgs.gov/>).

#### 3.4.2. Información Espectral de las bandas del *Landsat7*

- **Banda 1.** Esta corta longitud de onda de la luz penetra mejor que las otras bandas, y a menudo es la banda seleccionada para el monitoreo de ecosistemas acuáticos. Desafortunadamente esta es la banda más ruidosa del *Landsat* porque es la más susceptible a la dispersión atmosférica.

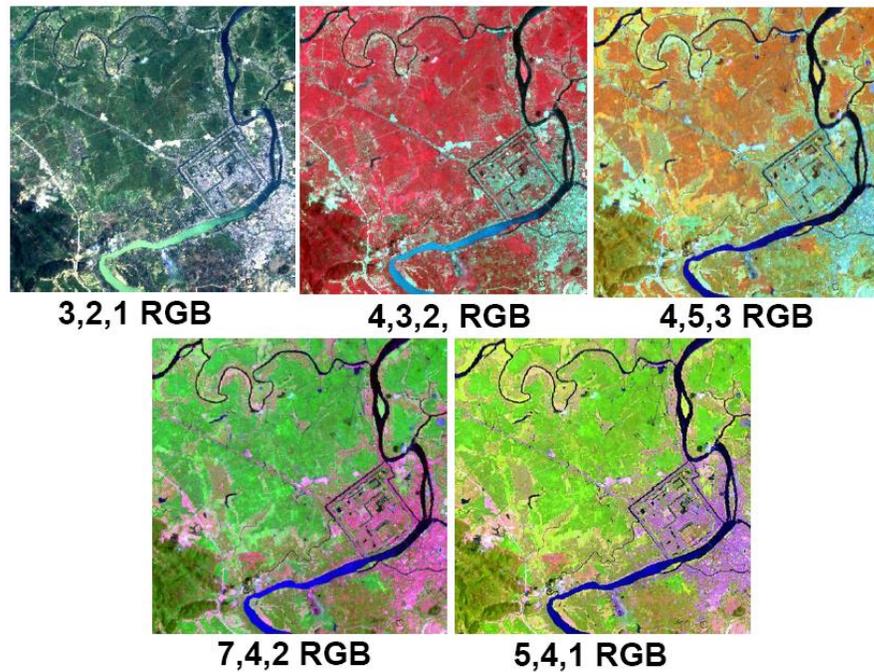
- **Banda 2.** Tiene características similares a la banda 1, pero no tan extremas. Fue seleccionada porque marca las longitudes de onda para el verde cuando se desea ver vegetación.
- **Banda 3.** Como la vegetación absorbe casi toda la luz roja (es llamada la banda de absorción de clorofila), esta banda puede ser usada para distinguir entre vegetación y sólidos y para monitorear el estado de la vegetación.
- **Banda 4.** Como el agua absorbe toda la luz a esta longitud de onda, los cuerpos de agua aparecen muy oscuros. Esto contrasta con los brillos de la reflectancia para sólidos y vegetación, así que es una buena banda para diferenciar agua de tierra.
- **Banda 5.** Esta banda es muy sensible a la humedad y por eso es muy utilizada para monitorear vegetación y la humedad de los suelos. También es buena para diferenciar entre nubes y nieve (Aunque en el caso de Colombia no se encuentra nieve).
- **Banda 6.** Es una banda térmica que puede ser usada para medir la temperatura de la superficie.
- **Banda 7.** Esta banda también es usada para medir la humedad de la vegetación aunque generalmente la banda 5 es la preferida para esta aplicación.



**Figura 15.** Bandas del satélite Landsat (<http://www.gdsig.com.ar>)

### 3.4.3. Combinaciones comunes de las bandas

- **3, 2, 1 RGB.** Es muy utilizada para el estudio de hábitats acuáticos.
- **4, 3, 2 RGB.** Tiene cualidades similares a la anterior, sin embargo, como se utiliza la banda de infrarrojo cercano, los bordes de hábitats acuáticos aparecen más claros y diferentes tipos de vegetación son más apreciables.
- **4, 5, 3 RGB.** Los diferentes tipos de vegetación se pueden definir más claramente y las uniones de tierra y agua son más claras. La variación del contenido de humedad es evidente con esta combinación. Es probablemente la más común de las imágenes Landsat, aunque otra combinación muy común es la 4, 5, 7.
- **7, 4, 2 RGB.** Tiene propiedades similares a la anterior, pero con la gran diferencia de que en este caso, la vegetación aparece verde.

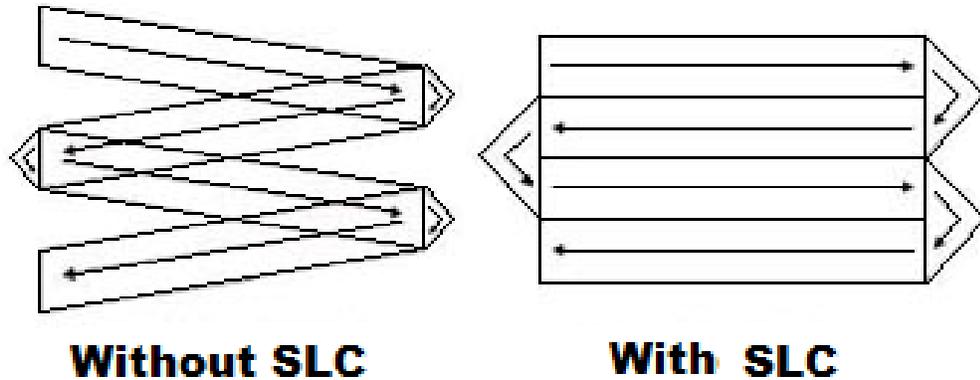


**Figura 16.** Combinaciones más comunes de las bandas del Landsat  
(<http://www.gdsig.com.ar>)

### 3.4.4. Problemas con las imágenes del *Landsat7*

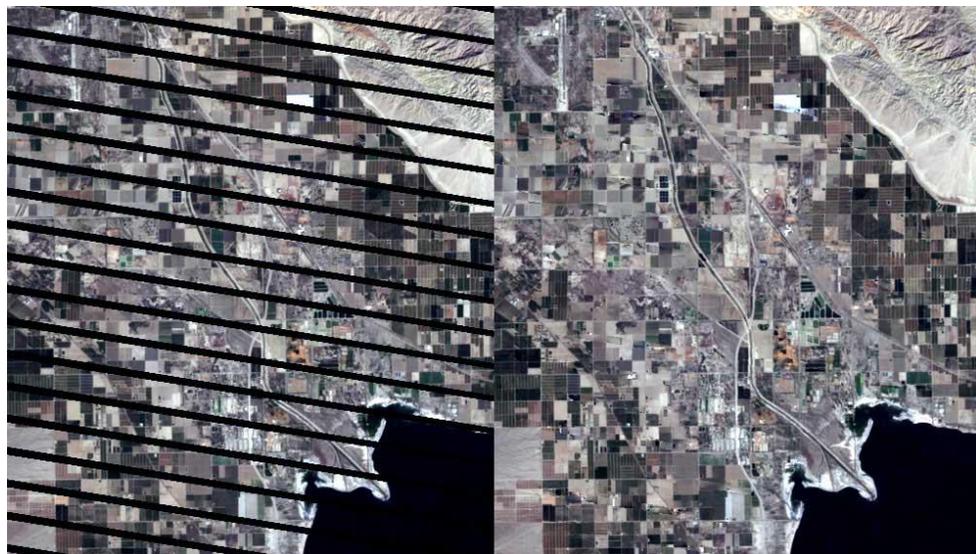
El día 31 de mayo de 2003 el sensor *ETM+* a bordo del *Landsat 7* sufrió un problema en el sistema encargado de hacer la corrección del espejo rotatorio que barre cierto campo de vista (<http://landsat.usgs.gov/>), este sistema se llama corrector de línea de escaneo *SLC* (por sus siglas en inglés *Scan Line Corrector*), y desde ese momento se encuentra trabajando *SCL-off*, generando una pérdida de información al momento de captura de las imágenes, es importante anotar que

el error no siempre se encuentra en el mismo lugar, y para compensar este problema, se encuentran disponibles distintos tipos de Software, aunque por lo general lo que se hace es utilizar dos imágenes de una misma escena para hacer la corrección, por ejemplo, Colombia está dividida en 72 escenas del satélite Landsat, por tanto se necesitan 144 escenas para la corrección (<http://esospso.gsfc.nasa.gov>; <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>; <http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=599>).

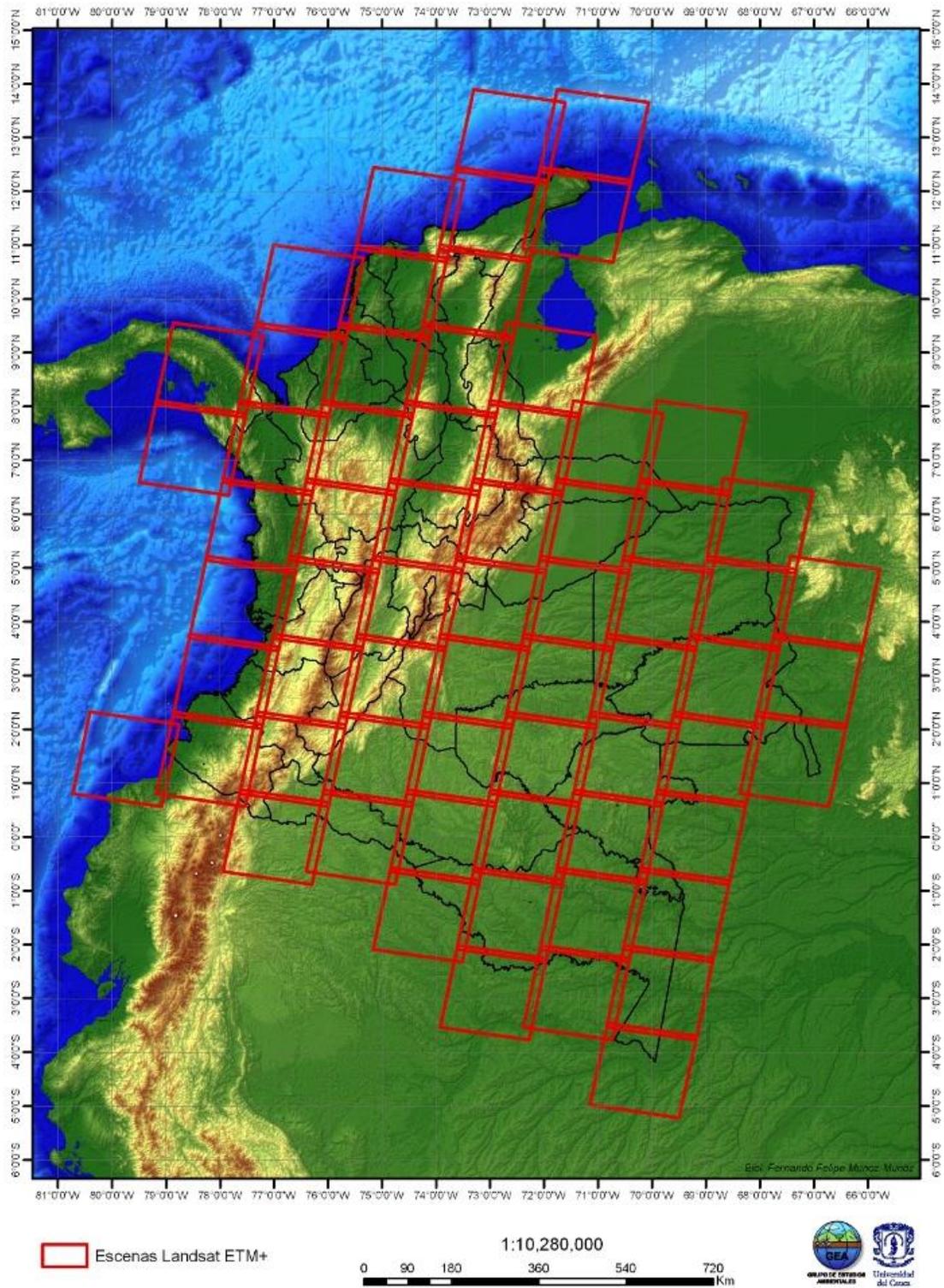


**Without SLC** **With SLC**  
**Figura 17.** Falla del SLC  
(<http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=599>)

Un problema adicional es generado por las sombras que se observan debido al ángulo que se forma entre el satélite y la superficie de la Tierra, dada por la hora en que pasa el satélite sobre Colombia y las sombras generadas por las nubes que se pueden encontrar sobre la zona de estudio en ese mismo instante, lo cual genera confusiones en la clasificación de cierta cobertura o uso del suelo.



**Figura 18.** Imagen con SCL-off (izq.) e imagen con SCL-on (der.)  
(<http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=599>)



**Figura 19.** División en las 72 escenas del Landsat para cubrir todo el territorio Colombiano (GEA)

## **4. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES SATELITALES**

Para capturar una imagen satelital, el sensor explora secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo (a intervalos regulares) la radiación que proviene de los objetos sobre los cuales se encuentra situado y almacenándola en diferentes píxeles, cada píxel posee información espacial y espectral, lo cual significa que se pueden identificar visualmente accidentes y objetos del terreno por su apariencia física (Chuvienco, 1996). Por ejemplo, un edificio cuadrado aparecerá cuadrado y una parcela agrícola redonda mostrará asimismo dicha forma.

En lo que se refiere a la información espectral, la intensidad del color de la imagen revela también información. Por ejemplo, si se ha elegido el color rojo para representar la reflectancia del infrarrojo cercano de una imagen, objetos tales como la vegetación verde, que reflejan totalmente la energía en esa longitud de onda, aparecerán de color rojo brillante (Chuvienco, 1996). Otros niveles de brillo corresponden a la reflectancia en otras bandas.

La interpretación de imágenes puede ir desde la simple inspección visual hasta la utilización de sistemas de procesamiento de imágenes que analizan y tipifican los rasgos del terreno basándose en el valor digital de las firmas espectrales. Los programas informáticos de procesamiento de imágenes y algunos de cartografía efectúan dicho análisis y tipificación con mucha mayor precisión que el ojo humano.

### **4.1. PREPROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES**

Es bien sabido que dentro de todo proceso que implique la toma de una medida, sin importar si se encuentra en contacto directo o no, siempre se tendrán errores o anomalías en los datos. Por lo tanto en cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aérea o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores. Esto explica porque la imagen detectada no coincide exactamente con el tono, posición, forma y tamaño de los objetos que incluye.

En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes son (Chuvienco, 1996; Lira, 2002):

- Distorsiones originadas por la plataforma: pese a la gran estabilidad de un satélite de observación, muy superior a la que ofrece un avión, pueden producirse pequeñas variaciones en la altitud de su órbita, en la velocidad, o en la orientación de cualquiera de sus tres ejes.

- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre: teniendo en cuenta la altitud y el área abarcada por el sensor, el efecto de rotación de la Tierra, puede aparecer claramente en la imagen. Por ejemplo, en el caso del satélite Landsat, cada imagen de 185x185 Km, se adquiere en aproximadamente 28s. En este lapso de tiempo, desde la primera a la última línea de barrido, la Tierra se ha desplazado sensiblemente (unos 8Km), lo que causa, junto a la propia inclinación de la órbita, una orientación de la imagen Noreste-Suroeste.
- Distorsiones provocadas por el sensor: casi todos los satélites utilizan sensores de barrido electrónico para la captura de la información, los cuales realizan una exploración perpendicular a la trayectoria del satélite, gracias a un espejo oscilante. Este movimiento puede alterarse por anomalías del sensor, provocando un efecto de barrido no lineal (el daño ocurrido para el Landsat 7) o cambios en el intervalo de recogida de información, lo que implica transformar la resolución efectiva de la imagen.
- Distorsiones provocadas por la atmósfera: los distintos elementos que componen la atmósfera, causan una modificación de la radiación original proveniente de la superficie de la terrestre.

#### 4.1.1. Correcciones geométricas

Permiten eliminar los errores de carácter geométrico que acompañan al proceso de adquisición, así como dotar a la imagen de coordenadas, de tal forma que sea posible compararla con otra imagen o con información extraída de un mapa, intentando que la imagen resultante de estos procesos conserve, en la medida de lo posible, los valores radiométricos de la imagen inicial. Los errores geométricos que se presentan con más frecuencia en las imágenes son agrupados en dos tipos (Egan, 2004; Lira, 2002; Röder, 2009):

- Sistemáticos: distorsión panorámica, distorsión por la curvatura terrestre, distorsión por movimiento de rotación terrestre y distorsión de oblicuidad debida al tiempo de barrido.
- No sistemáticos: distorsión provocada por los movimientos de la plataforma y deformación debida al relieve.

Dentro de los errores no sistemáticos, se trae a colación, nuevamente, el ejemplo del sensor a bordo del Landsat 7, cuyo sistema de corrección de la línea de escaneo, se encuentra dañado desde el año 2003, ocasionando la pérdida de cierta cantidad de información en los extremos de cada imagen, para este caso específico, se puede realizar la corrección partiendo de dos imágenes de diferentes periodos (con la ventaja de que el error o pérdida de datos del píxel no siempre se encuentra en el mismo lugar), y reemplazar los lugares en los que no hay información, con los datos en la misma posición de la otra imagen, se debe

tener en cuenta que al hacer esto, se tomen imágenes de un período cercano, porque los cambios de estaciones, influyen mucho en la radiación capturada de cada objeto. Otra forma, es utilizar los valores de los píxeles vecinos al píxel de interés y promediarlos para darle un valor, pero el gran problema con este método, es que no se está trabajando con información real, porque bien puede ser que la cobertura se mantenga, ó que cambie (Röder, 2009):

Las correcciones geométricas hacen referencia a cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles en una imagen. Los cambios pueden explicarse a través de una transformación numérica, cuya expresión puede ser (Lira, 2002):

$$F(x, y) = G(f, c) \quad (6)$$

donde  $(x,y)$  hacen referencia a las coordenadas de la imagen corregida y  $(f,c)$  son las coordenadas de la imagen de entrada. Estas correcciones se pueden realizar por:

- Una modelización escena-sensor, a partir de la información orbital disponible.
- De forma empírica, mediante un ajuste directo a partir de puntos de control cuyas coordenadas son conocidas tanto en la imagen de partida como en la imagen corregida.

#### 4.1.2. Correcciones Radiométricas

La percepción remota se fundamenta en la recepción de la energía electromagnética que, proveniente del sol, es reflejada o absorbida para después ser emitida por los objetos de la superficie terrestre. Entran en juego en este proceso una serie de elementos que condicionan las características de los datos captados como son la energía solar, las particularidades de los elementos de la superficie, los componentes de la atmósfera atravesada por la energía (que provocan absorción y dispersión atmosférica) y las cualidades de los sensores (ganancias y desfases [Prasad *et al.*, 2011]).

Son los efectos atmosféricos y los posibles desajustes técnicos en el sensor los que pueden provocar anomalías o errores radiométricos, lo que implica que los valores codificados por el sensor no correspondan con los valores reales de reflectancia, es decir, existirán discrepancias entre los valores digitales de intensidad de la imagen y los que debería presentar. Por lo tanto, los datos obtenidos sólo en pocas ocasiones pueden utilizarse en estado original y deberán someterse a un conjunto de tratamientos previos (Chuvienco, 1996; Röder, 2009):

## 4.2. LAS TEXTURAS EN LAS IMÁGENES DE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Para poder entender en qué consiste un estudio de textura es necesario aclarar qué se entiende por este término, aunque se puedan presentar diferencias sutiles en su definición en función del campo de estudio específico. En el tratamiento de imágenes, son muchas las definiciones adoptadas y todas son muy coincidentes en la idea a expresar. Algunas de las más comunes son:

- “El término textura se refiere, en general, a la repetición de elementos básicos llamados texels. Cada texel contiene varios píxeles, cuya ubicación puede ser periódica, quasi-periódica o aleatoria. Las texturas naturales son generalmente aleatorias, mientras que las artificiales son a menudo deterministas o periódicas. Una textura puede ser gruesa, fina, suave, granulada, rugosa, regular, irregular, lineal, entre otros” (Jain, 1989).
- “De manera intuitiva, puede decirse que es un descriptor que da una medida de propiedades como suavidad, heterogeneidad o regularidad” (González, Woods, 2004).
- “Se entiende por textura un conjunto de características de una escena como son su rugosidad, homogeneidad, contraste, regularidad, direccionalidad o granulosidad, entre otras, las cuales se conocen como propiedades texturales” (Haralick, Shapiro, 1992).

Toda la diversidad de elementos que se encuentran sobre la superficie terrestre, forman el conjunto de las llamadas cubiertas superficiales. Dichas cubiertas se pueden considerar de dos tipos desde el punto de vista de su origen o naturaleza, bien sean naturales u originadas por las actividades humanas. En cualquiera de los dos tipos, se considera que forman mosaicos con distribuciones más o menos regulares y homogéneas, dando lugar en su conjunto a lo que se puede definir como imágenes de la superficie terrestre (Prasad *et al.*, 2011). Si se analizan estas imágenes a través un plano perpendicular a la superficie de la Tierra, se pueden encontrar patrones repetitivos y de carácter geométrico o bien aleatorio, como pueden ser las zonas de vegetación natural con diversas especies de árboles, con varios niveles de densidad, con distribución irregular de esas especies, entre otros (Chuvienco, 1996).

### 4.2.1. Análisis de las diferentes variables de textura

Basados en las definiciones escritas anteriormente, para poder diferenciar o determinar un tipo de texturas, se deben tener en cuenta ciertas características, que en general, se estudian a partir de modelos estadísticos.

- Métodos estadísticos de primer orden

El histograma de frecuencias de los niveles de gris acumula toda la información estadística de primer orden sobre una imagen o cualquier fragmento de ella, donde a partir de cada nivel de gris se puede determinar cuál es la probabilidad de que aparezca en la imagen (González, Woods, 2004; Haralick, Shapiro, 1992):

$$p(i) = \frac{h(i)}{NM}, i = 0, 1, 2, \dots, G-1 \quad (7)$$

A partir de ella se pueden determinar algunas variables de textura de la imagen relacionadas con la forma del histograma, con su anchura, con la forma de su distribución, entre otros. Estas variables permiten describir cuantitativamente las propiedades estadísticas de primer orden de la imagen y están basados en el cálculo de los momentos centrales (González, Woods, 2004).

**Media:** determina el nivel de intensidad promedio de la imagen

$$\mu = \sum_{i=0}^{G-1} ip(i) \quad (8)$$

**Varianza:** describe la variación de la intensidad alrededor de la media

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{G-1} (i - \mu)^2 p(i) \quad (9)$$

**Skewness, tercer momento o coeficiente de asimetría:** determina si una distribución es simétrica alrededor del nivel digital de máxima frecuencia. Los valores positivos indican que la distribución está desplazada hacia la derecha con una mayor cola hacia la derecha del máximo. Valores negativos indican que la distribución está desplazada hacia la izquierda, con una forma más prolongada hacia ese lado del máximo.

$$\mu_3 = \sum_{i=0}^{G-1} \left( \frac{i - \mu}{\sqrt{\sigma^2}} \right)^3 p(i) \quad (10)$$

**Kurtosis o apuntamiento:** se define como el grado en el que una distribución estadística de frecuencias es puntiaguda.

$$\mu_4 = \sum_{i=0}^{G-1} \left( \frac{i - \mu}{\sqrt{\sigma^2}} \right)^4 p(i) - 3 \quad (11)$$

De las anteriores variables, la media y la varianza son las que peor información aportan sobre la textura, ya que representan en mayor medida las condiciones del proceso de adquisición de la imagen, como iluminación, brillo general de la escena, la ganancia o el desfase del sistema de adquisición.

- Métodos estadísticos de segundo orden

Los métodos estadísticos de primer orden son una aproximación a las texturas bastante sencilla, pero no pueden por sí solos caracterizarlas completamente. El principal método estadístico de análisis de texturas se basa en la definición de las distribuciones de probabilidad de coocurrencia entre pares de píxeles vecinos, aunque existen otros como filtros de Gabor, la auto correlación espacial o transformada discreta de coseno, los filtros de energía, filtros de densidad de borde, las transformadas wavelets, entre otros. Los tres primeros fueron los utilizados para la obtención de resultados de este trabajo y se hablará de estos más adelante (González, Woods, 2004; Haralick, Shapiro, 1992).

**Filtros de densidad de borde:** La textura puede caracterizarse en términos de la cuantía e intensidad de bordes por unidad de área. Una transición brusca en los niveles de gris de una imagen alrededor de un píxel dado puede detectarse comparando por pares los valores de los vecindarios del píxel. El filtro de densidad de bordes se basa en la determinación del gradiente como la suma del valor absoluto de las diferencias entre píxeles vecinos, tomando como parámetro variable la distancia  $d$  y una imagen  $I$ , en la que se define un vecindario  $N$ , esta variable de textura se obtiene mediante la expresión (Ruiz *et al.*, 2001):

$$g(i, j, d) = \sum_{(i, j) \in N} \{ |I(i, j) - I(i + d, j)| + |I(i, j) - I(i - d, j)| + |I(i, j) - I(i, j + d)| + |I(i, j) - I(i, j - d)| \} \quad (12)$$

Donde  $g(i, j, d)$  representa la densidad de bordes por unidad de área en un píxel genérico  $(i, j)$  (Ruiz *et al.*, 2001).

**Transformadas wavelets:** Este método, propuesto por vez primera por el analista de texturas Mallat (1989), proporciona una metodología robusta para el análisis de texturas a diferentes escalas. La transformada de *wavelets* permite descomponer una señal según una serie de funciones elementales, llamadas *wavelets* y *scaling*, que se generan mediante escalados y traslaciones de una función base, llamada wavelet madre (Mallat, 1989).

$$\psi_{s,u}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \quad (13)$$

Donde  $s$  es el factor de escalado y  $u$  el de translación y ambos pertenecen a los reales positivos. En la práctica, las *wavelets* equivalen a filtros paso-alto y las *scaling* a filtros paso-bajo. Como resultado, la transformada wavelet descompone la imagen original en una serie de subimágenes con varias escalas, denominadas tendencia y fluctuaciones, las primeras son versiones promediadas de la imagen original y las segundas contienen las altas frecuencias a diferentes escalas o

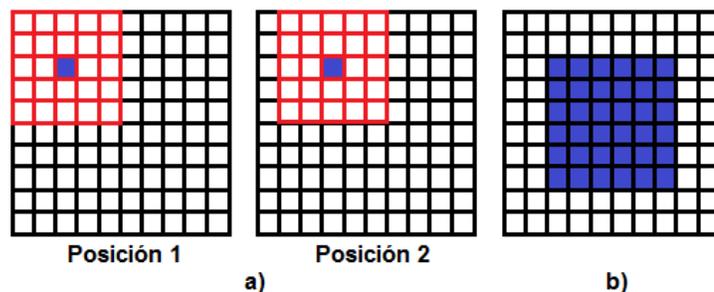
niveles. Aplicando la transformada inversa a las fluctuaciones se obtienen los detalles horizontales, verticales y diagonales, que constituyen versiones reconstruidas de aquéllas (Mallat, 1989).

### 4.3. MATRICES DE COOCURRENCIA DE NIVELES DE GRIS

La matriz de coocurrencia describe la frecuencia de un nivel de gris que aparece en una relación espacial específica con otro valor de gris, dentro del área de una ventana determinada (Lira, 2002). La matriz de coocurrencia es un resumen de la forma en que los valores de los píxeles ocurren al lado de otro valor en una pequeña ventana (Shapiro, Stockman, 2000).

Normalmente el procedimiento de generación de imágenes de textura requiere que la persona defina cinco variables: tamaño de la ventana, banda espectral de entrada, las texturas derivadas, cuantización (numero de bits) del canal de salida y la componente espacial (la distancia interpíxel y el ángulo para el computo de la coocurrencia [Jain, 1989]).

En este trabajo, se utilizaron ventanas para el cálculo de todas las características, con respecto al tamaño de la ventana, esta debe ser cuadrada y con número impar de píxeles. El resultado del cálculo de la textura es un único número que representa la ventana completa, el cual es colocado en el lugar del píxel central. Luego, la ventana se mueve un píxel y se repite el procedimiento, calculando una nueva matriz de coocurrencia para esta nueva ventana y resultando un nuevo valor, para el píxel central de esta nueva posición de la ventana (De la Escalera Hueso). De este modo se construye toda una nueva imagen con valores de texturas, como se muestra en la Figura 20.

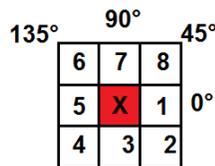


**Figura 20.** a) Imagen de dimensiones 10x10 píxeles, una ventana móvil de 5x5 en dos posiciones y el píxel central que recibe el resultado. b) todos los píxeles que reciben el resultado y las 2 filas y las 2 columnas del borde de la imagen que reciben el valor de textura calculados en los píxeles cercanos.

Por otra parte, el tamaño relativo de la ventana y de los objetos en la imagen determinan la utilidad de ésta medida para la clasificación. Es recomendable que

la ventana sea menor que el objeto y lo suficientemente grande como para capturar la variabilidad del mismo. Por ejemplo, en un bosque la textura está determinada por las luces y sombras de las copas, por lo tanto una ventana con el tamaño de un solo árbol no medirá la textura del bosque. Otra ventana cubriendo todo el bosque y los campos vecinos a él, tampoco medirá la textura del mismo (Chuvienco, 1996).

La relación espacial entre el píxel de referencia y su vecino puede ser en cualquiera de las 8 direcciones (N, S, E, O y las 4 diagonales), pero solo se toman cuatro, ya que la N es opuesta a la S y en vez de contarlas separadamente hay formas más sencillas de medirlas (matriz simétrica, que más adelante se detalla). Cuando se habla de una relación “espacialmente invariante” se eligen las cuatro direcciones N, NE, E y SE y se promedian (esto también se expresa respectivamente como 0°, 45°, 90° y 135°) (Shapiro, Stockman, 2000; De la Escalera Hueso).



**Figura 21.** Los 8 píxeles X de acuerdo el ángulo utilizado en el cálculo de la matriz de coocurrencia.

Todas estas variables podrían generar muchos datos, asumiendo que se usan 6 medidas de texturas (aunque pueden ser mas), 7 bandas espectrales para el caso del *Landsat 7*, varios tamaños de ventanas según la resolución de la imagen y según el tamaño de las coberturas que se desean clasificar y 4 direcciones posibles (componente espacial), el resultado podrían ser mas de 5000 imágenes de textura para una sola aplicación. Esto sobrepasa a los programas más sofisticados para clasificación y también requieren de mucho tiempo de procesamiento, lo cual implica una gran inversión en computadoras dedicadas únicamente a realizar este proceso (Chuvienco, 1996; Lira, 2002).

No hay forma de predecir con certeza cuales medidas serán de mayor utilidad. Sin embargo existen algunos conceptos generales a considerar:

- La inspección visual de algunas bandas de entrada pueden ayudar a determinar no usarlas. Por ejemplo, en estudios de vegetación la banda del rojo y el infrarrojo cercano (*NIR*) suelen ser los más útiles, o bien alguna combinación de ellos como un índice de vegetación (*NDVI*). El Análisis de Componentes Principales también puede ayudar a reducir las bandas de entrada. La inspección visual de una imagen también puede mostrar alguna

direccionalidad, si no la hubiera, la mejor opción es usar la espacialmente invariante (Lira, 2002).

- Muchas de las medidas texturales están correlacionadas entre sí, en realidad existen pocas verdaderamente independientes (Chuvieco, 1996).
- El mejor tamaño de la ventana se podrá estimar inspeccionando visualmente la imagen o conociendo de antemano los tamaños mínimos o máximos de la cobertura que se desea clasificar (De la Escalera Hueso).

#### 4.3.1. Cálculo de la matriz de coocurrencia

Se toman los valores de gris de la imagen en su totalidad para realizar los cálculos, dando como resultado para las diferentes características texturales, solo un valor que representa a toda la imagen (Lira, 2002). Cuando se trabaja con imágenes reales de grandes dimensiones, la secuencia del cálculo es la que ya se había explicado en la Figura 20.

La Matriz de coocurrencia considera la relación espacial entre dos píxeles, llamados píxel de referencia y píxel vecino. Cada píxel en la ventana se va convirtiendo sucesivamente en el píxel de referencia, empezando por el ubicado arriba a la izquierda y finalizando abajo a la derecha (Lira, 2002). Los píxeles ubicados en el margen derecho de la imagen original, no tienen vecino a la derecha por lo tanto no son usados en el cómputo.

Para el desarrollo de este trabajo y debido a la resolución espacial de las imágenes, se utiliza un píxel de separación (un píxel de referencia y su inmediato vecino) y un solo ángulo ( $45^\circ$ ) debido a que es una textura no homogénea y con una sola dirección se podría identificar el cambio para una ventana de  $5 \times 5$ , no se utilizó una ventana más pequeña o más grande por la resolución espacial y el tamaño de los objetos de estudio. En casos con mayor resolución o con una textura homogénea, si la ventana es suficientemente grande, se puede usar una separación mayor, sin que haya diferencias en la metodología de su cálculo. Las posibles combinaciones de niveles de grises para una imagen hipotética de  $4 \times 4$  píxeles se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Todas las posibles combinaciones de los niveles de gris en la imagen de prueba

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg); transform-origin: center;">                     Píxel de referencia \ Píxel vecino                 </div>	0	1	2	3
0	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)
1	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)
2	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)
3	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)

La primera celda debe ser llenada con la cantidad de veces que ocurre la combinación (0,0) y así sucesivamente. Normalmente se calcula una matriz donde solo se cuenta cada píxel de referencia con su vecino a la derecha. Si el cálculo se realiza solo de este modo, usando solo una dirección, entonces el número de veces que aparece una determinada combinación (2,3) no es el mismo que la combinación (3,2), por lo tanto la matriz no es simétrica respecto de la diagonal.

Sin embargo, la simetría es necesaria para el cálculo, esto se logra al sumarle a esta matriz su matriz traspuesta. Al obtener esta matriz, el paso siguiente es expresarla como probabilidad. La definición más simple de la probabilidad es “el número de veces que un evento ocurre, dividido por el número total de posible eventos” (Skoog *et al.*, 1992). Para esto, se suma cada uno de los valores de los píxeles para saber el número total de combinaciones.

Una vez obtenida esta matriz, se procede a calcular las características que se desee, para poder diferenciar una textura, basado en las ecuaciones para cada una (Haralick, Shapiro, 1992). En la siguiente sección se muestran algunas de las más utilizadas.

#### 4.3.2. Principales características de textura

Las principales características de textura propuestas por Haralick y Shapiro, son las que se describen a continuación y que son obtenidas a partir de la matriz de coocurrencia de niveles de gris (MCNG) normalizada:

- **Contraste:** También llamado inercia, establece la diferencia de la frecuencia entre valores altos y bajos del nivel de gris. Está directamente relacionado con la frecuencia espacial de la imagen y en imágenes con pocas variaciones locales en los niveles de gris el valor del contraste será bajo.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - j)^2 p(i, j) \quad (14)$$

- **Uniformidad, energía o momento angular de segundo orden:** mide la homogeneidad textural de una imagen. Las imágenes homogéneas se caracterizan por tener pocas transiciones de niveles digitales entre píxeles vecinos y la uniformidad será alta en aquellos vecindarios que presenten un pequeño número de valores distintos de cero pero de gran magnitud. Es un parámetro análogo a la energía (De la Escalera Hueso).

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j)^2 \quad (15)$$

- **Entropía:** indica la aleatoriedad, complejidad o desorden en la distribución de intensidades de una imagen, es decir, la existencia de variaciones de niveles de gris en entornos próximos.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j) \log[p(i, j)] \quad (16)$$

- **Momento de diferencia inverso:** está inversamente relacionado con el contraste y valores altos indican que la frecuencia de ocurrencia en la imagen de niveles de intensidad similares es elevada, discriminando zonas de variación de niveles de gris entre píxeles.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{p(i, j)}{1 + (i, j)^2} \quad (17)$$

- **Momento producto o covarianza:** valores positivos altos indican una mayor probabilidad de que se den juntos en la imagen valores de intensidad similar. Por el contrario, valores negativos son propios de imágenes donde píxeles vecinos difieren mucho en su nivel de gris.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - \mu)(j - \mu) p(i, j) \quad (18)$$

- **Correlación:** equivale al momento producto normalizado respecto a la varianza. Mide la dependencia lineal de las intensidades en la imagen y es el coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias  $i, j$  donde  $i$  representa el posible valor en nivel de gris para el primer elemento y  $j$  el nivel de gris para el segundo elemento, separados ambos por la distancia  $D$ . Será mayor en imágenes que presenten grandes áreas con intensidades similares que en aquéllas que presenten ruido:

$$\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - \mu)(j - \mu) p(i, j)}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i - \mu)^2 p(i, j)} \quad (19)$$

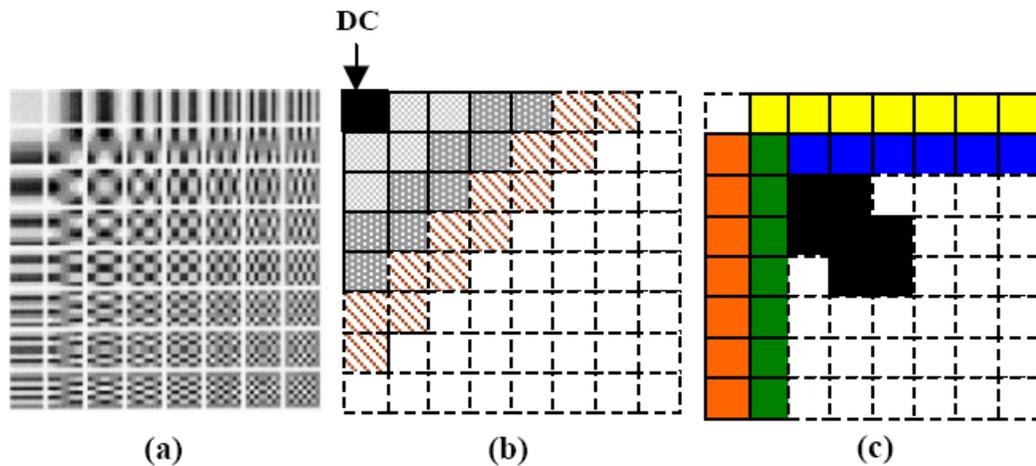
La correlación presenta valores bajos alrededor de los bordes de zonas homogéneas por lo que será un buen estadístico para discriminar esas áreas.

#### 4.4. TRANSFORMADA DISCRETA DEL COSENO

La transformada discreta del coseno (DCT) (también denominada transformada del coseno), es la más ampliamente utilizada en compresión de imágenes. Esta transformada cuenta con una buena propiedad de compactación de energía. La DCT está bastante relacionada con la transformada discreta de *Fourier*, con la diferencia de que es una transformada real, debido a que los vectores base se componen exclusivamente de funciones coseno muestreadas (Lira, 2002).

Una *DCT* descompone la señal en frecuencias espaciales, que luego permiten aplicar técnicas de procesamiento para reducir la precisión de los coeficientes consistente con el modelo del sistema de visión humano (*HVS*). Como los coeficientes de *DCT* de una imagen tienden a dar nuevas características por sí mismos, se tiene la capacidad de representar la regularidad, complejidad y algunas texturas de la imagen que pueden aplicarse directamente a los valores de píxeles en la misma para la compresión del dominio (Lira, 2002). Este puede ser un modo de resolver el gran problema de almacenamiento y la complejidad computacional para los métodos existentes.

Para la extracción eficiente de características, se usan algunos coeficientes de *DCT* en dominios comprimidos como los vectores de características, cada sub bloque contiene un coeficiente *DC* y otro *AC*, como se muestra en la Figura 22.



**Figura 22.** a) Patrón de información básico de una *DCT*, b) Coeficiente *DC* y c) coeficiente *AC* [24]

En esta ocasión, se hace uso de la ecuación 20 aplicada del mismo modo que con las matrices de coocurrencia, en una pequeña ventana de  $5 \times 5$  que se va desplazando a lo largo de toda la imagen y asignando el resultado en el píxel central de la misma, de este modo se obtiene una nueva característica que depende de la cobertura que se está analizando.

$$C(i, j) = \sum_m \sum_n g(m, n) [\cos(2m + 1)i\pi] [\cos(2n + 1)j\pi] \quad (20)$$

#### 4.5. FILTROS DE GABOR

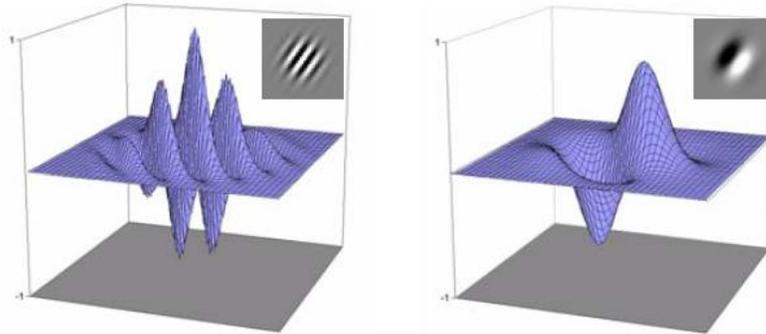
El origen de las funciones de Gabor y por extensión de la Transformada de Gabor se remonta a 1946, cuando Dennis Gabor dedujo la formulación de la *Short Time Fourier Transform (STFT)*, la cual permitía analizar componentes de altas

frecuencias usando pequeñas ventanas y componentes de bajas frecuencias usando ventanas más anchas (Bodnarova, 2002; Hsiao, 1989).

Gabor introdujo en la *STFT* una familia de *wavelets* no ortogonales con soporte infinito basadas en las traslaciones sobre una función *Gaussiana* (Bodnarova, 2002). La aplicación de las funciones de Gabor se puede realizar como filtros en el dominio de la frecuencia para extraer características de textura específicas de cada frecuencia y orientación, o lo que es lo mismo, se puede aplicar la transformada de Gabor mediante bancos de filtros discretos. Un banco de filtros Gabor es un banco de filtros paso banda con forma *Gaussiana*, con doble cobertura del rango de frecuencias espaciales radiales y múltiples orientaciones, es decir, es un conjunto de filtros *Gaussianos* que cubren el dominio frecuencial con distintas frecuencias radiales y orientaciones (Bodnarova, 2002; Hsiao, 1989).

En el dominio espacial, un filtro de Gabor consiste en una función *Gaussiana* modulada por una curva sinusoidal (Figura 23):

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma_g^2}\right] \exp(2\pi jF(x\cos\theta + y\sin\theta)) \quad (21)$$



**Figura 23.** Parte real (izq) e imaginaria (der) de un filtro de Gabor [42]

donde  $\sigma_g$  determina la extensión espacial del filtro. En el dominio frecuencial, la función Gabor es una curva *Gaussiana*:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x'^2}{\sigma_x^2} + \frac{y'^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \exp(2\pi jf_c(x'\cos\beta + y'\sin\beta)) \quad (22)$$

donde  $(x', y')$  son las coordenadas rotadas de  $(x, y)$ , es decir:

$$\begin{aligned}x' &= x\cos\alpha + y\sin\alpha \\y' &= -x\sin\alpha + y\cos\alpha\end{aligned}\tag{23}$$

los parámetros  $\sigma_x, \sigma_y$ , controlan el ancho espacial y espectral de la función, los parámetros  $f_c$  y  $\beta$  controlan el desplazamiento en frecuencia en el dominio espectral y  $\alpha$  controla la rotación de las coordenadas.

La función de Gabor tiene la propiedad de tener un ancho efectivo finito tanto en el dominio espacial como en el espectral. Esto es importante en el análisis de texturas, especialmente en la segmentación, ya que diferentes texturas tienden a concentrar, en muchos casos, sus energías en rangos estrechos de frecuencias (Bodnarova, 2002; Hsiao, 1989).

#### 4.6. ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES

El objetivo del análisis de componentes principales (*PCA*, por sus iniciales en inglés) también conocida como función empírica ortogonal (*EOF*, por sus iniciales en inglés), es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original (Chuvieco, 1996; Córdoba, 2006). El *PCA* puede aplicarse como realce previo a la interpretación visual o como procesamiento anterior a la clasificación, las cuales fueron implementadas en este trabajo. La imagen transformada puede destacar ciertas características que no eran discernibles en los datos originales o, alternativamente, preservar la información esencial contenida en la imagen en un número menor de dimensiones (Chuvieco, 1996).

Desde un punto de vista estadístico, *PCA* facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de las bandas y aquellos que son específicos a un grupo de ellas (Santa María del Ángel *et al.*, 2011; Ferrero *et al.*, 2005). En definitiva, proporciona una mejor distribución de los datos, frente a esos ejes de variabilidad, lo que puede facilitar una identificación más nítida de las distintas coberturas.

Algebraicamente, *PCA* genera nuevas variables (componentes), mediante una combinación lineal de las variables originales (bandas) (Chuvieco, 1996). Aunque se requiere una variabilidad total, muchas veces la mayor parte de esta está contenida en un número menor de componentes (Lira, 2002). El estudio de la relación entre bandas, que es la base del *PCA*, puede realizarse de dos maneras, con la matriz de varianza-covarianza y la matriz de correlación (Santa María del Ángel *et al.*, 2011). Para obtener la matriz de covarianza se hace uso de la ecuación 24.

$$K_f \cong \frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^{MN} (f_i - \mu_f)(f_i - \mu_f)^t \quad (24)$$

Donde  $f_i$  es el valor para cada píxel en la imagen,  $MN$  es el número total de píxeles,  $\mu_f$  representa la media de todos los píxeles de la imagen y  $t$  denota transpuesta de la matriz. Es claro que la matriz de covarianza es de dimensión igual al número de bandas de la imagen de entrada y además es una simétrica, ya que la correlación de la banda 1 con la  $k$ , con  $k \neq 1$ , es igual a la correlación de la banda  $k$  con la banda 1. La correlación de una banda con ella misma es desde luego igual a uno. Además, los elementos de la matriz de correlación están dados por la ecuación 25 (Lira, 2002; Santa María del Ángel *et al.*, 2011).

$$r_{mn} = \frac{v_{mn}}{\sqrt{v_{mm}v_{nn}}} \quad (25)$$

Donde los índices  $m$  y  $n$  van de 1 al número de bandas de la imagen multiespectral y  $v_{mn}$  son los elementos de la matriz de covarianza  $K_f$ . Esta matriz se obtiene como una manera de estimar qué tanta redundancia en información existe en una determinada banda, con respecto a las demás.

Posterior a la obtención de la matriz de covarianza, se procede a hallar los eigenvalores y eigenvectores, partiendo de la ecuación 26.

$$\Delta_\lambda = \det(\lambda I - k_f) \quad (26)$$

Donde  $\Delta_\lambda$  será cada uno de los eigenvalores de la matriz  $k_f$ , y de cada uno de ellos, saldrán los eigenvectores correspondientes, según el número de bandas con las que se trabaje. De este modo se obtiene la función empírica ortogonal EOF (Santa María del Ángel *et al.*, 2011).

$$EOF_n = (b_{nA} * A) + (b_{nB} * B) + (b_{nC} * C) + \dots + (b_{nj} * j) \quad (27)$$

Donde  $b_n$  representa el eigenvector  $n=1,2,\dots,k$ , y se obtienen tantas EOF's como número de bandas se hayan utilizado. Esta es una primera aproximación que permitirá concentrar en una sola imagen las características más representativas de todas las bandas, aunque también se puede utilizar una función empírica ortogonal estandarizada (SEOF) (Santa María del Ángel *et al.*, 2011), donde lo único que se debe hacer es aplicar la ecuación 28 a cada banda, antes de calcular la matriz de covarianza, y al final obtener 29.

$$Z = \frac{(x_i - \mu)}{\sqrt{\sigma^2}} \quad (28)$$

$$SEOF_n = (b_{nA} * Z_A) + (b_{nB} * Z_B) + (b_{nC} * Z_C) + \dots + (b_{nj} * Z_j) \quad (29)$$

Donde los valores de *SEOF* son fácilmente interpretables y permiten identificar por regiones las zonas con características similares.

#### 4.7. OTROS MÉTODOS PARA CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS

Todos los métodos explicados hasta el momento, se basan, en cierta forma, en clasificación por análisis de textura, pero, existen otros complementarios, que unen conceptos medio ambientales con procesamiento de imágenes.

##### 4.7.1. Transformación de espacios de colores

En el ámbito del procesamiento de imágenes es habitual encontrarse con términos como *RGB* que simplemente significan el espacio de color en el cuál se está trabajando la imagen, a pesar de ser el más común y quizás el más utilizado, también hay otros espacios de color que permiten observar otras características que no se ven en el *RGB* (Torres, 2006).

- **YCbCr:** Es un espacio de color utilizado en sistemas de fotografía y video digital. Define el color en términos de un componente de luminancia y dos de crominancia. *Y* representa la luminancia (*luma*) y *Cb* y *Cr* representan la crominancia (*chroma*), los colores azul y rojo respectivamente.

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.966 \\ -37.7971 & -74.203 & 112 \\ 112 & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (30)$$

- **HSV:** El matiz (*Hue*), hace referencia al color como tal, la saturación o intensidad (*saturation*), indica la concentración de color en el objeto y el brillo (*Value*), denota la cantidad de claridad que tiene el color, es decir, que tanto color blanco contiene.

$$H = \begin{cases} (G - B) * 60 / (\max - \min) \_ si \_ R = \max \\ (B - R) * 60 / (\max - \min) + 120 \_ si \_ G = \max \\ (R - G) * 60 / (\max - \min) + 240 \_ si \_ B = \max \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} S &= (\max - \min) / \max \\ V &= \max \end{aligned} \quad (32)$$

Donde *max* y *min* son el máximo y el mínimo de R, G, B.

#### 4.7.2. Índices de Vegetación (NDVI, SAVI, PVI)

A lo largo del estudio de la percepción remota, se ha venido estudiando en que rangos del espectro electromagnético, se obtiene una mayor respuesta para cierto tipo de cobertura, específicamente para la vegetación y el agua, que han sido de gran interés para la humanidad desde tiempos atrás. A continuación se presentan los índices más utilizados (Chuvienco, 1996).

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (33)$$

- SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*):

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + 0.5} \quad (1.5) \quad (34)$$

- PVI (*Perpendicular Vegetation Index*):

$$PVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + 1} \quad (2) \quad (35)$$

Donde *NIR* es el infrarrojo cercano (banda 4 del *Landsat*), *R* representa el color rojo (banda 3).

#### 4.7.3. Transformación Tasseled Cap (TTC)

Al igual que el *PCA*, esta transformación se dirige a obtener unas nuevas bandas, por combinación lineal de las originales, con objeto de realzar algunos rasgos de interés en la escena (Chuvienco, 1996). La diferencia frente al *PCA* radica en que la *TTC* ofrece unos componentes de significado físico preciso, esto es, independiente del tipo de imagen que se esté analizando.

La *TTC* tiende a poner en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo, a partir de crear nuevos ejes mejor ajustados a ese espacio físico. En ese nuevo sistema de coordenadas, se pretende que sea más nítida la separación entre ambas cubiertas (Chuvienco, 1996). Para poder llevar a cabo este fin, se proponen tres componentes: *Brightness* (brillo), *Greenness* (verdor) y *Wetness*

(humedad), que son obtenidos a partir de una transformación lineal aplicada a la suma de todas las bandas, exceptuando la pancromática y las térmicas. Los factores que se utilizan se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 7.** Coeficientes propuestos para la obtención de la TTC a partir de una imagen Landsat (Chuvienco, 1996)

	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B7</b>
<b>Brillo</b>	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
<b>Verdor</b>	0.2848	0.2435	0.5436	0.7243	0.0840	0.1800
<b>Humedad</b>	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	0.7112	0.4572

#### 4.7.4. Comparaciones de cocientes

Al igual que la *TTC*, existen otras combinaciones que pueden permitir distinguir o resaltar ciertas coberturas, que pueden resultar de gran interés, a partir de los cocientes de las bandas del *Landsat* (Chuvienco, 1996).

$$c1 = \log\left(\frac{B4}{(B5+1)}\right) * 255 \quad (36)$$

$$c2 = \frac{B4 + B5}{B3} \quad (37)$$

$$c3 = \frac{B4 + B3}{B5} \quad (38)$$

$$c4 = \log\left(\frac{B1}{(B7+1)}\right) * 255 \quad (39)$$

$$c5 = \log\left(\frac{B7}{(B4+1)}\right) * 255 \quad (40)$$

## 4.8. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GIS).

Después de estudiar de una forma un tanto detallada los métodos que se pueden utilizar para procesar una imagen satelital, también se debe hablar acerca de la unión de todas estas variables en un solo paquete que facilita, de cierta forma, el análisis y la creación de cartografías o clasificaciones, de un modo rápido, aunque no necesariamente seguro.

Buena parte de los usuarios de la percepción remota tienen por objetivo obtener un mapa temático que refleje adecuadamente el estado de las variables de interés en el área de estudio. En muchos casos, la obtención de ese mapa constituye la fase final del trabajo, en otros, se trata de un documento más que proporciona un conocimiento integrado del territorio (Chuvienco, 1996). En ese caso, la cartografía obtenida a partir de la percepción remota constituye una de las variables que se

incorporan a un sistema de información sobre el territorio, que incluye otras variables necesarias para realizar una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación (Chuvieco, 1996).

Este tipo de enfoques se han visto notablemente favorecidos por las nuevas tecnologías de almacenamiento, manipulación y salida gráfica de la información espacial. Los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG, o en inglés GIS: *Geographic Information Systems*), pueden definirse como programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos con algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que albergan, está referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto (Lira, 2002).

#### **4.9. CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES**

En la mayoría de las aplicaciones en percepción remota, la clasificación digital es la fase culminante del tratamiento digital de imágenes (sin importar que se haga en *GIS* o con un algoritmo desarrollado, como es el caso de este trabajo). La clasificación digital es el proceso de agrupar los píxeles en un número finito de clases individuales o de categorías de datos con base en los niveles digitales de los datos (De la Escalera Hueso). Si un píxel satisface cierto criterio, entonces el píxel es asignado a la clase que corresponda a ese criterio.

Tradicionalmente se han dividido los métodos de entrenamiento o clasificación de dos maneras: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento (Lira, 2002).

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. En este método se identifican áreas suficientemente representativas (áreas de entrenamiento) de cada una de las categorías que componen la zona de trabajo. Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, es preciso calcular las características que permitan diferenciarlas, a partir de los niveles digitales incluidos en las áreas de entrenamiento asignadas a la clase, cuyo cálculo es aplicado a todas las bandas que intervienen en la clasificación (De la Escalera Hueso, 2001).

El método no supervisado, se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. Lo cual no implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados (Chuvieco, 1996). En esta estrategia, se asume que los niveles digitales de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados, más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un

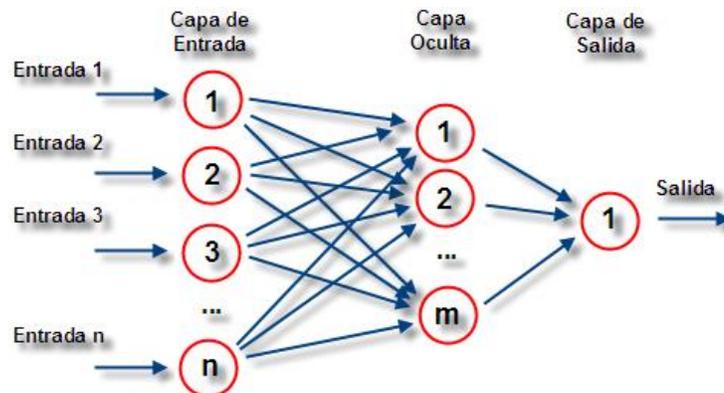
comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés (Lira, 2002).

Sin importar cuál de los dos métodos se utilice, siempre se debe contar con un sistema que se encargue de entender las diferentes opciones y de aprender cómo responder ante ciertas circunstancias, en este caso, ante cierta firma espectral. Los más conocidos y utilizados son: redes neuronales y sistemas expertos.

#### 4.9.1. Redes Neuronales

Una red neuronal, trata simplemente de simular el comportamiento del cerebro humano y más específicamente, el proceso de aprendizaje. Para esto se construyen de forma virtual, los mismos componentes: las neuronas, representadas por nodos, y la sinapsis por conexiones.

Se denominan neuronas de entrada a aquellas neuronas sin sinapsis entrantes. A las neuronas sin sinapsis salientes se las denomina neuronas de salida, y finalmente a aquellas neuronas que no son ni de entrada ni de salida se les denomina neuronas ocultas (Bishop, 1995). Una red es unidireccional cuando no presenta bucles cerrados o conexiones, mientras que una red se dice recurrente o realimentada cuando el flujo de información puede tener un bucle de atrás hacia adelante, es decir, una realimentación (Bishop, 1995).



**Figura 24.** Arquitectura unidireccional con tres capas de neuronas: una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida (Bishop, 1995)

Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

- **Función de propagación:** Por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión.
- **Función de activación:** modifica a la anterior. Puede no existir, dando como salida la misma función de propagación.

- **Función de transferencia:** se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acortar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que se desea dar a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea y la tangente hiperbólica.

Para que la red pueda aprender cómo responder ante cierto estímulo, es necesario realizar un entrenamiento previo, en el cual se le pasan las características o parámetros de un conjunto de prueba y se le indica a que objeto o circunstancia corresponden (Bishop, 1995). Posterior a esto, el sistema es entrenado para asociar todas esas características a una respuesta deseada, y luego puesto en prueba con todos los datos del conjunto a analizar.

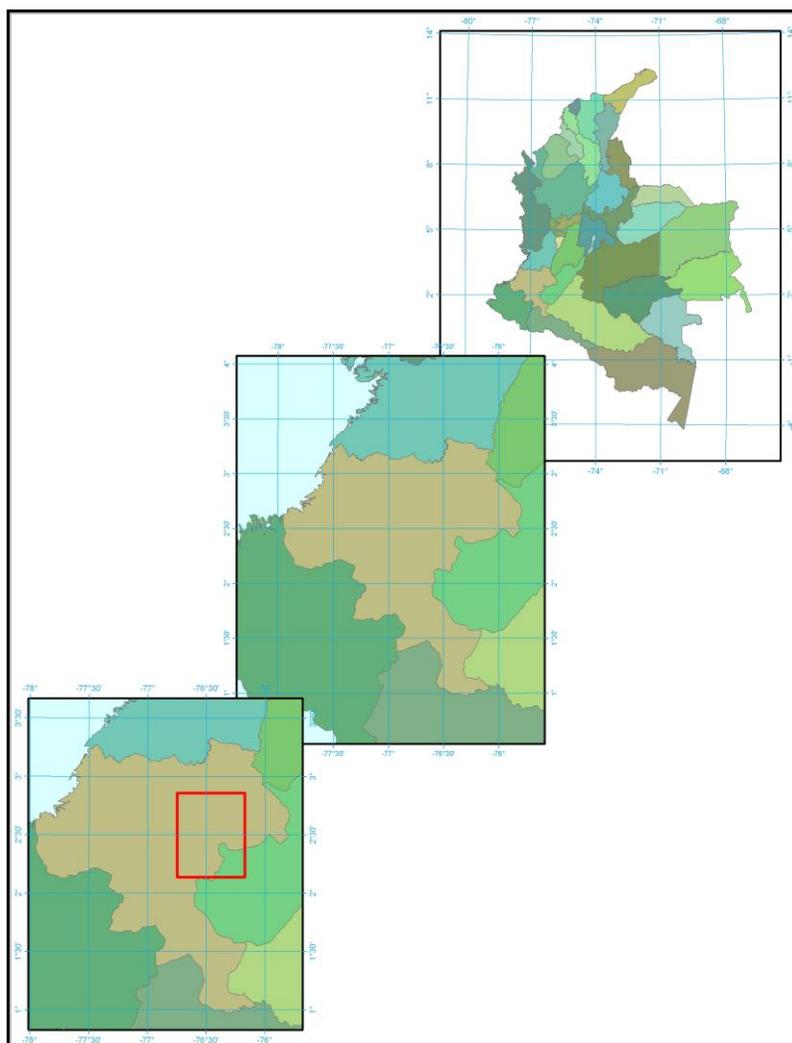
#### 4.9.2. Sistema Experto

Desde hace algún tiempo, los problemas más recurrentes con los que se enfrenta la industria son la falta de personas capacitadas en campos muy específicos y el elevado costo de sus servicios. Con esto se puede establecer que uno de los bienes mejor valorados es el conocimiento humano, y con esto la capacidad de tomar decisiones y de aportar un punto de opinión. En la actualidad, con la ayuda de personas especializadas se puede crear un sistema que simule la evaluación de los mismos a través de cierta situación. A esto se le conoce como sistema experto.

El término de sistema experto hace referencia a un *software* que “imita el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema en un campo particular” (González, Woods, 2005). Estos sistemas pueden almacenar conocimientos proporcionados por expertos sobre un campo determinado y solucionar un problema mediante la deducción lógica de conclusiones. Los campos de acción del mismo son muy diversos desde la detección de tumores o enfermedades en las personas hasta el tipo de fertilizante necesario para tener una buena cosecha.

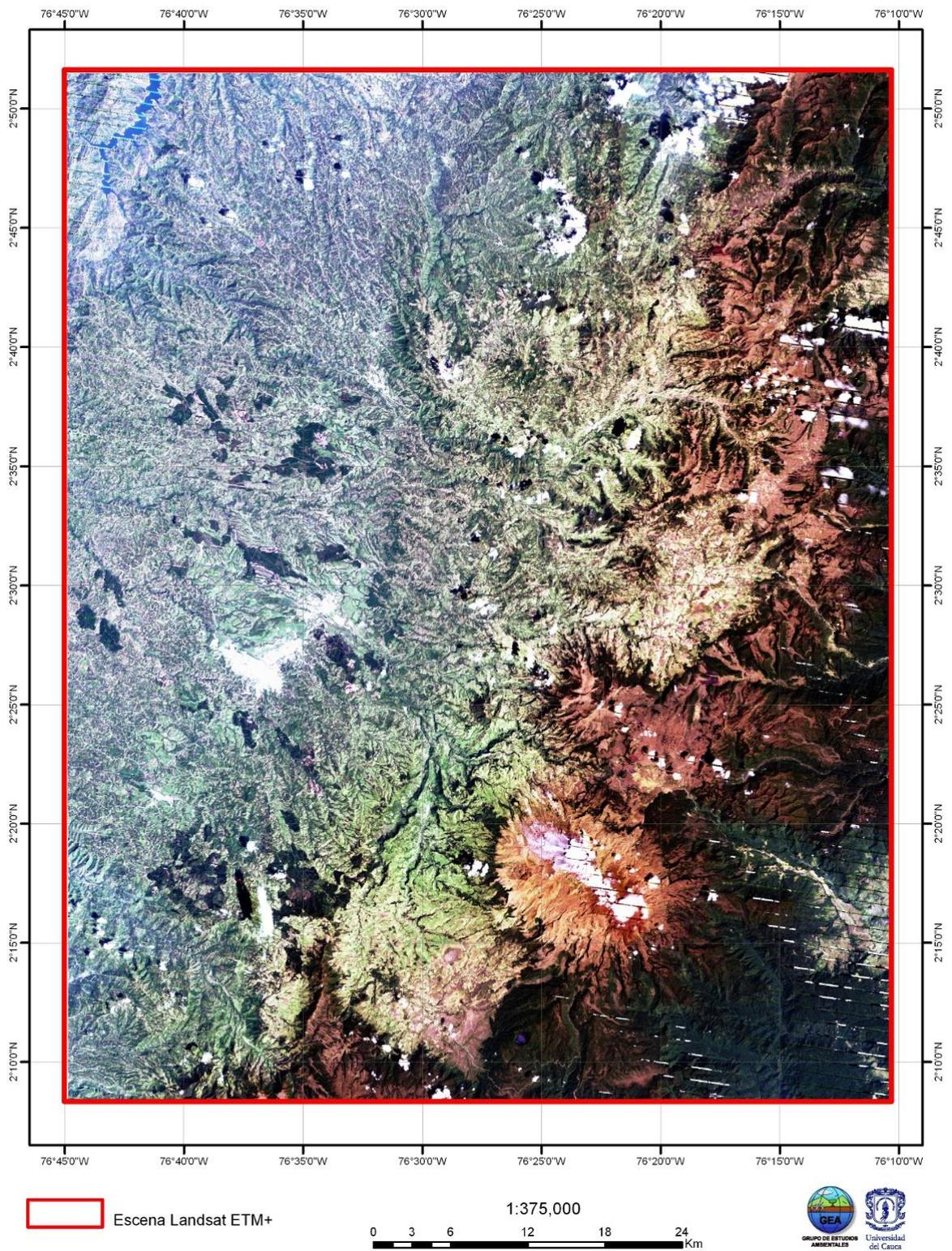
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis realizados en la presente investigación se llevaron a cabo sobre la región del departamento del Cauca, que contiene a *grosso modo*, al noroccidente, el embalse de la Salvajina, al suroriente, el volcán Puracé, limitando además con el departamento del Huila, tal como se observa en la Figura 26, la región cubre 64 km por 80 km aproximadamente para un área total de 5120 km<sup>2</sup>.



**Figura 25.** Localización del Departamento del Cauca (GEA)

La Figura 25 muestra la localización del Departamento del Cauca en Colombia, lugar donde se encuentra la zona de trabajo de este estudio.



**Figura 26.** Zona de trabajo año 2010 combinación 3,2,1 (RGB) con cambio de contraste (modificada de fuente GEA, 2011)

De acuerdo al estándar *Landsat*, esto representa una imagen de 2136x2652 píxeles (30 m por píxel), en 9 bandas (contando dos térmicas), con lo que cada muestra completa tiene un peso de 45 MB.

En esta región se puede encontrar una gran variedad de coberturas (GEA), permitiendo realizar un mejor análisis, para el caso en el que se desee extrapolar el método encontrado para el resto del país. Debido a la resolución temporal del *Landsat*, no siempre se puede contar con la seguridad de que en el momento en que el satélite pase sobre cualquier región del mundo, ésta se encuentre sin nubes, por esta razón, no siempre se puede trabajar con imágenes del mismo año, como en este caso, la Figura 26 muestra una imagen del año 2010, aunque hay nubes en la zona, la cantidad es mucho menor que en otros momentos de ese año y del año 2011.

### **5.1. SLC-OFF**

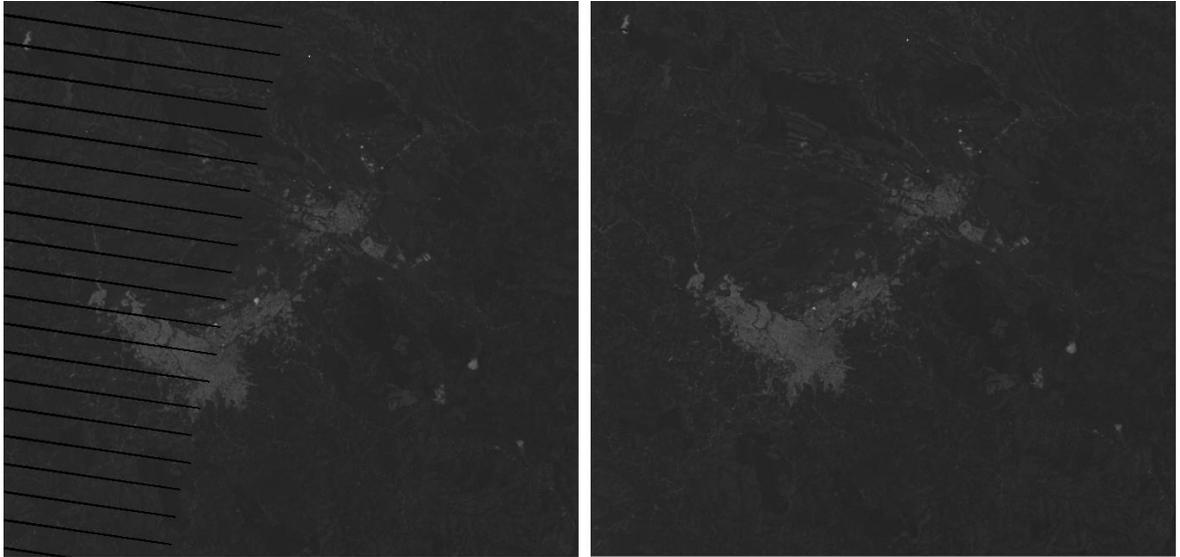
Como ya se mencionó en la sección 3.4.4., las imágenes obtenidas del *Landsat7 ETM+* tienen un problema denominado *SLC-off* que se traduce en la pérdida de cierta cantidad de información específicamente en los extremos horizontales de la imagen. Este inconveniente debe ser solucionado desde el comienzo del procedimiento para que los resultados obtenidos de aquí en adelante sean los adecuados a los requerimientos.

Para realizar esta corrección se debe contar con dos imágenes de la misma zona, de preferencia adquiridas en el mismo año, o en un rango no muy lejano de este. En el trabajo se utilizó una imagen del año 2008 y otra del año 2010, con la menor cantidad de nubes posible, y partiendo de la premisa que el error no siempre se presenta en la misma zona, se reemplazaron los píxeles faltantes en la imagen del 2010, por aquellos de la imagen del 2008 y posterior a esto, se realizó un realce de esos píxeles para asegurar que los posible cambios presentados en los dos años, no afectaran la respuesta de la nueva imagen.

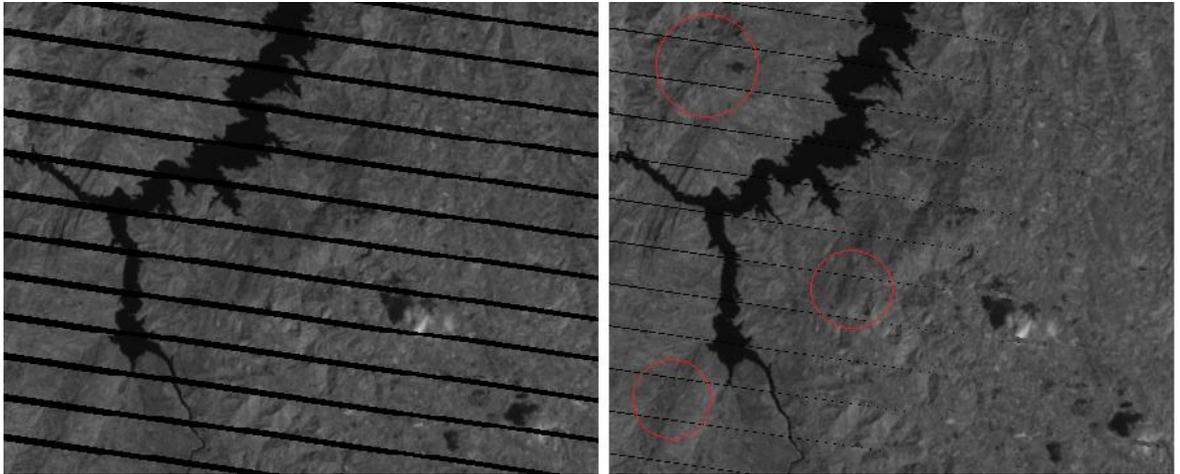
Para los objetivos de esta investigación se contó con imágenes previamente compensadas de este tipo de error, tal como se observa en la Figura 27, por lo que los artefactos resultantes en los análisis como tal no son defectos del método implementado y es conveniente establecer un procedimiento más ajustado para este tipo de compensación, que es una tarea más allá de los objetivos del presente trabajo.

Sin embargo, para interpretar correctamente los resultados es necesario conocer los errores derivados de la compensación. Así, un aspecto a tener en cuenta, es que a medida que se va del centro al extremo de la imagen, el error es más grande (mayor cantidad de píxeles perdidos), por lo cual y, a pesar de que el error

no siempre se encuentre en el mismo lugar, en esas zonas, no se podrá hacer una total compensación.



**Figura 27.** Imagen de Popayán con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 1 (modificada de GEA)



**Figura 28.** Imagen de la Salvajina con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 4 (modificada de GEA)

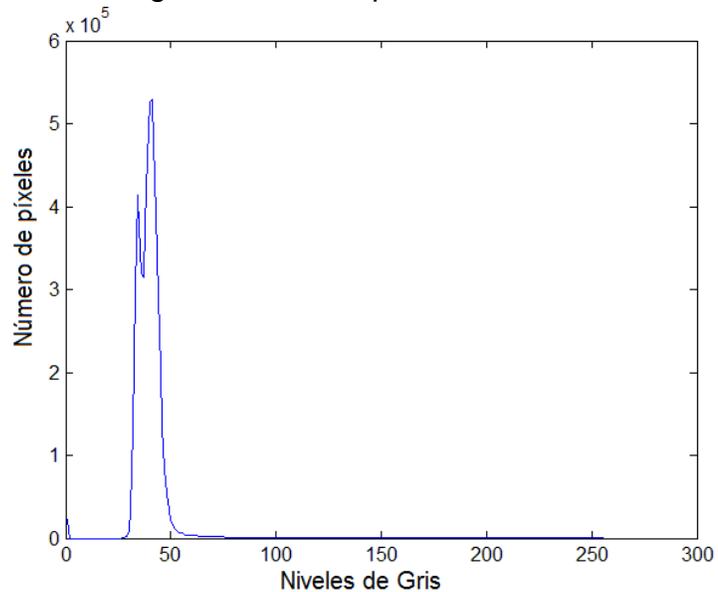
En las Figuras 28 y 29 se puede observar, encerrados en círculos de color rojo, la presencia de artefactos residuales, que posteriormente responderán a los diferentes filtros texturales, con lo que es importante tener en cuenta estas zonas para evitar posibles confusiones.



**Figura 29.** Imagen del volcán Puracé con SLC-off (izq.) y con corrección (der.) en la banda 4 (modificada de GEA)

## 5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN DE LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Al realizar un análisis de los histogramas por bandas se observa una concentración de los niveles de gris en una región muy limitada, característica propia de imágenes de bajo contraste, tal como se ha visto en las imágenes anteriores. Esta característica sugiere que las diferentes regiones de interés sobre la imagen tendrán niveles de gris similares, con lo que su diferenciación no puede basarse en métodos de segmentación simples como la umbralización.



**Figura 30.** Histograma de la banda 1 (azul)

En la Figura 30 se observa el histograma de la banda correspondiente al azul, las otras bandas presentan el mismo comportamiento: bajo contraste con tendencia a los niveles de gris bajos. En este sentido es necesario caracterizar en alto detalle cada una de las estructuras para evitar confusiones en el sistema de clasificación.

### 5.3. REDUCCIÓN DEL ESPACIO MEDIANTE UTILIZACIÓN DE PCA

Como ya se había mencionado en secciones anteriores, el consumo de recursos computacionales para poder procesar toda la información presente en las 9 bandas del *Landsat7* sería demasiado grande, sin mencionar el tiempo que ello requeriría. Al trabajar con un rango tan amplio del espectro electromagnético, se puede llegar a tener información redundante, que, al ser eliminada, significa la reducción de la dimensionalidad de la información y con ello el aumento en la velocidad y tiempo de procesamiento.

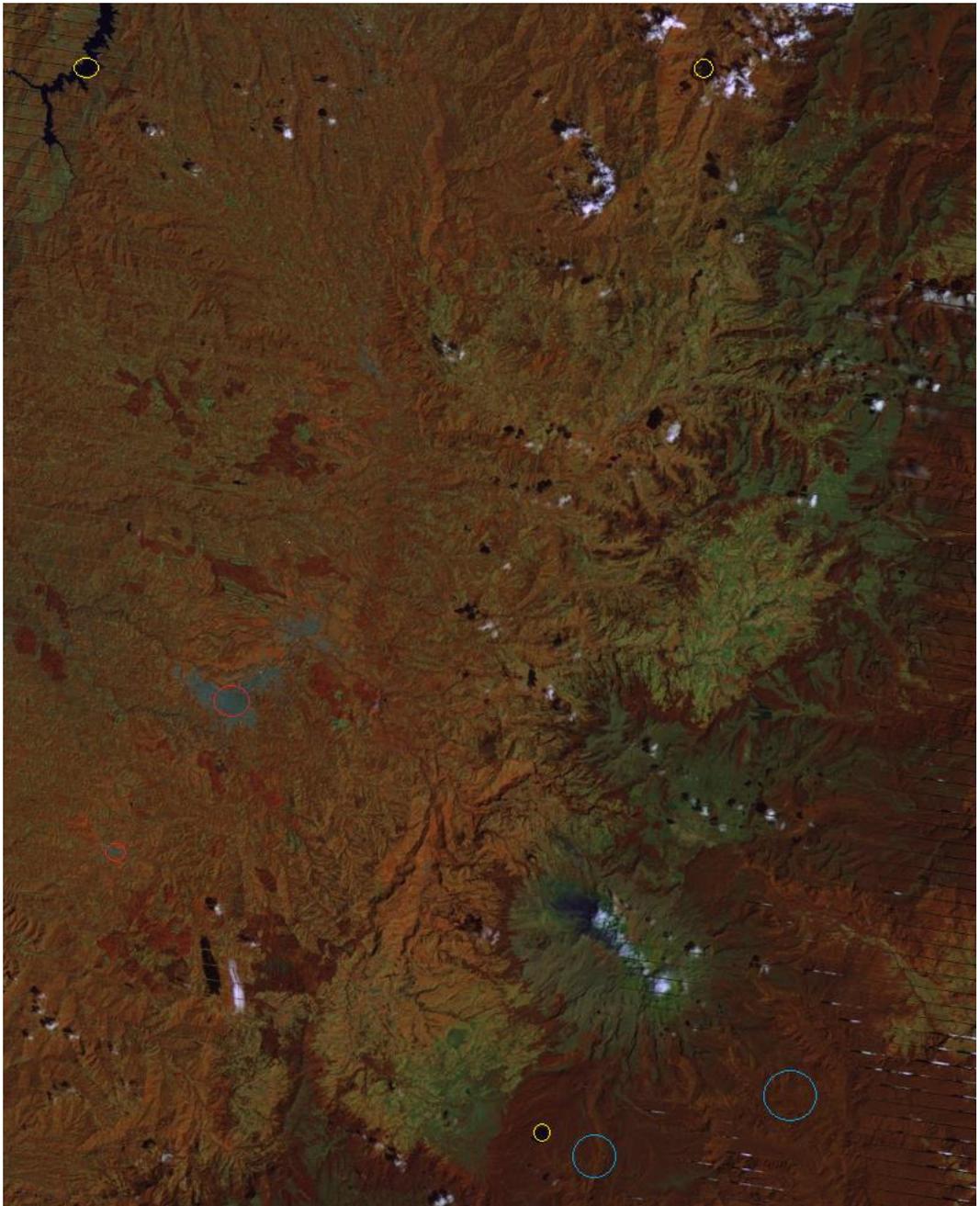
Para este fin, se hace uso del análisis por componentes PCA, que se detalla en la sección 4.6; el primer paso a realizar es el cálculo de la matriz de covarianza mediante la ecuación 24 y posterior a esto el de la matriz de correlación con la ecuación 25. Todo este desarrollo se realiza para seis de las nueve bandas, excluyendo la pancromática y las 2 térmicas (que tienen una resolución espacial diferente). Como se cuenta con imágenes de dos años diferentes, se realiza la correlación por separado para las dos y luego se promedian los resultados.

**Tabla 8.** Correlaciones promedio de las imágenes 2008 y 2010

<b>Bandas</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>1</b>					
<b>2</b>	0.97	<b>1</b>				
<b>3</b>	0.93	0.96	<b>1</b>			
<b>4</b>	0.56	0.60	0.53	<b>1</b>		
<b>5</b>	0.70	0.74	0.74	0.76	<b>1</b>	
<b>7</b>	0.76	0.79	0.83	0.52	0.91	<b>1</b>

De la Tabla 8, se puede apreciar que las mayores correlaciones se presentan entre las bandas 1, 2 y 3, y las bandas 5 y 7, con valores por encima de 0.90, lo cual significa que la información contenida en esas bandas es prácticamente la misma, y en vez de utilizarlas todas, se puede escoger una que represente a las demás para cada caso, por otro lado, la banda 4 no se correlaciona con ninguna otra y por tanto debe mantenerse. En concordancia con la sección 3.4.3, y con el fin de poder identificar las coberturas vegetales, se escogen las bandas 3, 4 y 5, para combinarlas como 4,5,3 en RGB, otra combinación muy utilizada, es la 4,5,7, pero según los resultados de la Tabla 7, se decide no utilizarla como combinación principal, pues las bandas 5 y 7, presentan redundancia en la información.

#### 5.4. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS



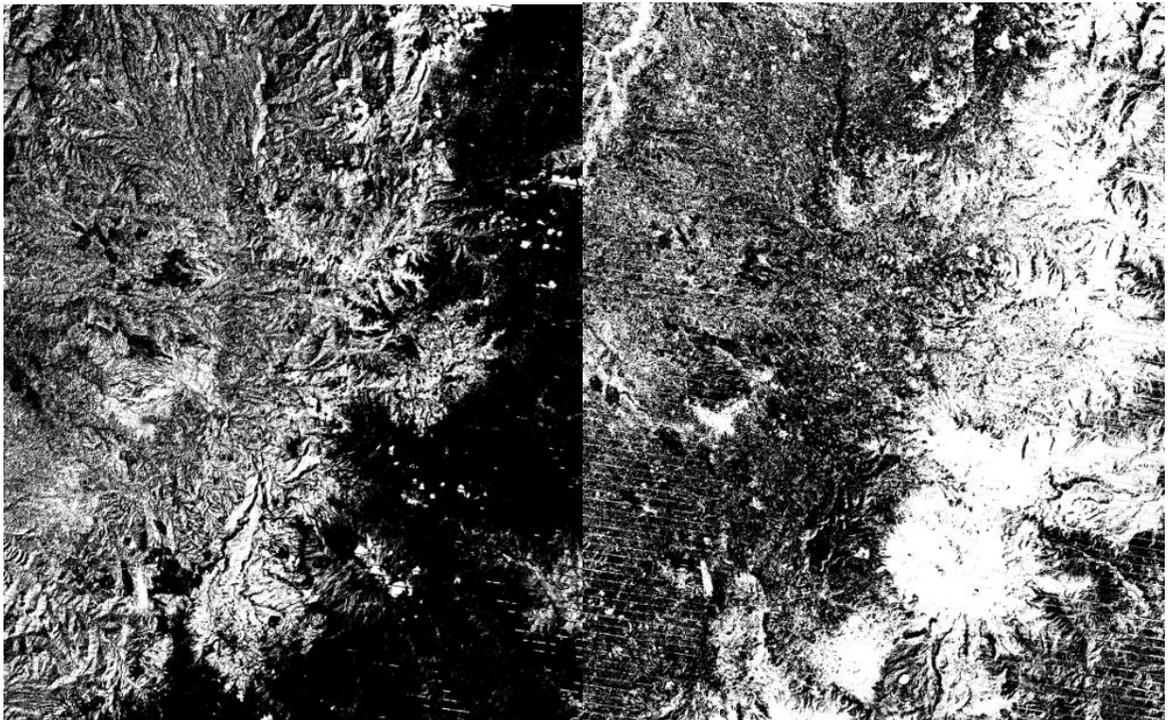
**Figura 31.** Combinación 4, 5, 3 para la zona de trabajo (modificada de GEA)

Al realizar la combinación 4,5,3, se puede saber de forma visual, a qué cobertura corresponde cada color, por ejemplo, en la Figura 31, los colores rojizos (encerrados en círculos azules) representan bosques naturales y sembrados, el color negro (incluyendo grises oscuros, en círculos amarillos), las sombras y el

agua y el color azul grisáceo (en círculos rojos), las ciudades (esto basado en las clasificaciones dadas por el proyecto *CORINE Land Cover*). Se podría continuar de este modo, pero a medida que se especifica más y más en otros colores con tamaños muy pequeños, es difícil estar seguro de si lo que se está observando es o no determinada cobertura o uso del suelo. Para ello, se puede hacer uso de otros métodos que, con ayuda de la nueva tecnología y el procesamiento de imágenes, pueden dar mejores resultados.

#### 5.4.1. SEOF

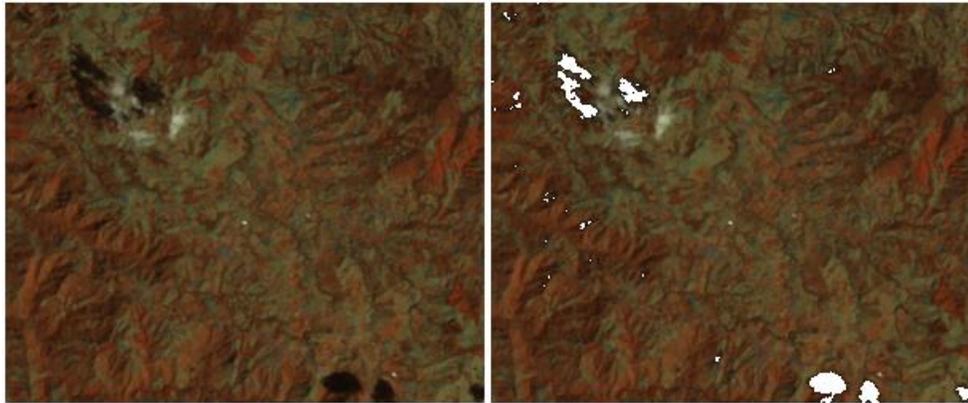
Una *SEOF* es un análisis por componentes principales, en el cuál se logra concentrar toda la información de las tres bandas escogidas con anterioridad en una sola banda o imagen (en el mejor de los casos) ó en dos bandas que representarían las dos primeras componentes principales que, generalmente contienen la mayor parte de la información.



**Figura 32.** Primera (izq.) y segunda (der.) componente principal

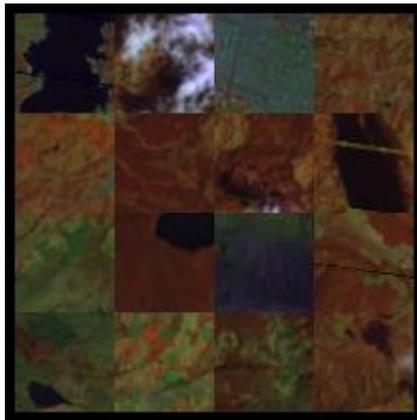
Para poder calcularla, se realiza el mismo procedimiento utilizado para la reducción de espacio, pero, aplicando el modelo de la ecuación 28 a las bandas antes de calcular la matriz de covarianza (para este caso no es necesario hallar la matriz de correlación), y para generar la nueva imagen, que se ilustra en la Figura 32, se utiliza la ecuación 29.

Al observar las imágenes, se puede ver claramente que en la *SEOF1*, hay más información que en la *SEOF2*, esto basado en la cantidad de gris presente en cada imagen. Con lo cual se procede a agrupar valores similares, que se traducen en diferentes coberturas o *clusters* con la misma información. Uno de esos *clusters*, es la sombra generada por las nubes (Figura 33), la cual es de gran importancia, porque al poder segmentarlas, se sabe en qué lugares la información de la cobertura sigue siendo la misma de sus alrededores y no se marca como una nueva cobertura.



**Figura 33.** Imagen original (izq.) e imagen con sombras segmentadas (der.)

#### 5.4.2. Matrices de coocurrencia



1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

**Figura 34.** Mosaico en combinación 4, 5, 3, (RGB) de diferentes coberturas presentes en la zona de trabajo: 1) Salvajina, 2) nube, 3) ciudad, 4) pastos, 5) pasto y ciudad, 6) bosque, 7) bosque, 8) sombra de nube, 9) cultivos, 10) bosque natural y lago, 11) cima del volcán, 12) Bosque y humedal, 13) páramo y laguna, 14) cultivos, 15) bosque y pastos, 16) pastos, nube y sombra de nube

Hace referencia a las diferentes características que se pueden obtener de algún tipo de textura, que en este caso está representada por las diferentes coberturas. La idea básica radica en que cada cobertura, ciudad, bosque, pasto, agua, nube, roca, entre otras, posee unas características especiales que lo representan así mismo.

Se determinaron 5 características de matrices de coocurrencia: contraste, energía, homogeneidad, disimilaridad y entropía a partir de las ecuaciones de la sección 4.3.2 al mosaico que se muestra en la Figura 34, la cual contiene 16 cuadros de las diferentes coberturas presentes en la zona de trabajo, para poder determinar si se pueden o no diferenciar cada una de ellas. Además, esto permite disminuir el tiempo empleado en el procesamiento, ya que a pesar de haber reducido la dimensión del espacio de trabajo, cada imagen es muy grande, conservándose las especificaciones de distancia y ángulo, enunciadas en la sección 4.3.1.

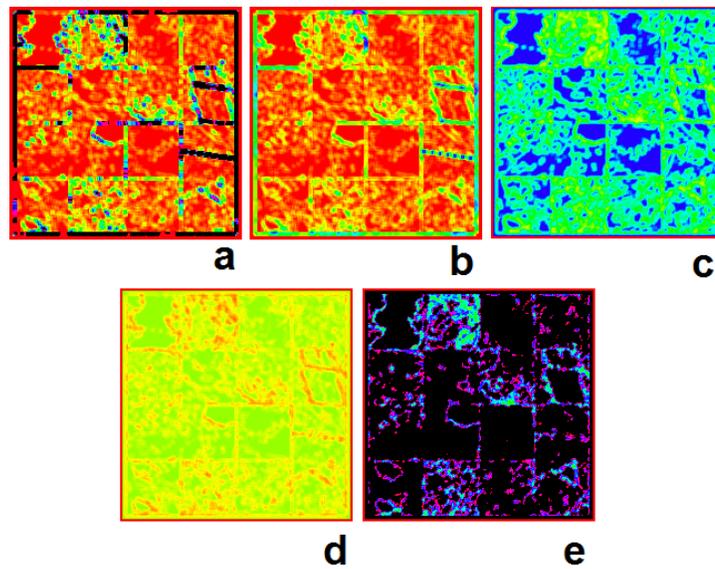
Al igual que en el caso de las bandas, cada característica de textura, sigue siendo representada en una gran imagen, y nuevamente es demasiada información para procesar, por tanto, se decide observar la correlación entre ellos y determinar si se deben usar todos o solo unas pocas.

**Tabla 9.** Correlaciones promedio de las imágenes 2008 y 2010

<b>Características</b>	<b>Contraste</b>	<b>Energía</b>	<b>Homogeneidad</b>	<b>Disimilaridad</b>	<b>Entropía</b>
<b>Contraste</b>	<b>1</b>				
<b>Energía</b>	0.27	<b>1</b>			
<b>Homogeneidad</b>	0.24	0.75	<b>1</b>		
<b>Disimilaridad</b>	0.86	0.55	0.36	<b>1</b>	
<b>Entropía</b>	0.22	0.94	0.90	0.45	<b>1</b>

Para este caso, se puede decir que la alta correlación se presenta en valores mayores de 0.85 para la disimilaridad con el contraste y para la energía, homogeneidad y entropía. Finalmente y según lo observado en las imágenes de la Figura 35 se decide utilizar el contraste y la energía como representativos de las demás características.

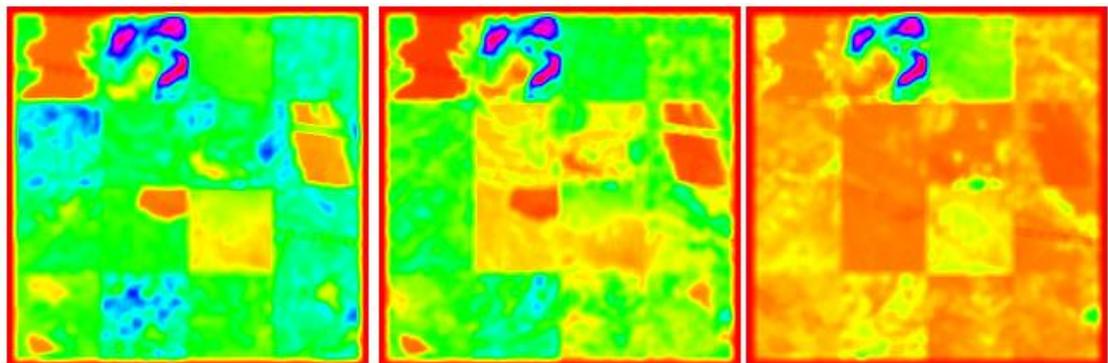
Lo anteriormente realizado es uno de los métodos más comunes y utilizados, sin embargo, no se marca una diferencia notable entre cada tipo de cobertura, lo que quizás se deba a la resolución espacial de las imágenes.



**Figura 35.** Características de la matriz de coocurrencia: a) contraste, b) disimilitud, c) entropía, d) homogeneidad y e) energía en falso color

#### 5.4.3. Transformada discreta de coseno.

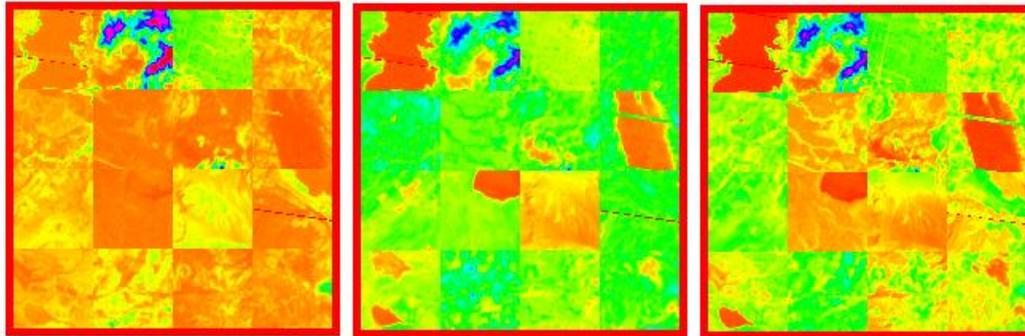
La *DCT* es muy empleada para la diferenciación de texturas a través de la aplicación de la ecuación 20. En la Figura 36, se puede apreciar cómo, para la banda 4 y 5, se logra destacar el agua y las sombras de las nubes en un tono anaranjado y la nube en un color fucsia. Por lo tanto con la diferencia en color, se asegura que se puede conocer desde este valor ciertas coberturas.



**Figura 36.** DCT para las bandas 4 (izq), 5 (centro) y 3 (der) en falso color

#### 5.4.4. Filtros de Gabor.

En la aplicación del filtro de Gabor se considera  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  iguales a 2, y el filtro está centrado en el origen de la imagen. Al observar la Figura 37, se resalta que la diferencia entre las coberturas es mucho más marcada que en la transformada discreta de coseno y además se logra apreciar una mejor definición entre las fronteras de las sub imágenes, debido a la gran dificultad para definir el cambio de un tipo de textura.

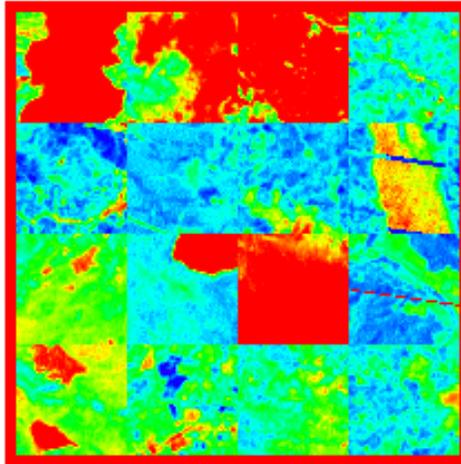


**Figura 37.** Filtro de Gabor para las bandas 4 (izq), 5 (centro) y 3 (der) en falso color

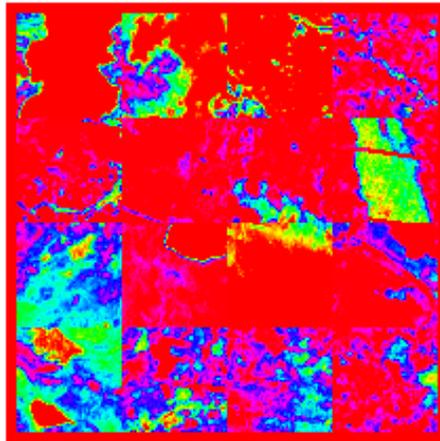
#### 5.4.5. Índices de Vegetación.

A pesar que la clasificación por el método de texturas es muy convencional, también se tienen otros métodos, que se basan en las firmas espectrales de cada cobertura, con los cuáles se puede resaltar un tipo específico de cubierta, en este caso la vegetación, para lo cual se basa en la sección 4.7.2.

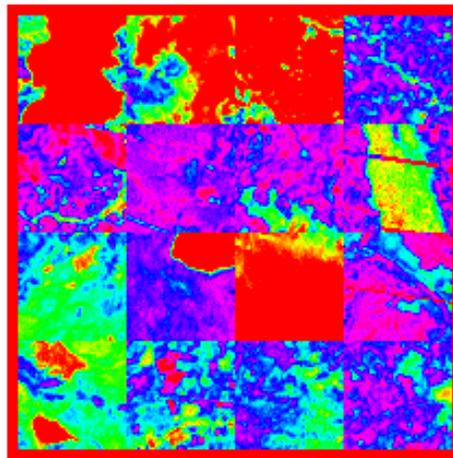
Los resultados de *NDVI* se vislumbran en la Figura 38, donde todas las zonas en colores rojos o amarillos, representan los lugares en donde no hay vegetación, y las demás zonas, donde si la hay. Las Figuras 39 y 40 ejemplifican los otros dos índices, donde el índice *SAVI* presenta una mejor respuesta debido a que permite resaltar otras características de la vegetación.



**Figura 38.** NDVI para el mosaico del año 2010 en falso color



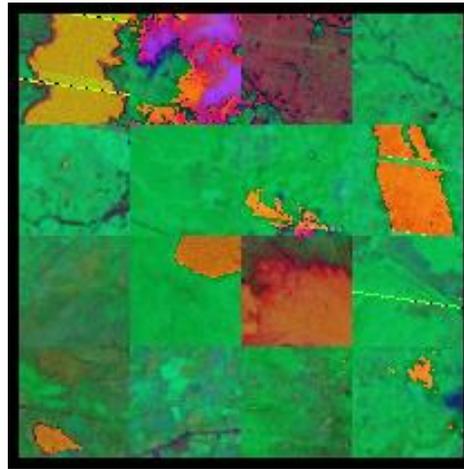
**Figura 39.** PVI para el mosaico del año 2010 en falso color



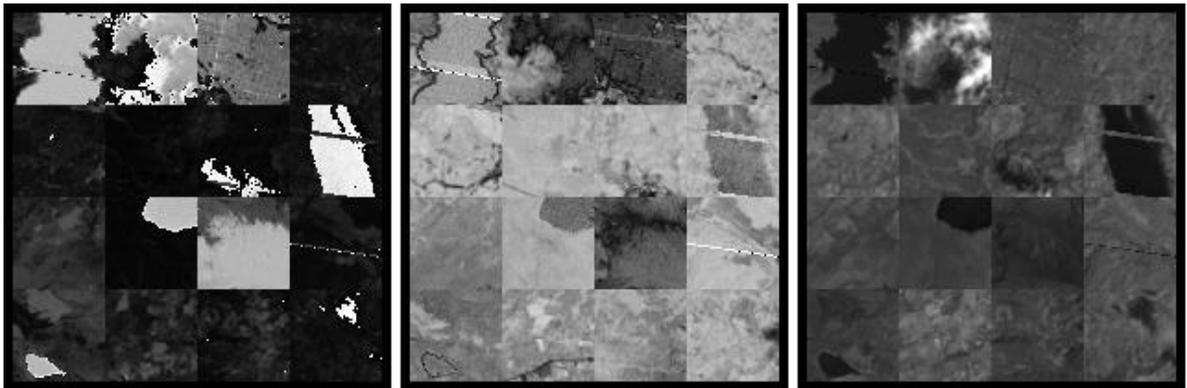
**Figura 40.** SAVI para el mosaico del año 2010 en falso color

#### 5.4.6. Espacios de color.

Se realizó un estudio de las diferentes coberturas sobre la imagen mosaico, la cual se transformó en otros espacios de color como el *HSV* en la Figura 41 y *YCbCr* en la Figura 43, donde se puede ver el mosaico que se ha venido trabajando en el nuevo espacio de color. Para el *HSV* se puede apreciar cómo se destacan ciertas coberturas frente a otras, y como se sabe que la mayor cantidad de información se concentra en uno de los planos, se hace la separación de los mismos (Figura 42), para poder obtener el plano *H*.



**Figura 41.** Mosaico en combinación 4, 5, 3, en el espacio de color HSV

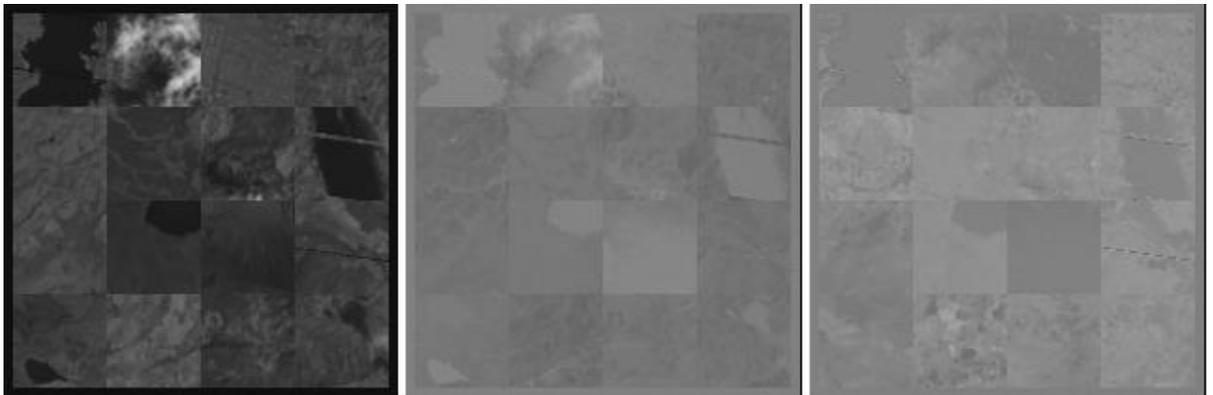


**Figura 42.** Separación en planos H (izq), S (centro) y V (der)

En el caso del *YCbCr*, toda la luminancia se concentra en el plano *Y* y las otras dos componentes permiten diferenciar entre verde, azul, naranja y fucsia. La Figura 44 muestra la descomposición de este espacio de color, se aprecia que la mayoría de la información se presenta en el plano de la luminancia, mientras que los de crominancia, tienden a presentar bajo contraste.



**Figura 43.** Mosaico en combinación 4, 5, 3, en el espacio de color YCbCr



**Figura 44.** Separación en planos Y (izq.), Cb (centro) y Cr (der.)

#### 5.4.7. Transformada *Tasseled Cap*.

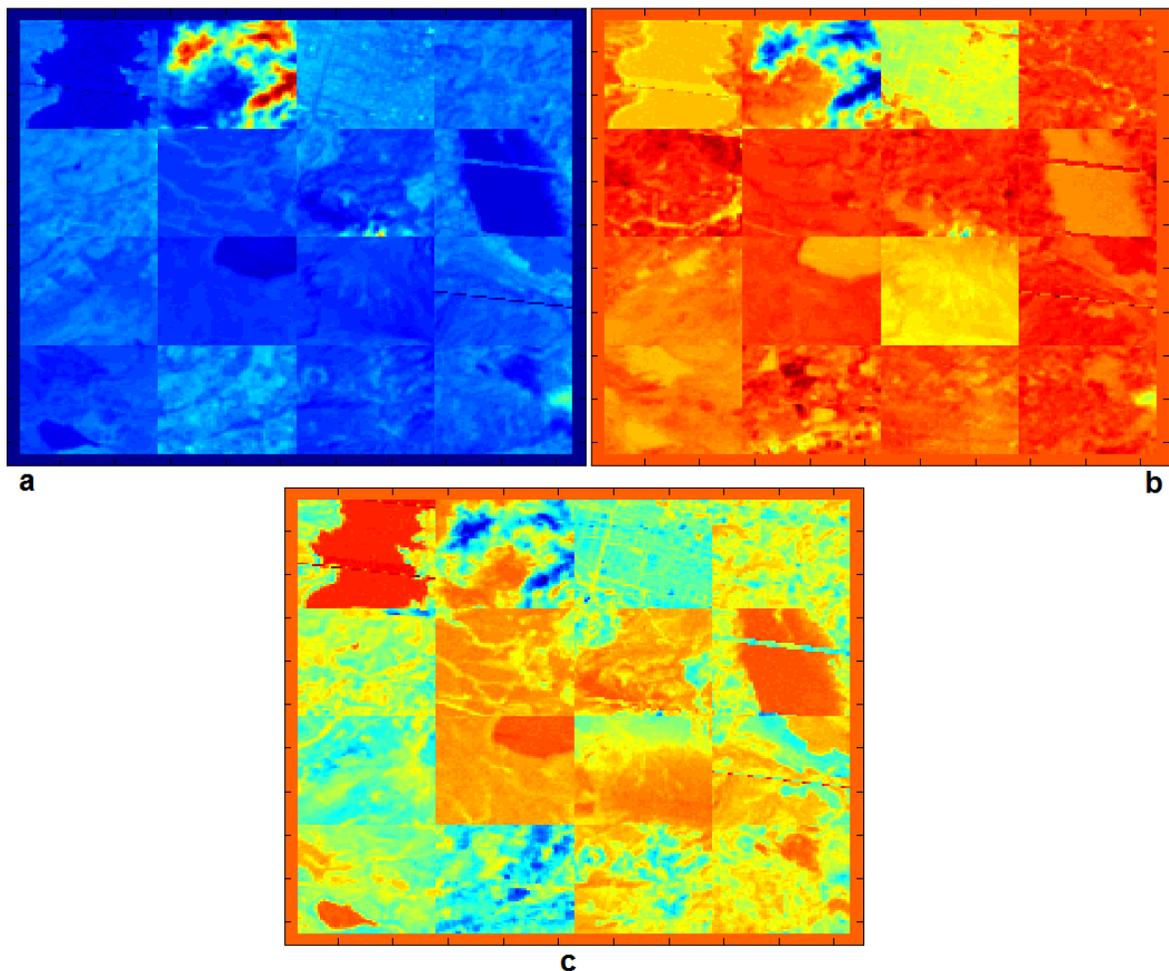
En complemento a los espacios de color, se tiene la transformada *tasseled cap*, que se basa en un principio parecido al de las componentes principales, ya que se trata de una transformación lineal a partir de los coeficientes de la Tabla 7, pero incluye a todas las bandas que se utilizan en el análisis por componente principal, antes de la reducción del espacio.

Dentro de esta investigación se abordan tres combinaciones, en las que se pueden distinguir planos de variación de gran interés para el estudio detallado de suelos y vegetación. En este sentido, suelen distinguirse tres planos: de vegetación, formado por el eje de brillo y verdor, el de suelos, formado por el brillo y humedad, y el de transición, formado por la humedad y el verdor, los cuales se pueden observar en la Figura 45.

Una de las ventajas de esta transformación, frente al PCA, radica en su interpretación física, dado que, los componentes deducidos a partir de la *TTC* tienen un significado preciso, independiente de las condiciones de la escena,

puesto que se apoyan sobre las características de las bandas espectrales en consideración. Por tanto, los coeficientes de la Tabla 7, pueden aplicarse a distintas imágenes del mismo sensor, con las salvedades propias de considerar que fueron extraídos a partir de los rasgos agrícolas del medio oeste americano (Chuvieco, 1996).

Otro factor a tener en cuenta sería el referente al escalado de la imagen resultante, que varía notablemente según la fecha del año y las condiciones de iluminación, para lo cual pueden emplearse alguno de los procedimientos aplicados anteriormente para índices de vegetación que compensan este impase.

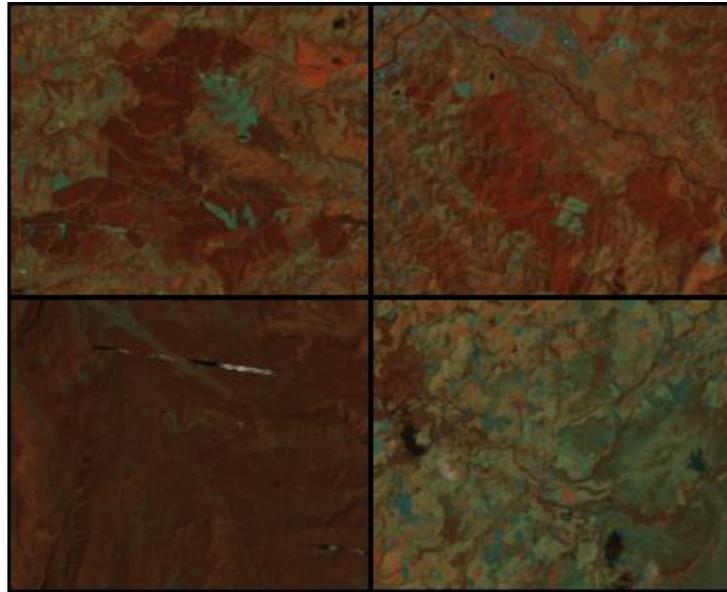


**Figura 45.** Transformada *Tasseled Cap*: a) brillo, b) verdor y c) humedad

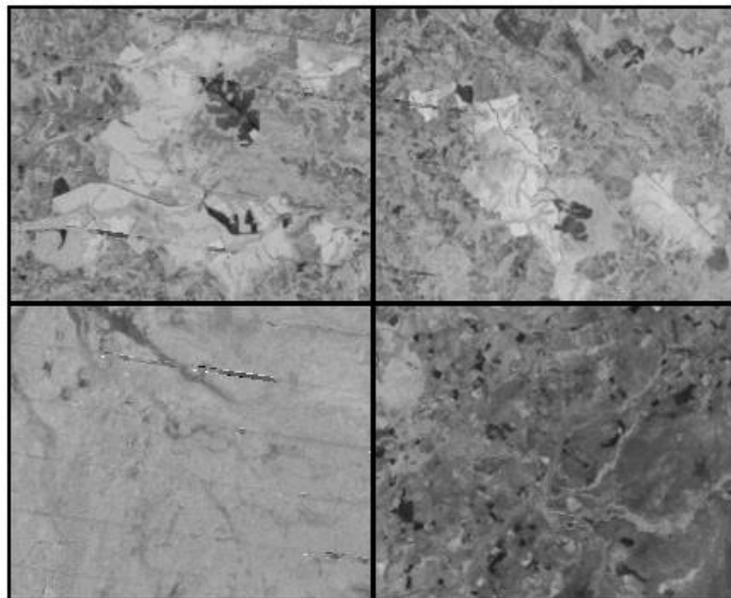
#### 5.4.8. Razones de bandas

Aunque en esta combinación de las diferentes bandas no se puede decir con total certeza que cierta característica corresponde a una cobertura específica, sí se

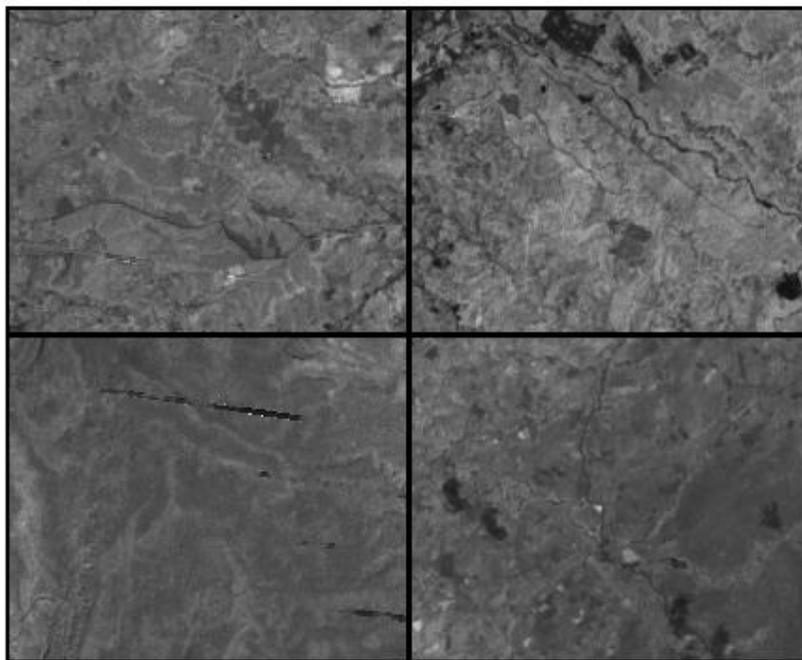
pueden marcar diferencias entre ellas. Con base en la sección 4.7.4, sobre el mosaico que se muestra en la Figura 46, se aplica la ecuación 36 que permite resaltar las coberturas que representan los bosques en un gris mucho más claro, tal como se ve en la Figura 47, con las demás ecuaciones presentadas en la misma sección, se obtienen la Figura 48, donde se resalta la ciudad en un tono casi negro y la Figuras 49 para resaltar los bosques, Figura 50 para los bosques talados y la Figura 51 para los bosques talados y ciudad.



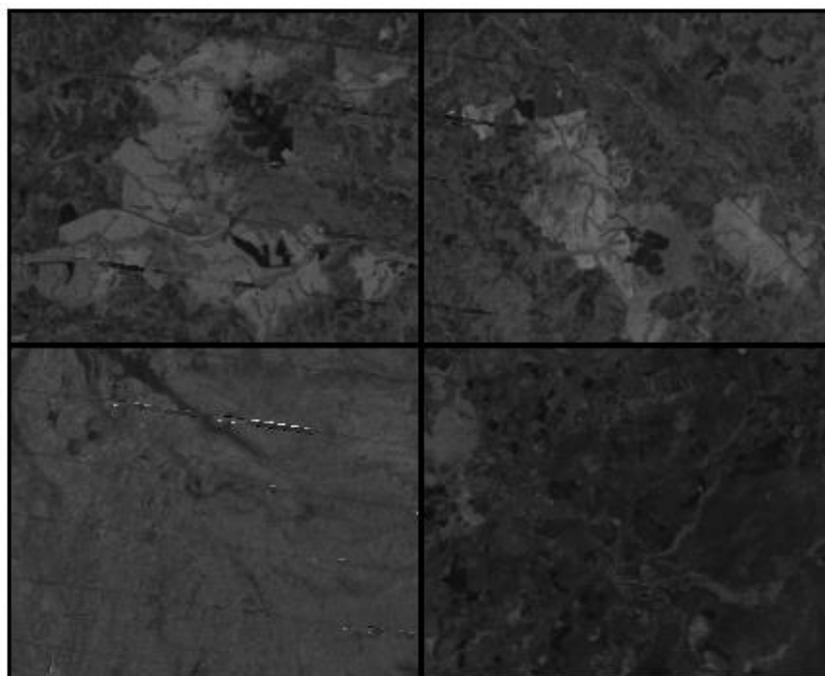
**Figura 46.** Mosaico de bosques, cultivos y ciudad en combinación 4, 5, 7



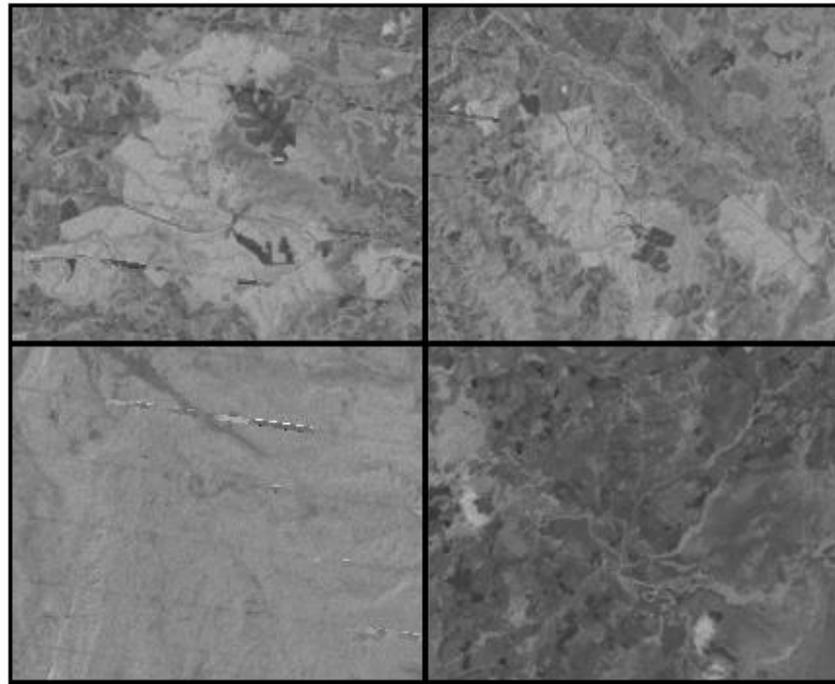
**Figura 47.** Coeficiente  $c1$  para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad



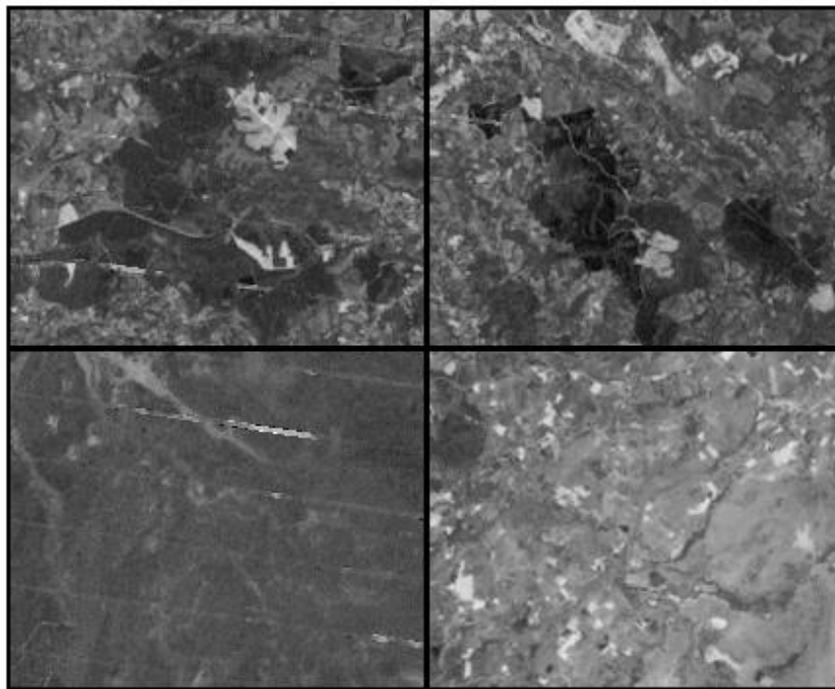
**Figura 48.** Coeficiente c2 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad



**Figura 49.** Coeficiente c3 para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad



**Figura 50.** Coeficiente  $c4$  para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad



**Figura 51.** Coeficiente  $c5$  para el mosaico de bosques, cultivos y ciudad

## 5.5. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN EN EL ESPACIO DE CARACTERÍSTICAS

Después de obtener todas las características en la sección anterior, se procede implementando nuevamente un procedimiento similar al de *PCA* con el que se logra reducir el espacio muestral de características de 40 a 11: banda 2, *SEOF1*, *SEOF* umbralizada (para las sombras y agua), desviación estándar y *DCT* para la banda 3, Filtro de Gabor para la banda 5, la componente *H* y *Cr* para la combinación 4,5,3, el *NDVI*, verdor y el coeficiente *c1*.

A partir del nuevo espacio de características, se encuentra la información más relevante que permite identificar la mayor variabilidad en las coberturas, y se puede apreciar como ninguna de las características de matrices de coocurrencia se encuentra en el nuevo espacio muestral, lo que significa, que a pesar de ser las más conocidas y utilizadas, no permiten una buena diferenciación para la resolución espacial que se está manejando.

## 5.6. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS

Se tomaron 12 muestras *in-situ* de cada una de los 11 tipos de coberturas y usos del suelo, suministradas por el GEA: Bosque natural, bosque plantado, cultivos clase 1, cultivos clase 2, pastos, ciudad, páramo, agua, nubes, sombras de nubes y roca. Para todas las muestras se obtienen resultados de las 11 características, y se prueban dos métodos para obtener y evaluar los resultados de la clasificación.

### 5.6.1. Red neuronal

Para el entrenamiento de la red neuronal, se toma un conjunto de 4 muestras para las 7 primeras coberturas, a las cuales se les extraen las 11 características, y se entrena una red de arquitectura 4:16:1 en configuración perceptrón multicapa con funciones de activación tangenciales y lineal para la neurona de salida.

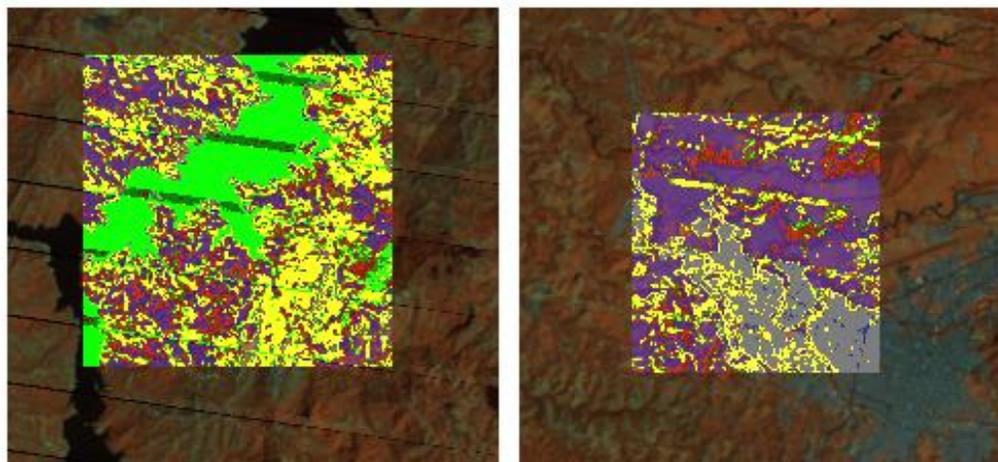
Después del entrenamiento, se realiza una prueba con las 12 muestras de cada cobertura, para determinar la efectividad del resultado, como se muestra en la Tabla 10.

De un total de 84 datos, se obtienen 19 incorrectos, dando como resultado un error del 22.62%. Debido al gran tiempo que tarda la red en arrojar un resultado para la imagen completa, solo se tomaron 7 de las 11 coberturas mencionados al comienzo de esta sección, y se aplicó únicamente a dos pequeñas zonas para mostrar los resultados obtenidos, que se observan en la Figura 52.

**Tabla 10.** Resultados de la red neuronal para 7 clases

Clase \ Muestra	Muestra											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>1. Bosque Natural</b>	1	1	1	1	2	4	-2	2	3	-2	1	3
<b>2. Bosque Plantado</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>3. Cultivos clase 1</b>	2	3	3	3	2	3	4	4	2	4	5	2
<b>4. Cultivos clase 2</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>5. Pastos</b>	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5
<b>6. Ciudad</b>	6	6	6	6	6	7	6	6	6	6	6	6
<b>7. Páramo</b>	7	7	7	7	7	6	7	7	6	6	7	7

Para interpretar adecuadamente los resultados de la Tabla 10, se tiene en cuenta una asignación de 1-7 para cada clase, según el orden en el cual se encuentran enunciadas. El sistema determina para cada muestra, a qué tipo de cobertura pertenece, y si por ejemplo es bosque natural, marca un 1 en el resultado, y así para cada nueva muestra. En caso de que las características no coincidan con la de ninguna de las clases que se han seleccionado, el sistema arroja un valor que se encuentra fuera del rango 1-7, según como lo considere.



**Figura 52.** Resultado de la clasificación con red neuronal de la Salvajina (izq.) y Popayán (der.)

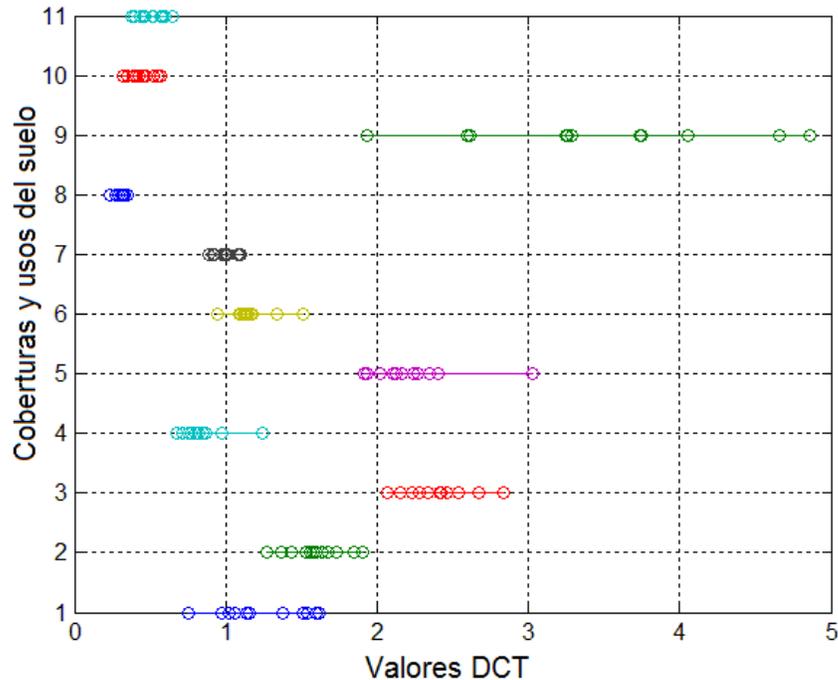
Se observa en la parte izquierda la clasificación realizada por la red a la zona de la Salvajina, en donde se nota de color verde el agua y coberturas aledañas de bosques o pastos en color amarillo y morado. Al lado derecho, se ve parte de la

ciudad marcada de color gris y a sus alrededores, algunos pastos y bosques en color morado y amarillo respectivamente. Basados en la estructura dada a la clasificación del sistema, se sabe que los resultados si bien son acertados, no son totalmente confiables, pues en la mayoría de los casos, presentan errores al clasificar cierta cobertura adecuadamente, pero, asignándole el color de otra.

### 5.6.2. Sistema Experto.

En vista de los resultados obtenidos para la red neuronal, se decide implementar otro método para la clasificación, basado en un sistema experto, en donde se escogieron rangos de acción de cada clase en las 11 características; un ejemplo del método empleado, se muestra en la Figura 53 donde se ordenaron las 11 clases del modo en que se mencionan al comienzo de la sección 5.6.

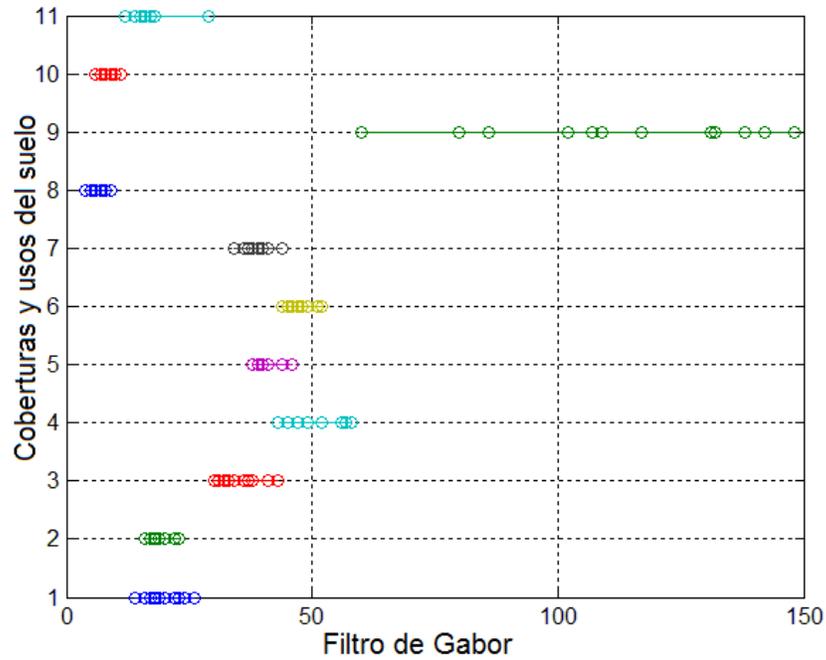
Es notable la tendencia de cada una de las características a ocupar su propio espacio, aunque en general presentan solapamientos que abren la necesidad en algunas coberturas de hacer uso de varias características para permitir una completa diferenciación.



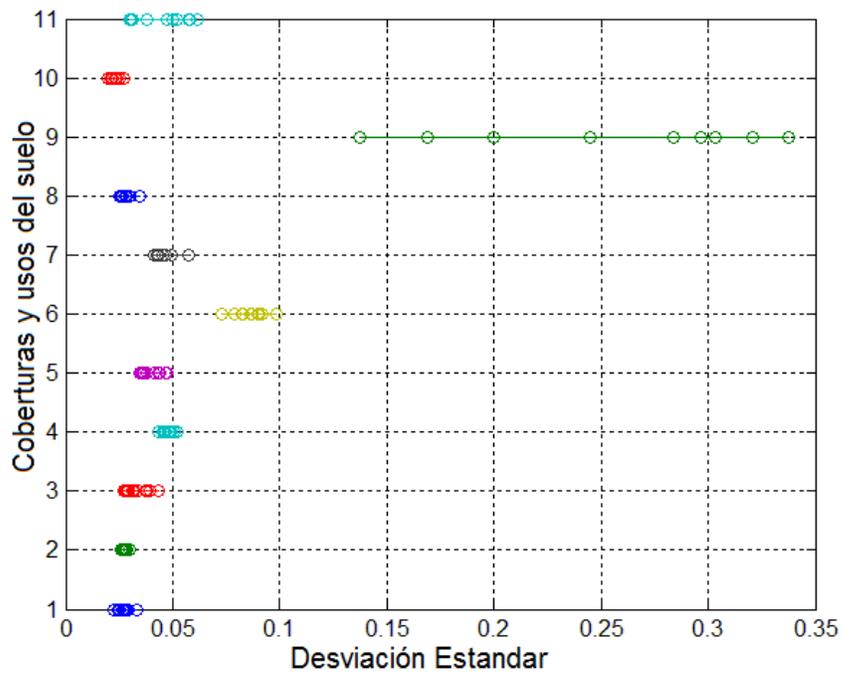
**Figura 53.** Rangos de acción para las 11 clases en *DCT*

A partir de las gráficas para cada característica se busca encontrar aquellos rangos en los cuales cada clase se puede diferenciar de las demás, de donde se concluye que las clases terminan por mezclarse en algún rango y es difícil crear

un criterio de separación entre ellas. Los únicos casos en los que una de las clases no se mezcla con las demás, se presentan en el filtro de Gabor de la Figura 54 y la desviación estándar en la Figura 55, para las nubes.



**Figura 54.** Rangos de acción para las 11 clases en el filtro de Gabor



**Figura 55.** Rangos de acción para las 11 clases en desviación estándar

**Tabla 11.** Rangos de las 11 características para las 11 clases del sistema experto

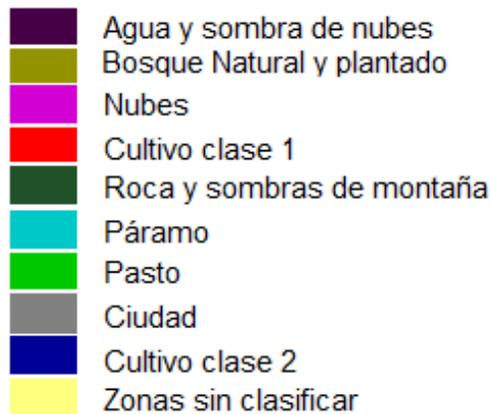
<b>Clase</b>	<b>Rango</b>	<b>Característica</b>
<b>1. Bosque Natural</b>	0.6<n<2.0	<i>DCT</i> banda 3 Coeficiente <i>c1</i>
<b>2. Bosque Plantado</b>	30<n<45	
<b>3. Cultivos clase 1</b>	1.3<n<3.2 29<n<44	<i>SEOF1</i> Filtro de Gabor
<b>4. Cultivos clase 2</b>	0.42<n<0.48 0<n<0.2	<i>Cr 453</i> <i>NDVI</i>
<b>5. Pastos</b>	37<n<43	Banda 2
<b>6. Ciudad</b>	0.07<n<0.115 n<0	Desviación estándar <i>NDVI</i>
<b>7. Páramo</b>	0.19<n<0.28	<i>H 453</i>
<b>8. Agua</b>	n=255	<i>SEOF</i> umbralizada Filtro de Gabor
<b>10. Sombras de nube</b>	n<11	
<b>9. Nubes</b>	n>60 n>0.12	Filtro de Gabor Desviación Estándar
<b>11. Roca</b>	n=255	<i>SEOF</i> umbralizada

En vista de estos resultados, se configura un sistema experto basado en un árbol de decisiones, en donde la primera condición es la selección de las nubes, como primera clase después se empieza a obtener las demás clases, ya que se dejan rangos en los que ya no interviene la clase anterior. La segunda condición se coloca para las sombras de las nubes y el agua y en aumento de orden: roca, páramo, ciudad, cultivos clase 2, pasto, cultivos clase 1 y bosques naturales y plantados.

Los rangos seleccionados se muestran en la Tabla 11, en donde se encuentra la unión en una sola clase de los dos tipos de bosques y del agua con las sombras de las nubes, esto debido a que no se encontró una característica que permitiera la diferenciación total entre esas clases. Además se introdujo una clase adicional, que representa los casos en los cuáles el sistema experto no supo como clasificar un punto determinado.

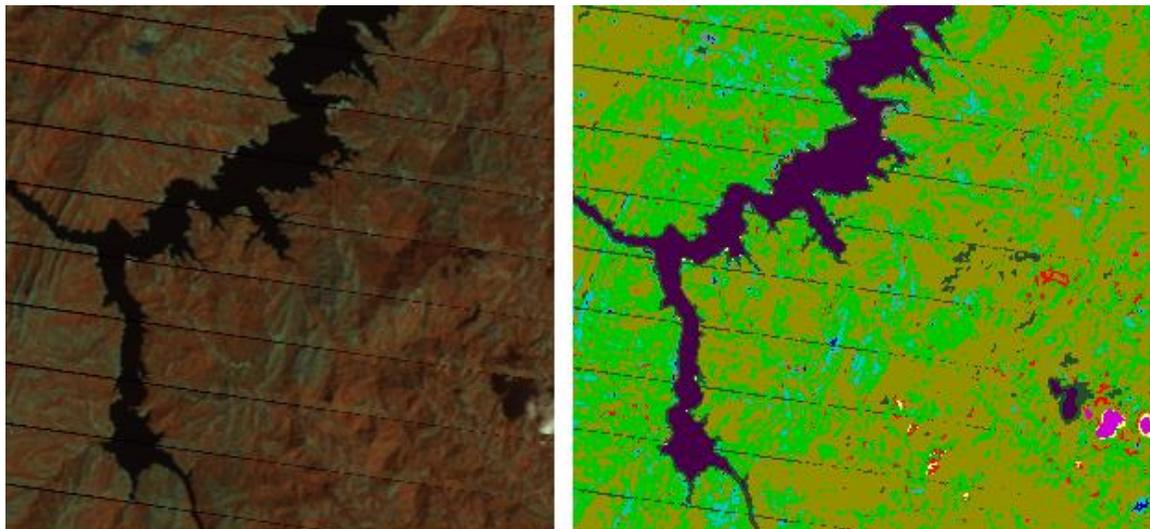
Es importante resaltar que debido a la resolución de la imagen, no se pueden tomar más clases, porque la clasificación se vuelve más compleja, al no tener zonas con un área de suficiente detalle para tomar muestras. Por este motivo, a pesar de obtener una clasificación con un mayor porcentaje de acierto y una velocidad de clasificación mucho mayor que para la red neuronal, aún se

presentan algunos errores, en especial en las zonas de alta montaña, donde la diversidad de coberturas es mucho mayor, en la medida que aumenta la altura.



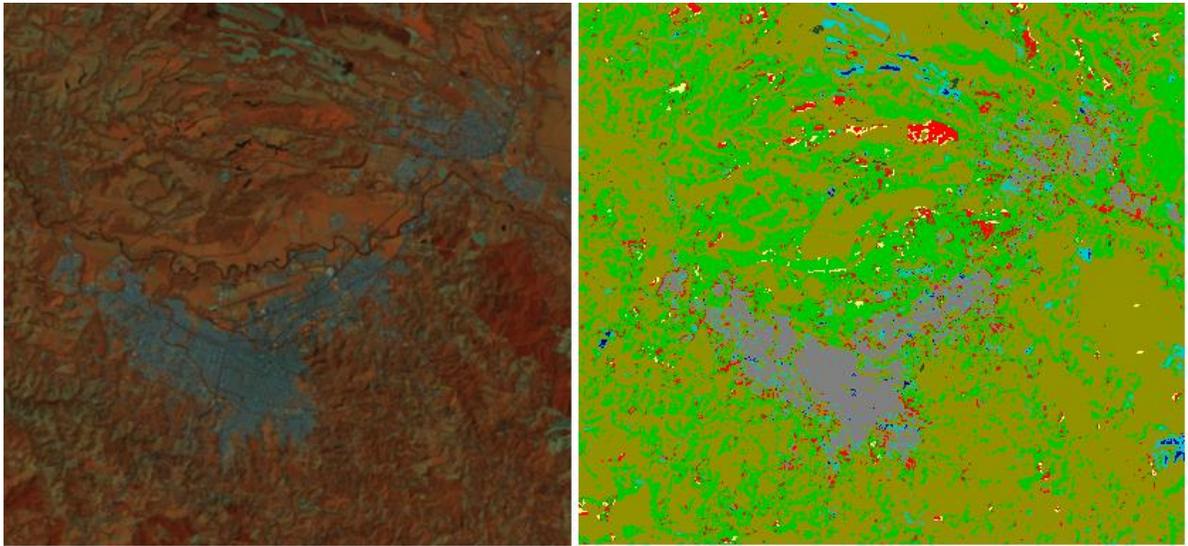
**Figura 56.** Convención de colores para la clasificación del sistema experto

A partir de las convenciones planteadas en la Figura 56, se muestra la clasificación dada por el sistema experto para diferentes zonas de interés desde la Figura 57 a la 62 y se muestra el resultado para toda la zona de trabajo en la Figura 63.



**Figura 57.** Salvajina en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto

En la Figura 57, se aprecia cómo se clasifica correctamente el agua en la Salvajina, al igual que se logra detectar el borde que cubre la represa, que es de arena y, aunque inicialmente no se clasificó como una clase aparte, el sistema la detecta como tal.

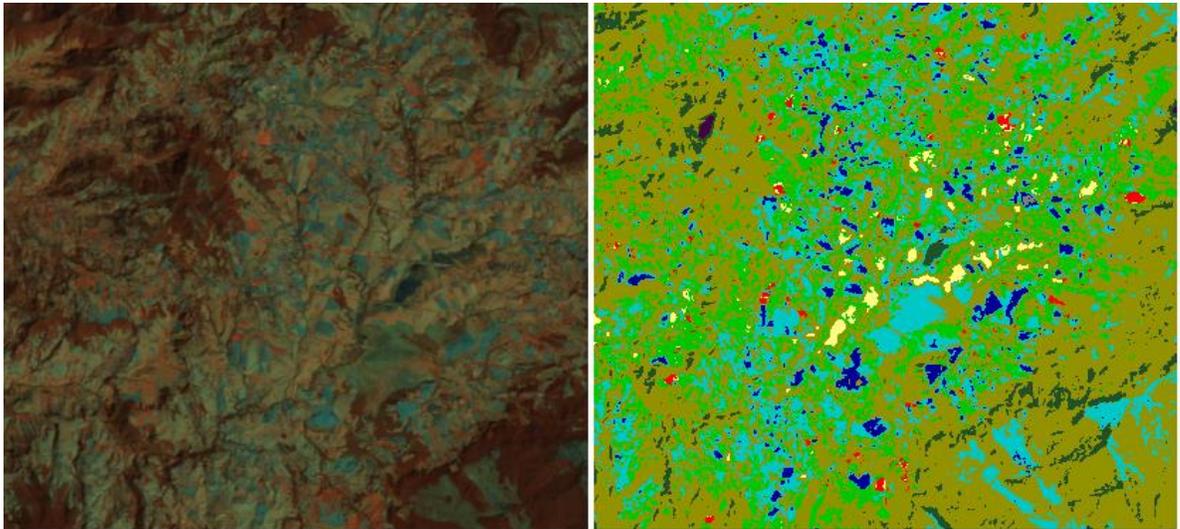


**Figura 58.** Popayán en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto

A pesar de que las casas en el centro de Popayán están construidas con techos de tejas, el sistema es capaz de seguir clasificando esta zona como ciudad. Hay algunas confusiones al indicar zonas pertenecientes a pastos en otros estados como si fueran páramo, debido a que no se especificó en detalle una subclasificación para los diferentes estados en que se pudiera encontrar el pasto y tampoco se utilizó una imagen de alturas que le permitiera al sistema tomar una mejor decisión.

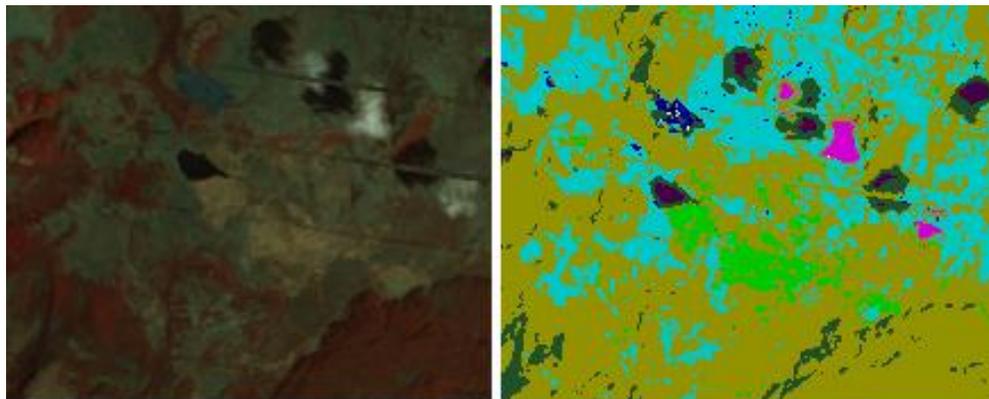
Durante la clasificación se encontró que se podía dividir los cultivos en dos clases, según la etapa en que se encontraran, debido a la presencia de diferencias marcadas en diferentes características y visualmente en el color, estos cultivos se ven de color azul agua marina y anaranjado claro en la Figura 59 izquierda.

El sistema respondió adecuadamente ante estas dos clases, aunque en sus alrededores se pueden observar zonas que no se identificaron y otras que marcó como bosques o pastos aunque no era de ese modo, esto se debió a que no se contó con una clase para identificar humedales que se traducen en pastos con un alto contenido de humedad. Se puede decir que el sistema acertó al clasificar algunas zonas como pasto, solo que le faltó un poco más de información para ubicarlo en otra clase.

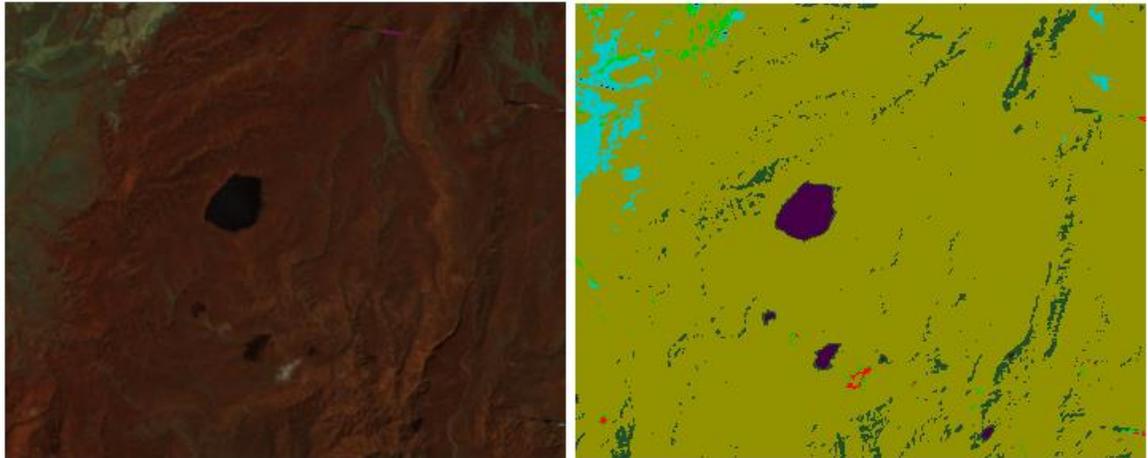


**Figura 59.** Cultivos clase 1 y 2 en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto

En la Figura 60, se muestra nuevamente como el sistema marca pastos en zonas correspondientes a otra cobertura que presenta una respuesta similar, pero debido a la altura y su elevada concentración de agua, es conocida como humedal, sin embargo, lo hace de una forma muy precisa y nuevamente al contar con una imagen de alturas, se podría resolver este impase. Se observa también una perfecta identificación de las nubes y sus sombras y el cambio debido a los artefactos que quedaron después de la compensación *SLC-off*.

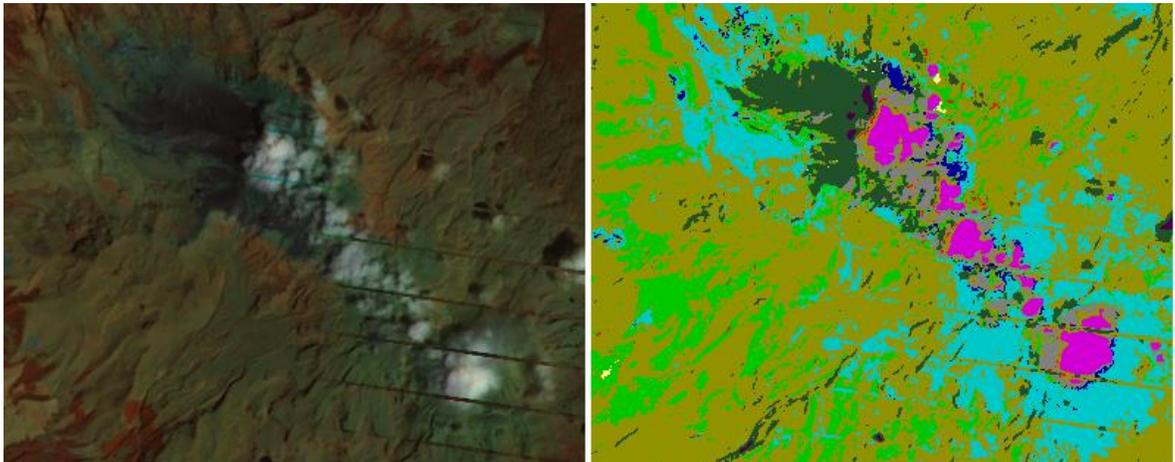


**Figura 60.** Zona San Rafael en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto



**Figura 61.** Lago al sur del volcán Puracé en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto

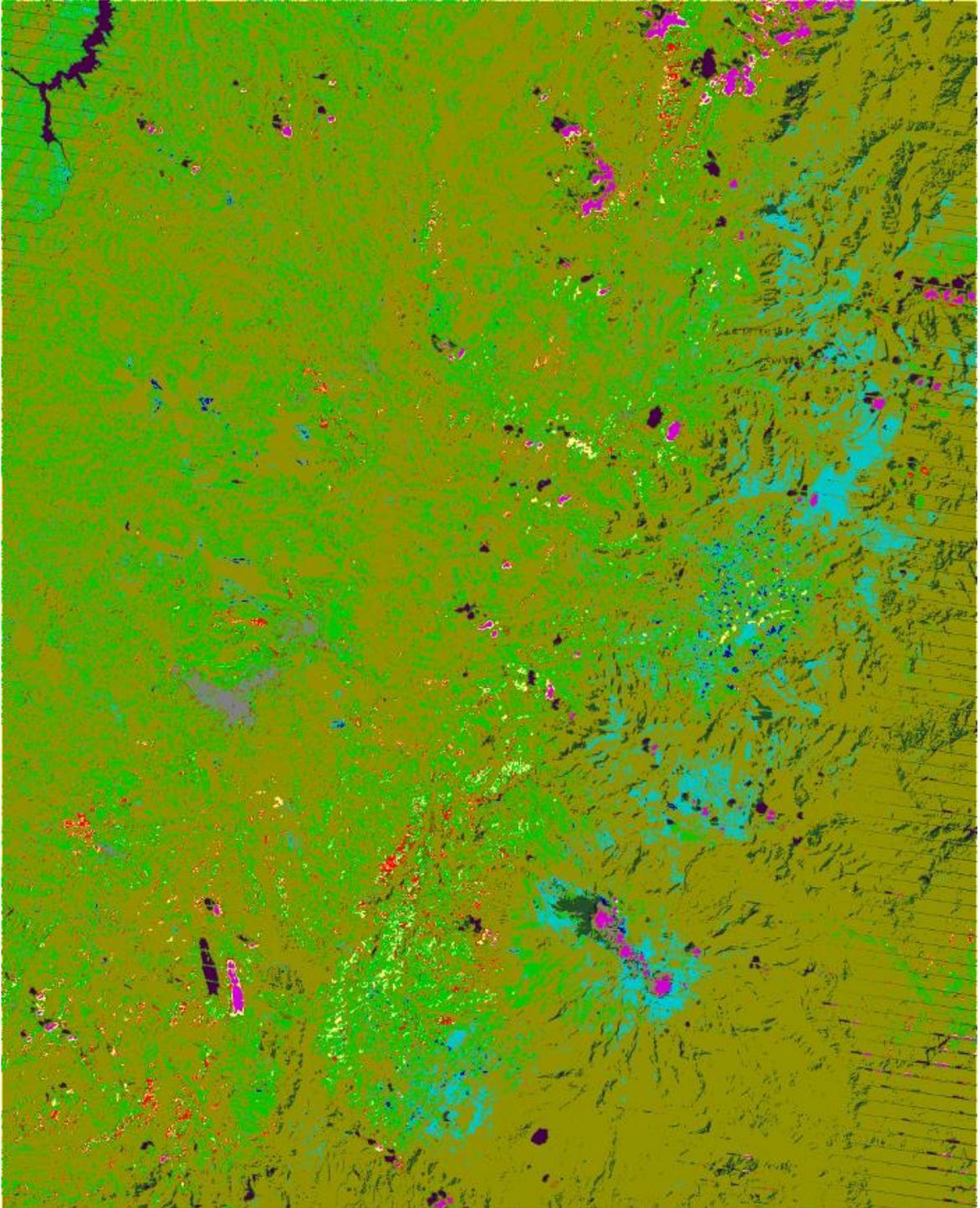
El sistema es capaz de diferenciar los cambios de coberturas con un margen de error debido al problema de frontera que en general se da en la clasificación de texturas, se observa como el lago presente en la Figura 61, se clasifica correctamente y como la pequeña nube es clasificada como cultivo de clase 1, debido en gran medida al tamaño tan reducido.



**Figura 62.** Cima del volcán Puracé en combinación 4,5,3 (izq.) y clasificación del sistema experto

Para el caso de la Figura 62 en donde se muestra la cima del volcán, se tiene nuevamente una clase que no se introdujo para la clasificación, resultando en la confusión del sistema al marcar las zonas aledañas a la cima como bosques y pastos. En cuanto al humo que está saliendo del volcán, se observa que se identifica como nube y que todo su contorno es marcado como si fuera ciudad,

esto se debe a que en las fronteras del vapor, este no presenta los mismos colores que en el centro del mismo.



**Figura 63.**Resultado de la clasificación con el sistema experto, de toda la zona de trabajo

### 5.6.3. Evaluación de desempeño.

El sistema experto implementado, se alimenta con los datos obtenidos *in-situ* para determinar la respuesta y evaluar su efectividad en el reconocimiento. En la Tabla 12 se muestran los resultados del sistema experto para las 11 clases, donde de un total de 132 muestras se marcan 18 incorrectas para un error del 13.6%. Es notable la confusión entre las dos primeras clases (bosque natural y plantado), lo cual adquiere un gran sentido ya que las zonas tienen características muy similares y para la resolución espacial de las imágenes no es posible discernir entre las clases y lo mismo ocurre para las sombras de las nubes y el agua.

**Tabla 12.** Resultados del sistema experto para 11 clases

<b>Muestra</b> <b>Clase</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>1. Bosque Natural</b>	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2
<b>2. Bosque Plantado</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>3. Cultivos clase 1</b>	3	3	3	3	5	3	5	3	3	3	3	5
<b>4. Cultivos clase 2</b>	4	4	4	4	4	4	1	2	4	4	4	4
<b>5. Pastos</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
<b>6. Ciudad</b>	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>7. Páramo</b>	7	7	7	7	7	6	7	7	6	6	6	7
<b>8. Nubes</b>	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
<b>9. Sombras de nubes</b>	9	9	9	9	9	9	9	9	9	10	9	9
<b>10. Agua</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10
<b>11. Roca</b>	11	11	11	11	11	11	1	11	11	11	11	9

Una de las grandes ventajas obtenidas con este nuevo método es que el sistema se encuentra caracterizado con datos *in-situ* del territorio colombiano, que al presentar tanta variabilidad, no puede ser comparado con las respuestas obtenidas de otras regiones del mundo.

El tiempo empleado para lograr la clasificación de las diferentes coberturas, es mucho menor al requerido por los medios convencionales si se habla de una

clasificación supervisada, y es equiparable al tiempo de una clasificación no supervisada, con la ventaja de no presentar grandes errores en la misma. Es de resaltar, que los SIG que se emplean carecen de información relevante de la zona de estudio lo que conduce a una clasificación sesgada y a un mayor error.

En trabajos anteriores, se reporta la clasificación para la misma zona (Grupo de Estudios Ambientales, 2008-2011) y sobre todo el territorio colombiano, pero los resultados obtenidos han requerido demasiado tiempo y grandes cantidades de inversión en capacitación del personal para el manejo de los sistemas de información geográfica. Sin embargo, con el desarrollo de este proyecto, se tendrá la posibilidad de extrapolar los resultados a toda Colombia e incluso a la zona Andina del continente, por la presencia de ecosistemas de alta montaña similares al de nuestro país, con la gran ventaja que no requerirá de tanto tiempo, ni mucho menos de un gran personal con altas capacitaciones.

Adicionalmente, este algoritmo tiene otro tipo de aplicación en la realización de estudios temporales, que permitan determinar de manera visual, que tanto ha cambiado una zona, y de qué manera se debe proceder en cuanto a su conservación, o cómo será el crecimiento de cierta ciudad en determinada cantidad de años.

## 6. CONCLUSIONES

- El desarrollo de este nuevo método permite dar una gran ventaja, pues el sistema se encuentra caracterizado con datos *in-situ* del territorio colombiano, que al presentar tanta variabilidad, no puede ser comparado con las respuestas obtenidas de otras regiones del mundo.
- Se logro la implementación de un sistema automático de coberturas con base en la selección de las características texturales más relevantes para la diferenciación de dichas coberturas vegetales.
- Las aproximaciones basadas en la diferencia de textura, son las más utilizadas, aunque se comprobó que las características de coocurrencia, no proporcionan información que permita diferenciar coberturas, debido al grado de detalle que brinda la resolución espacial de las imágenes empleadas.
- La potencia y relevancia del estudio de la textura, rinde resultados muy precisos y aceptables cuando es combinado con otras técnicas como cambios en el espacio de color, análisis por componente principal e índices de vegetación.
- La comparación del desempeño con las medidas *in-situ* permitió obtener un buen resultado en el caso del sistema experto, y un resultado discreto para la red neuronal, pero tratándose de resultados de un primer estudio, se puede afirmar que es un buen acercamiento para obtener información relevante de la zona de estudio.
- La caracterización del sistema experto se realizó con datos del territorio colombiano, permitiendo obtener un mejor resultado frente a los métodos convencionales utilizados para la clasificación de coberturas y usos del suelo, debido a que se trata de datos de regiones donde no se presenta la misma variabilidad de coberturas.
- La diferenciación de coberturas y usos del suelo que se identificaron con la metodología diseñada fue satisfactoria y permitió generar un mapa acorde con los datos reales, brindando un mejor apoyo en los proyectos que desarrolla el GEA.

## TRABAJOS FUTUROS

- Analizar imágenes de mayor resolución espacial, provenientes de satélites como el *SPOT* ó *IKONOS*, para poder mejorar la clasificación.
- Utilizar matrices de coocurrencia de tres dimensiones en combinación con cambios de espacios de color, para suplir el problema presentado con la baja resolución espacial.
- Hacer uso de otros métodos de diferenciación, como los campos aleatorios de Markov, que permitan determinar la probabilidad de que una muestra dada, pertenezca o no a cierta cobertura, al igual que realizar proyecciones a futuro de los cambios que podrá representar dicha cobertura.
- Basarse en información de la topografía del lugar, para poder determinar con mayor precisión la cobertura o uso del suelo, dependiendo de la posibilidad de que cierta vegetación se dé o no a una altura.
- Corrección del problema *SLC-off* de las bandas con un método no manual.
- Realizar una búsqueda detallada sobre las bases de datos para reemplazar la cobertura real que se encuentra oculta por las nubes y sus sombras, por la información contenida en los mismos lugares de otra imagen del mismo año.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDANA DEZZEO, A. y BOSQUE SENDRA, J. Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra de la Culata [monografía]. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes; 2008.

ANDERSON, James R.. *Land use classification schemes used in selected recent geographic applications of remote sensing: Photogramm. Eng.*, v.37, no.4. 2001.

ANDERSON, J.R., E.E., HARDY, ROACH, J.T. y R.E Witmer, *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* [tesis de maestría]. Washington; 2001.

BEISER, Arthur. *Conceptos de Física Moderna*. McGRAW HILL. 1988.

BISHOP, C. M.. *Neural Networks for Pattern Recognition* [tesis de maestría], Oxford University Press; 1995.

BOCCO, G., MENDOZA, M. y MASERA, O. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. En: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM México*. No 44. 2001.

BODNAROVA, A., BENNAMOUN, M. & LATHAM, S.. *Optimal Gabor filters for textile flaw detection: Pattern Recognition*. 2002.

BRITOS, A.H. y A.H. BARCHUK. Cambios en la cobertura y en el uso de la tierra en dos sitios del Chaco Árido del noroeste de Córdoba. En: *Agriscienta, Argentina*. VOL. XXV. 2008.

CASTAÑEDA GARCÍA, Mauricio y EWERT DE-GEUS, Heannine. *Introducción a la física moderna*. Universidad Nacional de Colombia – centro editorial. 1987.

CHUVIECO SALINERO, Emilio. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp, Madrid. 3ra Edición. 1996.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS: *CORINE Land Cover. Guide Technique*. 2003.

CÓRDOBA A., Edwin Horacio. Determinación de la cobertura del suelo de la zona costera de la Bahía de Tumaco a partir de firmas espectrales obtenidas de imágenes de satélite [monografía]. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Ingeniería Física; 2006.

DE LA ESCALERA HUESO, Arturo. Visión por computador. Universidad Carlos III Madrid. 2001.

EGAN, Walter G. *Optical Remote Sensing: Science and Technology*. MARCEL DEKER INC. 2004.

EZQUERRA, CANALEJO A.; MORENO, CUESTA E. y URBANO LÓPEZ DE MENESES, J. Proyecto *Lacoast*: Cambios en la cobertura del suelo en las costas Europeas. España: Universidad complutense de Madrid; 1998. [en línea]: Fecha de acceso: Septiembre 12 de 2011. <http://revistas.ucm.es/cca/11391987/articulos/OBMD9898110201A.PDF>.

FERRERO, B. S. Palacio, M. G. Campanella, O. Análisis de Componentes Principales en Teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación [monografía]. Argentina: Universidad Nacional de Río Cuarto; 2005.

FONTAL, Bernardo. El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. [Tesis de maestría]. Mérida, Venezuela. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Laboratorio de Organometálicos. 2005.

GDSIG. <http://www.gdsig.com.ar>. Fecha de acceso: Mayo 2 de 2011.

Monitoreo Ambiental para Cambio Climático en Ecosistemas Agrícolas Altoandinos (MACACEA). Grupo de Estudios Ambientales. 2008-2011.

GONZÁLEZ, R. C. y WOODS. *Digital Image Processing*. Singapore, Pearson Education. 2004.

GOTTFRIED Konecny. *GEOINFORMATION: Remote Sensing, photogrammetry and geographic information systems*. TAYLOR & FRANCIS. 2003.

HARALICK, R. M. y L.G. SHAPIRO. *Computer and robot vision*. Addison Wesley. Vol. 1 y 2. 1992.

HENRIQUEZ, C., AZÓCAR, G. y AGUAYO, M. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles. En: Revista de Geografía Norte Grande, VIII Región del Biobío, Chile. No 36. ISSN: 1578-5157. 2006.

HETCH, E.. Óptica. Addison Wesley. 2000.

HSIAO, J. Y. & SAWCHUK A. A. *Unsupervised image segmentation using feature smoothing and probabilistic relaxation techniques*. En: *Comp. Vis. Graph. Image Proc.* 1989.

<http://www.cientec.or.cr>. Fecha de acceso: Septiembre 22 de 2011.

<http://www.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=599>. Fecha de acceso: Mayo 2 de 2011.

[http://www.eoearth.org/article/Land-use\\_and\\_land-cover\\_change](http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change). Fecha de acceso 28 de Septiembre de 2011.

<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geographymatters.pdf>. Fecha de acceso: Mayo 12 de 2011

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>. Fecha de acceso: Mayo 2 de 2011.

<http://landsat.usgs.gov/>. Fecha de acceso: Septiembre 23 de 2011.

JAIN, A. K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall. 1989.

LILLESAND, Thoma; KIEFER, Ralph. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. 4ta Edición. 2000.

LIRA C., Jorge, Introducción al tratamiento digital de imágenes. Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica, México. ISBN 970-32-0091-5. 1ra Edición. 2002.

Mapa de Cobertura de la Tierra, Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. IGAC, CORMAGDALENA, IDEAM. 2008.

MALLAT, S. G. *A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet representation*. En: *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.* 1989.

MEYER, W.B. y TURNER, B.L. II, *Changes in Land Use and Land Cover: a Global Perspective* [tesis de maestría]. *New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge England*; 1994.

MUÑOZ M., Fernando Felipe. Caracterización biofísica, análisis espacio temporal y de intervenciones antrópicas, para humedales altoandinos, caso tipo laguna de San Rafael, (zona norte) parque nacional natural Puracé y humedal de Calvache [monografía]. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Biología; 2008.

NASA. <http://esospso.gsfc.nasa.gov>. Fecha de acceso: Septiembre 23 de 2011.

PÉREZ G., Uriel. Percepción Remota [monografía]. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal, Laboratorio de sistemas de información geográfica; 2005.

PRASAD, Saurabh; BRUCE, Lori; CHANUSSOT, Jocelyn. *Optical Remote Sensing: Advances in Signal Processing and Explotation Techniques*. Verlag Berlin Heidelberg. Springer. 2011.

RÖDER, Achin; HILL, Joachim. *Recent Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment*. London, UK. Taylor & Francis Group. 2009.

RUIZ, L. A., ACOSTA, P., FDEZ-SARRÍA, A., PORRES, M. J y PARDO, J. E. Mejora de la eficiencia en la segmentación de imágenes por texturas mediante filtros de energía. En teledetección: Medio Ambiente y Cambio Global. IX Congreso Nacional de Teledetección. 2001.

SANTAMARÍA DEL ÁNGEL, Eduardo., GONZÁLEZ SILVERA A., MILLÁN-NÚÑEZ, R., CALLEJAS JIMÉNEZ, M. E., CAJAL-MEDRANO, R. *Handbook of Satellite Remote Sensig Image Interpretation Marine Applications: Determining Dynamic Biogeographic Regions using Remote Sensing Data*. 2011.

SHAPIRO, L. STOCKMAN, G. *Computer vision*. Washington University and departament of computer science of michigan state University. 2000.

SKOOG, HOLLER, NIEMAN. Principios de Análisis Instrumental. Mc Graw Hill. Quinta Edición. 1992.

TORRES A., Jorge Eliecer. Determinación de coberturas vegetales a partir del estudio de su repuesta RGB utilizando aerofotografías digitales [monografía]. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Ingeniería Física; 2006.

*United State Geological Survey . Levels of processing*. 2005.