



Libertad y Orden  
INSTITUTO COLOMBIANO DE  
GEOLOGIA Y MINERIA  
INGEOMINAS



DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO  
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE  
DAGMA

**INGEOMINAS  
SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y  
ENTORNO AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA  
DE SANTIAGO DE CALI**

*Convenio No.02 de 2002*

**SUBPROYECTO DE RESPUESTA SÍSMICA**

**Informe No.6.1  
Procesamiento de Imágenes Landsat y Radar,  
Georreferenciación y Sinergismos**

Bogotá, Diciembre de 2005

República de Colombia  
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA  
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS



INSTITUTO COLOMBIANO  
DE GEOLOGIA Y MINERIA  
INGEOMINAS

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO  
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE  
DAGMA



**JULIAN VILLARRUEL TORO**  
**DIRECTOR GENERAL INGEOMINAS**

**INES F. CAICEDO HERNANDEZ**  
**DIRECTORA DAGMA**

**ALBERTO NUÑEZ TELLO, DIRECTOR TECNICO SERVICIO GEOLOGICO, INGEOMINAS**  
**MARTA L. CALVACHE VELASCO, SUBDIRECTORA AMENAZAS GEOLOGICAS, INGEOMINAS**  
**CARLOS E. ALVARADO FLOREZ, JEFE DE PROYECTO, INGEOMINAS**

**HENRY VILLEGAS**  
**Grupo de Teledetección, INGEOMINAS**

**EDICION FINAL**  
**ANA I. ALVARADO**  
**ROSA DAZA**



**TABLA DE CONTENIDO**

**CAPITULO 1.....1**

**INTRODUCCION.....1**

    1.1. OBJETIVOS ..... 1

**CAPITULO 2.....2**

**TELEDETECCION .....2**

**CAPITULO 3.....4**

**SATELITES.....4**

**CAPITULO 4.....6**

**LANDSAT .....6**

    4.1. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES LANDSAT TM ..... 6

    4.2. COMPOSICIONES EN FALSO COLOR ..... 7

    4.3. FIRMAS ESPECTRALES ..... 9

    4.4. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA VEGETACIÓN ..... 10

    4.5. EL MOSAICO DE ESCENAS LANDSAT TM ..... 11

    4.6. GEORREFERENCIACIÓN ..... 14

    4.7. TRANSFORMACIÓN MEDIANTE PUNTOS DE CONTROL EN EL TERRENO..... 15

**CAPITULO 5.....18**

**IMÁGENES DE RADAR.....18**

    5.1. VENTAJAS..... 18

    5.2. MOSAICO DE IMÁGENES DE RADAR DE LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA ..... 20

**CAPITULO 6.....24**

**SINERGISMOS .....24**

**CAPITULO 7.....28**

**CONCLUSIONES.....28**

**CAPITULO 8.....29**

**BIBLIOGRAFIA .....29**



### LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Componentes del Sistema Sensor Landsat TM 5 ..... 5

**Figura 2.** Mezcla aditiva de colores, que es principio para el procesamiento digital de imágenes de satélite. .... 8

**Figura 3.** Curva de Reflectancia Espectral de una Hoja (modificado de Drury, 1989) ..... 11

**Figura 4.** Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 321. .... 12

**Figura 5.** Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 457 ..... 13

**Figura 6.** Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 452 ..... 14

**Figura 7.** Mosaico de once (11) escenas Landsat TM del Suroccidente Colombiano, en composición de falso color RVA 452 ..... 17

**Figura 8.** Componentes de un Sistema Sensor de Radar ..... 19

**Figura 9.** Mosaico de Radar INTERA de la Costa Pacifica Colombiana..... 21

**Figura 10.** Sub-escena Landsat TM de la Plancha 203, en composición de falso color RVA 452 ..... 22

**Figura 11.** Sub-escena Radar INTERA de la Plancha 203 ..... 23

**Figura 12.** Sub-escena Radar INTERA de la Plancha 427 ..... 25

**Figura 13.** Sub-escena Landsat TM de la Plancha 427, en composición de falso color RVA 452 ..... 26

**Figura 14.** Sinergia Landsat TM - Radar INTERA de la Plancha 427 ..... 27



---

## CAPITULO 1

---

### INTRODUCCION

La percepción visual de los seres humanos presenta grandes limitaciones. Por un lado, es restringida por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado por esta razón espectro visible. Otra restricción de la visión humana hace referencia a la perspectiva de observación. El campo de visión del hombre está limitado a su propia estatura, o a la que puede adquirir desde observatorios naturales (montañas) o artificiales (edificios, puentes). En cualquier caso, se trata de una perspectiva oblicua y de pequeños radios de acción, que nos dificulta observar fenómenos que pueden llegar a ser muy extendidos, tales como las fallas geológicas.

Para superar tales limitaciones, el hombre ha desarrollado sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a diferentes altitudes (aviones, satélites). Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no detectables por el ojo humano (infrarrojo, micro-ondas), y además desde una nueva perspectiva.

La tecnología que engloba los procesos que permiten obtener una imagen de la superficie de la tierra desde el aire o el espacio, y su posterior tratamiento en el contexto de una aplicación determinada, se denomina percepción remota, teledetección o tele-observación; dichos vocablos son la traducción latina del término inglés *remote sensing*.

Este informe, realizado para el Proyecto Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (MZSCali) en el marco del Convenio INGEOMINAS - DAGMA, presenta las labores de procesamiento digital de datos de teledetección correspondientes con el área de interés regional considerada por el proyecto, para fines de interpretación tectónica.

#### 1.1. OBJETIVOS

- Generar un mosaico de escenas Landsat TM correspondientes con el área de estudio regional.
- Generar un mosaico de imágenes de Radar Intera de la Costa Pacífica Colombiana.
- Producir sinergismos entre los datos Landsat TM y las imágenes Radar Intera.



---

## CAPITULO 2

---

### TELEDETECCION

Percepción remota es la ciencia de adquirir información sobre objetos lejanos sin hacer contacto físico con ellos, restringida a medidas de radiación electromagnética, incluyendo luz visible e infrarroja, al igual que ondas de radio y calor. Tal definición implica que entre la superficie de la tierra y el equipo de tele-observación debe existir una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada puede almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una aplicación determinada.

En esta disciplina no se incluyen métodos geofísicos como gravimetría o magnetometría, muestreo químico de vapores o técnicas de sonar. De acuerdo con esto, la teledetección cobijaría todos los tipos de fotografía, incluida la aérea, que por ser un tópico especializado suele tratarse aparte. Esto no implica de ninguna manera, un menosprecio hacia la fotografía aérea, que sigue siendo la técnica de percepción remota más empleada aún en la actualidad, constituyéndose en la mayoría de los casos en un auxiliar imprescindible para las imágenes de satélite.

La tele-observación no puede ser considerada como una panacea, en la detección de cualquier rasgo o fenómeno que afecte al medio ambiente. Los datos generados por esta disciplina son complementarios con los de otras técnicas convencionales, tales como la fotografía aérea, y no invalidan la importancia del trabajo de campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea en múltiples contextos y discreta en otros, donde su aplicación resulta un ensayo experimental. Esta técnica aporta en relación con la fotografía aérea las siguientes ventajas (Chuvieco, 1990):

- **Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.** De acuerdo con las características orbitales de los satélites, podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la tierra para intervalos de tiempo determinados, incluso de áreas que suelen ser de muy difícil acceso por otros medios (p.e. zonas polares, desiertos, bosques de lluvia tropicales, páramos).
- **Visión panorámica.** La altura orbital de los satélites permite detectar grandes áreas, proporcionando una visión amplia de los rasgos de la superficie terrestre. Una fotografía aérea, escala 1:18.000 capta en una sola imagen una superficie aproximada de 16 Km<sup>2</sup>, que asciende a unos 49 Km<sup>2</sup> en el caso de fotografías tomadas a mayor altitud, o sea a una escala menor (1:30.000). Una escena Landsat



nos permite contemplar 34.000 Km<sup>2</sup> en una sola adquisición, dicha área aumenta hasta 9 millones de Km<sup>2</sup> para el caso de las escenas del satélite meteorológico NOAA.

- **Homogeneidad en la toma de datos.** Superficies muy grandes son detectadas por el mismo sensor, en una fracción muy pequeña de tiempo, asegurando la coherencia de los datos sobre áreas extensas.
- **Información sobre regiones no visibles del espectro.** Los sensores ópticos-electrónicos generan imágenes sobre áreas no accesibles para la fotografía convencional, tales como el infra-rojo medio y térmico y las microondas. Estas bandas del espectro electromagnético proporcionan una valiosa información, dado que registran cambios y diferencias que son imperceptibles al ojo humano.
- **Formato digital.** Este formato agiliza la manipulación y tratamiento de los datos de tele-observación, reduciendo costos en el proceso de integración de los mismos con la cartografía convencional.



---

## CAPITULO 3

---

### SATELITES

Hasta hace relativamente poco tiempo, la mayoría de las imágenes de teledetección usadas por los geólogos, eran adquiridas por técnicas fotográficas convencionales. Los nuevos métodos de recolección de datos, se han desarrollado rápidamente por el énfasis creciente de monitoreo del planeta por parte de satélites no tripulados, el cual demostró que era casi imposible recuperar las películas fotográficas, excepto mediante muy costosas maniobras de retorno y re-entrada. La percepción remota desde el espacio, por lo tanto requirió sistemas que pudieran transmitir los datos mediante telemetría de micro-ondas. Además de esto, las necesidades de información en las partes del espectro electromagnético donde las películas fotográficas no responden, necesitaron el desarrollo de nuevos tipos de instrumentos basados en sistemas electrónicos.

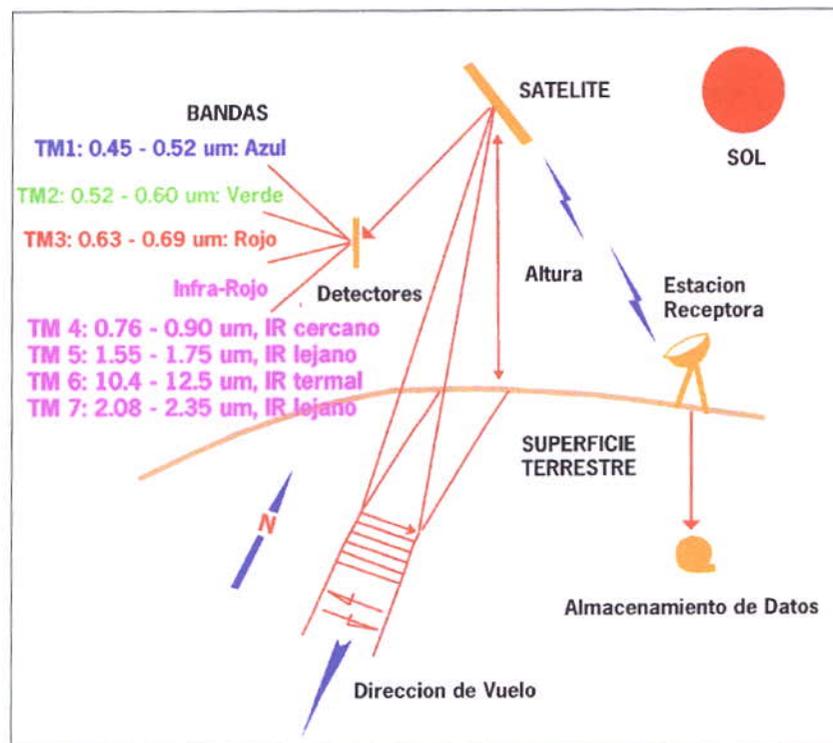
Las características técnicas de los sensores fotográficos, sean estos de satélite o montados sobre un avión, impiden que desde ellos se realice una cobertura sistemática de la superficie terrestre, dado que no facilitan una transmisión a distancia de las imágenes captadas. Por esta razón se han diseñado otro tipo de sensores, denominados genéricamente óptico-electrónicos, ya que combinan una captación de la realidad más o menos similar a la obtenible mediante fotografía, con un sistema de detección electrónica, que evita el depender de una película fotográfica.

Entre estos sensores, los más habituales en tele-observación espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (scanners). En muchos equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varios rangos de longitud de onda (bandas), cada uno de los cuales se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía. En ese caso, se habla de exploradores de barrido multi-espectral, pues detectan la misma superficie del terreno en distintas bandas del espectro. La generación de imágenes por barrido lineal, es esencialmente una extensión de los métodos de fotografía secuencial. El movimiento de la plataforma hacia delante, permite monitorear sucesivos elementos del terreno (**Figura 1**); la diferencia es que en vez de tener la radiación colectada por los lentes y dirigida hacia una película, un espejo es utilizado junto con unos detectores fotoeléctricos. Un motor rota dicho espejo 360°, ó en un ciclo repetido de ángulos pequeños hacia delante y hacia atrás.

En la mayoría de los sistemas el barrido es perpendicular a la dirección de movimiento de la plataforma, y toma datos en sentido vertical a la superficie, y hacia los lados del rumbo de vuelo del satélite (**Figura 1**). Una imagen de barrido lineal, es conformada por líneas rectas o fajas orientadas a lo largo de la línea de vuelo. La radiación colectada por el espejo es dirigida hacia unos detectores, algunas veces utilizando fibras ópticas. Estos detectores registran todas las bandas simultáneamente, en un arreglo donde la respuesta de cada uno,

corresponde exactamente con la misma porción del terreno percibida al tiempo con los otros. Dichos detectores amplifican la señal recibida convirtiéndola en una señal eléctrica, que a su vez se transforma a un valor numérico o nivel digital, que puede almacenarse a bordo del satélite, o puede transmitirse a una red de antenas receptoras. La información recibida por éstas se graba en cintas compatibles con computador (CCT – Computer Compatible Tape). Satélites como SPOT y Landsat TM captan información de la superficie de la tierra mediante barrido lineal (**Figura 1**).

En suma, el sensor convierte una señal analógica, la *radiancia recibida* (total de energía radiada en una determinada longitud de onda, por unidad de área y por ángulo sólido de medida), en un nivel digital (ND), razón por la cual no puede hablarse propiamente de fotografías, aunque en ocasiones sea posible presentar las imágenes de tele-observación espacial en formato fotográfico, sino de imágenes digitales, en razón de su estructura interna. Estos valores numéricos pueden expresarse como niveles de radiancia, conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición. Igualmente es posible realizar la conversión contraria, digital-analógica, para obtener los valores de radiancia originalmente detectados por el sensor, lo cual implica que este tipo de sensores no sólo facilitan una imagen, sino también una medición de la superficie que observan.



**Figura 1.** Componentes del Sistema Sensor Landsat TM 5



---

## CAPITULO 4

---

### LANDSAT

El programa Landsat empezó en Julio de 1972, y se compone hasta el momento de una serie de satélites, lanzados en intervalos promedio de 3 a 4 años. Este sistema fue desarrollado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA), y recibió inicialmente el nombre de Earth Resources Technology Satellite - 1 (ERST -1), pasando a ser llamado *Landsat* en enero de 1975.

El Landsat TM5 aún en funcionamiento, mide radiación electromagnética en un total de siete (7) bandas o rangos de longitud de onda: tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo lejano y una en el infrarrojo termal. El canal 1 (0.45 a 0.52  $\mu\text{m}$  – visible, azul) es útil para cartografía de costas, diferenciación entre suelo y vegetación, y entre vegetación estacional y coníferas; el canal 2 (0.52 a 0.60  $\mu\text{m}$  – visible, verde) muestra muy bien la reflectividad de la vegetación verde saludable; el canal 3 (0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$  – visible, rojo) coincide con un pico de absorción de la clorofila; el canal 4 (0.76 a 0.90  $\mu\text{m}$  – infrarrojo cercano) es útil para diferenciar cuerpos de agua, muestra alta reflectividad de la vegetación verde y uniforme, y es sensible a la morfología del terreno, lo cual le permite obtener datos sobre geomorfología, suelos y geología; el canal 5 (1.55 a 1.75  $\mu\text{m}$  – infrarrojo lejano), permite diferenciar nieve de nubes, y posibilita realizar medidas de humedad en la vegetación; el canal 6 (10.4 a 12.5  $\mu\text{m}$  – infrarrojo termal) es sensible a los fenómenos de contrastes térmicos; por último, el canal 7 (2.08 a 2.35  $\mu\text{m}$  – infrarrojo lejano) es sensible a la morfología del terreno, lo cual le permite obtener informaciones sobre geomorfología, suelos y geología, al igual que realizar cartografía hidrotermal en terrenos áridos a semi-áridos. Con excepción del canal 6, este sensor presenta un campo instantáneo de observación de 30 m x 30 m en el terreno; la banda 6 tiene una resolución espacial del 120 m x 120 m. Todos los canales o bandas poseen una resolución espectral de 256 niveles de gris, donde "0" corresponde con el color negro y "255" con el blanco.

Los sensores a bordo del Landsat TM5 colectan datos de una faja de 185 Km de longitud, que determinan igual ancho para las escenas Landsat TM. Este satélite tiene órbita aproximadamente polar y sincrónica con el sol; esto significa que observa la tierra mas o menos en sentido norte sur cuando registra su parte iluminada, y sur a norte en la oscura, cruzando el Ecuador a mas o menos la misma hora cada órbita.

#### 4.1. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES LANDSAT TM

El tratamiento digital de las imágenes de tele-observación, consiste en la manipulación digital de los datos satelitales, con el fin de facilitar la identificación y extracción de las informaciones contenidas en las ellas. Para las actividades interactivas de análisis y procesamiento de los datos de percepción remota, es necesario utilizar hardware y un software especializados. El resultado de este proceso es la producción de otras imágenes,



que contienen informaciones específicas, extraídas y realizadas a partir de los datos brutos.

Las imágenes de percepción remota, por ser de naturaleza multiespectral, están compuestas de diferentes bandas; por esto las composiciones en color de conjuntos de tres canales (tripletas), se constituyen en un método poderoso para sintetizar una cantidad de información muy grande, en una sola imagen que representa los datos satelitales con diferentes colores, lo cual facilita mucho su interpretación.

De este modo, los atributos de textura son fácilmente interpretados tanto en las imágenes monocromáticas como en las coloreadas. Por otro lado, es necesario tener cuidado con la manipulación de los colores en las imágenes de teledetección, pues una exageración de los mismos, puede introducir confusión visual en el intérprete, y consecuentemente perjudicar la percepción de los contrastes texturales, que muchas veces contienen precisamente la información deseada.

La reflexión que debe hacerse antes de realizar una composición en color, tiene que ser la siguiente: ¿la información que se pretende extraer queda mejor expresada en colores, o sería visible en una imagen monocromática simple? Dado que las composiciones en color, son uno de los productos más comunes en procesamiento digital de imágenes de satélite, es necesario entender un poco los fundamentos básicos de la teoría de los colores (Crosta, 1993).

#### 4.2. COMPOSICIONES EN FALSO COLOR

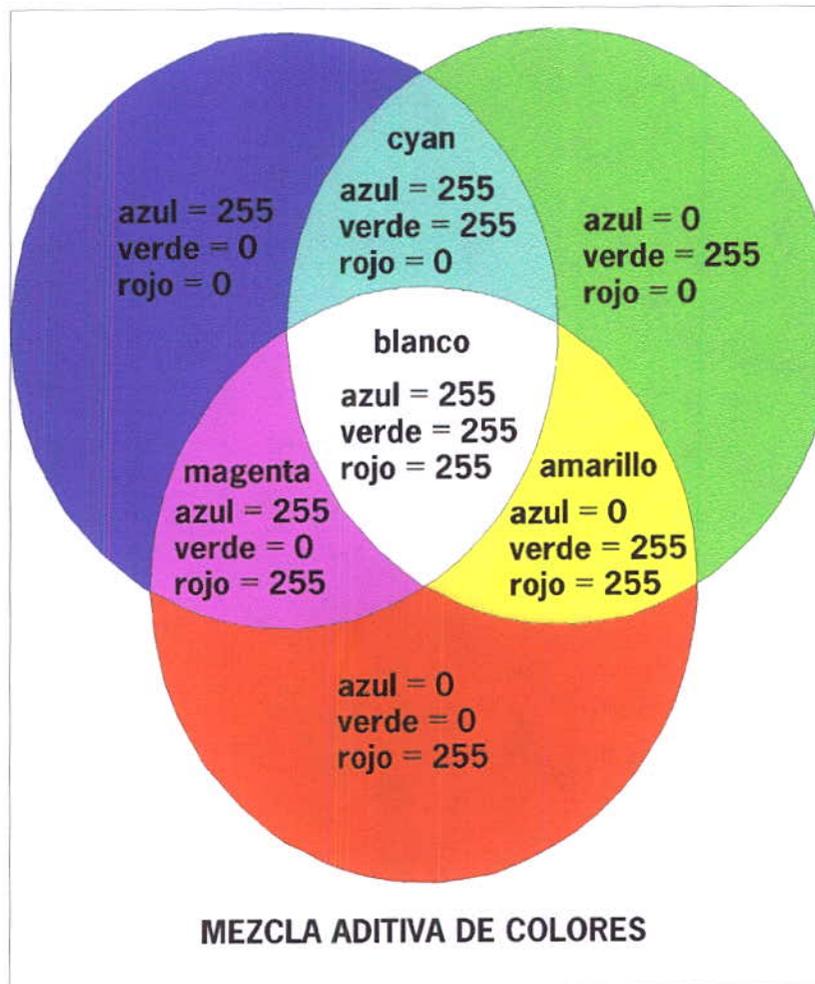
Thomas Young (1773-1829) develó los principios de la teoría básica de los colores. Descubrió que proyectando la luz a través de filtros rojo, verde y azul, producía luz blanca si los tres círculos coincidían. Donde se encontraban dos de estos tres colores, nuevos colores se generaban: rojo y azul producen magenta, rojo y verde crean amarillo, y amarillo con verde da cyan (**Figura 2**). Igualmente se descubrió que variando la cantidad relativa de rojo, verde y azul en el área de superposición, era posible producir una enorme gama de colores, incluyendo diversos tonos para cada uno. Otra observación de Young fue que cualquiera de los tres colores iniciales, rojo, verde o azul, no podían ser producidos con la mezcla de dos de los otros, razón por la cual les denominó colores primarios aditivos.

Los monitores de los sistemas de procesamiento digital de imágenes, son en muchos casos capaces de representar cada uno de los colores básicos con 256 tonalidades diferentes; esto genera un total de más de 16 millones de mezclas posibles. Esto crea la necesidad de hacerse varias preguntas: ¿cuanto necesita cambiar un color para que el intérprete note el cambio? ¿Existen colores que son más visibles que otros? (Crosta, 1993).

A partir de la información multiespectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios (azul, verde y rojo) a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite

visualizar simultáneamente imágenes de distintas regiones del espectro, lo cual facilita la delimitación visual de los materiales que constituyen la superficie terrestre.

En el trabajo práctico, se puede utilizar cualquier trío de bandas para generar una composición en falso color. A pesar de esto, es necesaria una cuidadosa selección de las mismas, para que la imagen resultante contenga la información espectral que se quería resaltar. Esto obviamente se complica a medida que aumenta el número de bandas, lo cual es una tendencia creciente en el diseño de los sistemas de percepción remota.



**Figura 2.** Mezcla aditiva de colores, que es principio para el procesamiento digital de imágenes de satélite.



Aunque la información contenida en una determinada tripleta de bandas es siempre la misma, independientemente de los colores básicos que se le asignen a cada una, las diferencias de percepción de nuestro sistema visual, hacen que distintas combinaciones posibles entre un juego de tres bandas, en la práctica parezcan tener diferentes informaciones. Por esto, la selección de los canales para generar una imagen en color, así como la asignación de colores para cada uno, no son asuntos triviales y merecen su debida atención, dado que de ellos depende el aprovechamiento máximo de la información.

Nunca se deben aceptar recetas de composiciones en falso color de determinadas bandas en determinados colores, porque cada escena multi-espectral posee características propias, al igual que la información que se desea resaltar. Por esto la metodología para generar la mejor imagen en color, consiste en seleccionar cuidadosamente las bandas, con base en las características espectrales de los materiales de la corteza tema del estudio, para ensayar diversas combinaciones de colores, hasta encontrar la que más satisfaga la vista.

#### 4.3. FIRMAS ESPECTRALES

La proporción del flujo de energía incidente sobre la superficie de la tierra, que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características del material que se observa. Dado que esa proporción varía en distintas bandas del espectro electromagnético, es muy interesante conocer el comportamiento de dichos materiales en diversas longitudes de onda. Una discriminación más acertada entre los mismos, sólo será posible cuando presenten divergencias espectrales. En el caso del espectro visible, el comportamiento disimilar de los objetos que constituyen la superficie terrestre, para diferentes longitudes de onda, se manifiesta en lo que se denomina color: un objeto es azul, si refleja intensamente la energía en ese rango de longitudes de onda del espectro y poco en el resto.

Las firmas espectrales representan el modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Son curvas específicas que suelen obtenerse en el laboratorio, para los principales materiales que constituyen la superficie de la tierra. En dichas curvas el eje de las "X" representa las longitudes de onda, mientras el de las "Y" muestra la reflectividad espectral o reflectancia (**Figura 3**), que se define como la relación entre el flujo energético incidente y el reflejado por una superficie. Algunas de estas curvas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo.

Así los diversos materiales que constituyen la superficie terrestre no tienen un comportamiento espectral único y permanente, que coincide con sus curvas de reflectividad espectral y permita reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. Por el contrario, en torno a un comportamiento tipo, que se denomina firma o signatura espectral, cada material presenta una cierta variabilidad espectral, debida a los factores anteriormente mencionados, que dificulta su discriminación de otros materiales (Chuvieco, 1990).

Pese a estas salvedades, no cabe duda que las curvas de reflectividad son muy útiles para interpretar más fielmente una imagen de tele-observación, por cuanto relacionan los valores adquiridos por el sensor con las medidas del laboratorio. Igualmente estas gráficas permiten seleccionar las bandas más convenientes, para la detección de los materiales de la superficie terrestre considerados por cualquier estudio.



#### 4.4. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA CON LA VEGETACIÓN

En la mayoría de los estudios geológicos, la vegetación es considerada un estorbo. Sin embargo, dos tercios del área continental del planeta son moderada a altamente vegetados. De hecho el área de interés regional considerada por el Proyecto MZSCali está en su mayor parte cubierta de vegetación.

La **Figura 3** muestra el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa (Drury, 1989). El catalizador para el proceso de la fotosíntesis es el pigmento llamado clorofila, un complejo de compuestos orgánicos que contiene hierro. Su función es la de absorber la radiación solar, para generar tal proceso. Esto se consigue mediante bandas de absorción cercanas a 0.45  $\mu\text{m}$  (banda 1 de Landsat TM) y 0.68  $\mu\text{m}$  (banda 3 de Landsat TM, **Figura 3**), en las partes azul y roja del espectro visible respectivamente; esta es la razón por la cual las hojas saludables son de color verde. Sin embargo, la clorofila es inestable por encima de cierta temperatura; para protegerla del daño termal, las plantas han desarrollado métodos para balancear la energía. Esto se consigue mediante fuerte reflexión de la radiación en el infrarrojo cercano (banda 4 de Landsat TM, **Figura 3**), que se logra mediante el recubrimiento brillante que suelen tener las hojas en la parte que exponen al sol, pero también mediante la disposición interna de sus células. Una hoja sana suele ofrecer una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0.7 y 1.3  $\mu\text{m}$ ), en claro contraste con la baja reflectividad que muestra en el espectro visible, especialmente en la banda roja (banda 3 de Landsat TM, **Figura 3**). Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

A partir de 1.4  $\mu\text{m}$  el efecto absorbente el agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. El agua en las células absorbe alguna energía, y esta característica se muestra alrededor de 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$  (**Figura 3**), como dos bandas de absorción que dependen de la proporción de agua en las células. Entre estas bandas donde la absorción del agua es más clara, queda patente que la observación del espectro es de gran interés para conocer el estado de vigor de las hojas, en función de su contenido de humedad.

Sin embargo, las plantas ante los sistemas de teledetección se presentan como hojas de diferentes formas y tamaños, espacios entre las mismas, tallos y a veces ramas, además de muchas otras variaciones. Todas las interacciones individuales en estas estructuras complejas, pueden interferir y posteriormente ampliar el rango de las respuestas, porque el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de las mismas que constituyen masas de vegetación, razón por la cual intervienen otros elementos adicionales que complican su detección, tales como el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, entre otros (Chuvieco, 1990).

#### 4.5. EL MOSAICO DE ESCENAS LANDSAT TM

El área regional considerada por el Proyecto MZSCali comprende la porción sur-occidental del país, se localiza principalmente en la Región Andina Colombiana que tiene condiciones climáticas muy variables, las cuales pueden oscilar desde muy húmedas en la Costa Pacífica, hasta secas en los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena. Las mayores alturas de las cordilleras Occidental, Central y Oriental dan condiciones de vida a una cubierta vegetal de baja densidad tipo páramo. Hay bosques primarios en las laderas de las mismas, y patrones de vegetación totalmente alterados por agricultura, ganadería y otras actividades humanas, en las zonas más bajas que coinciden con las planicies de los valles de los ríos Cauca y Magdalena.

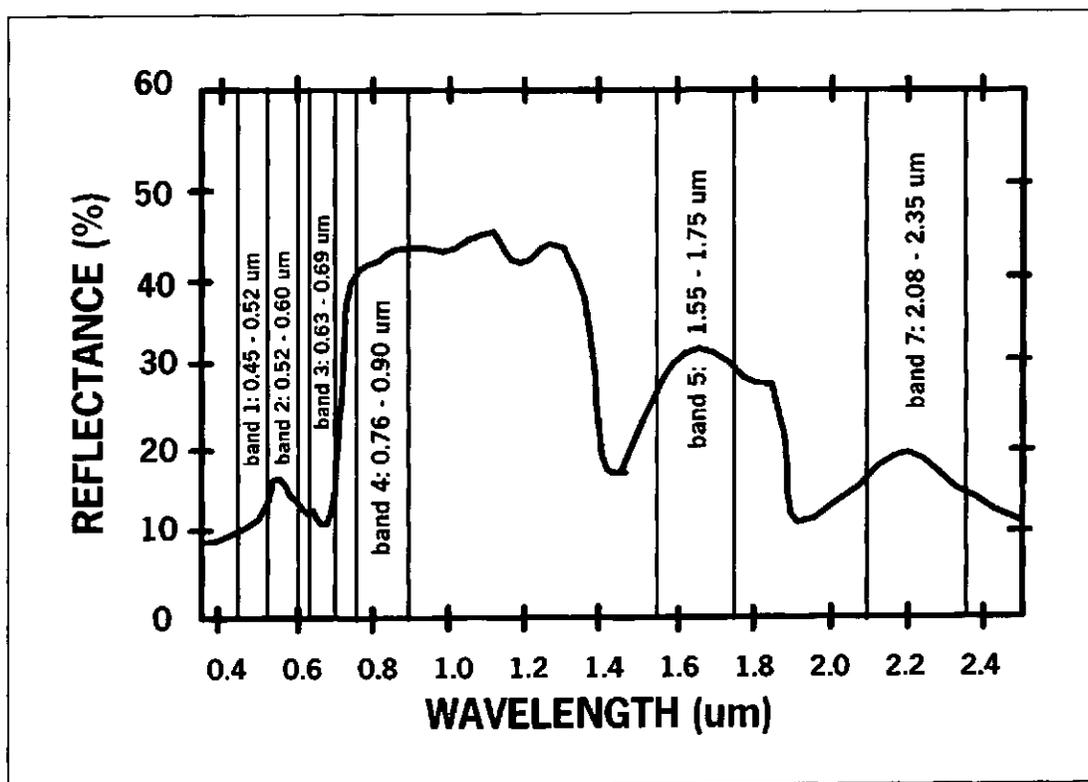
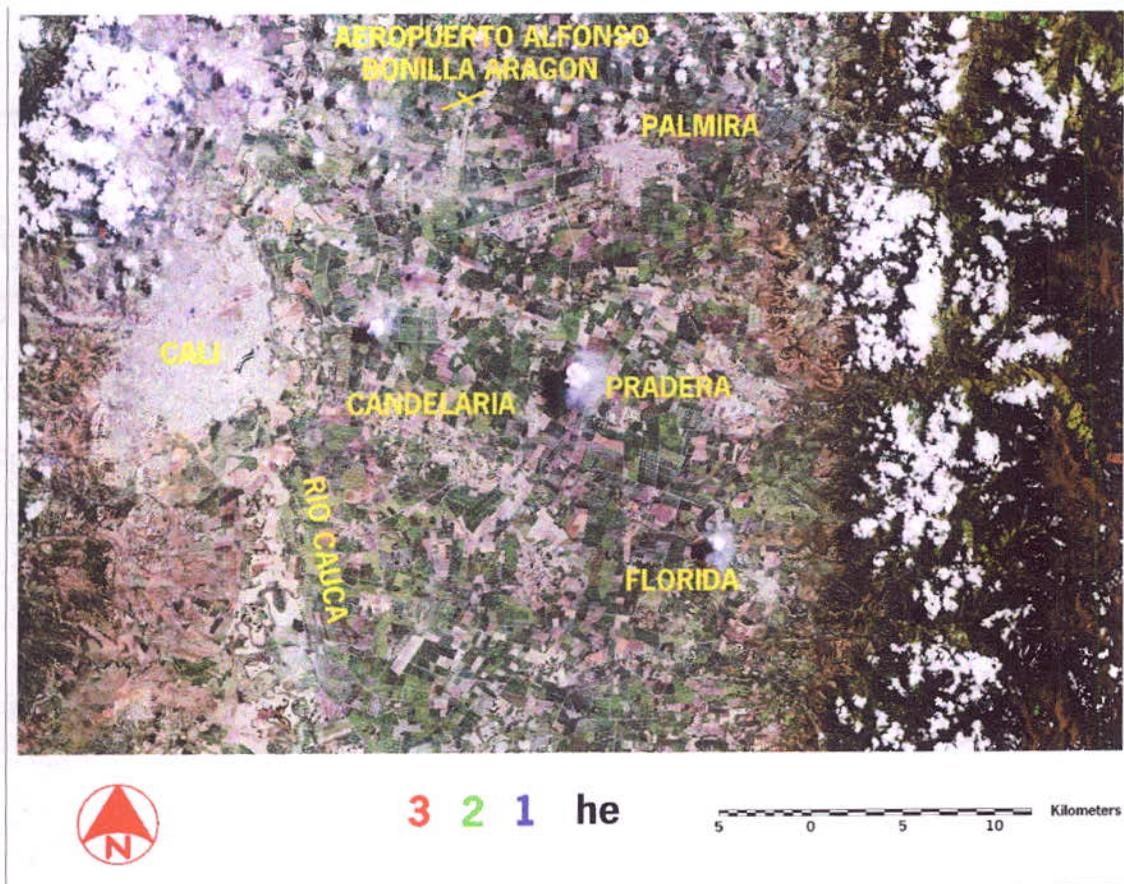


Figura 3. Curva de Reflectancia Espectral de una Hoja (modificado de Drury, 1989)

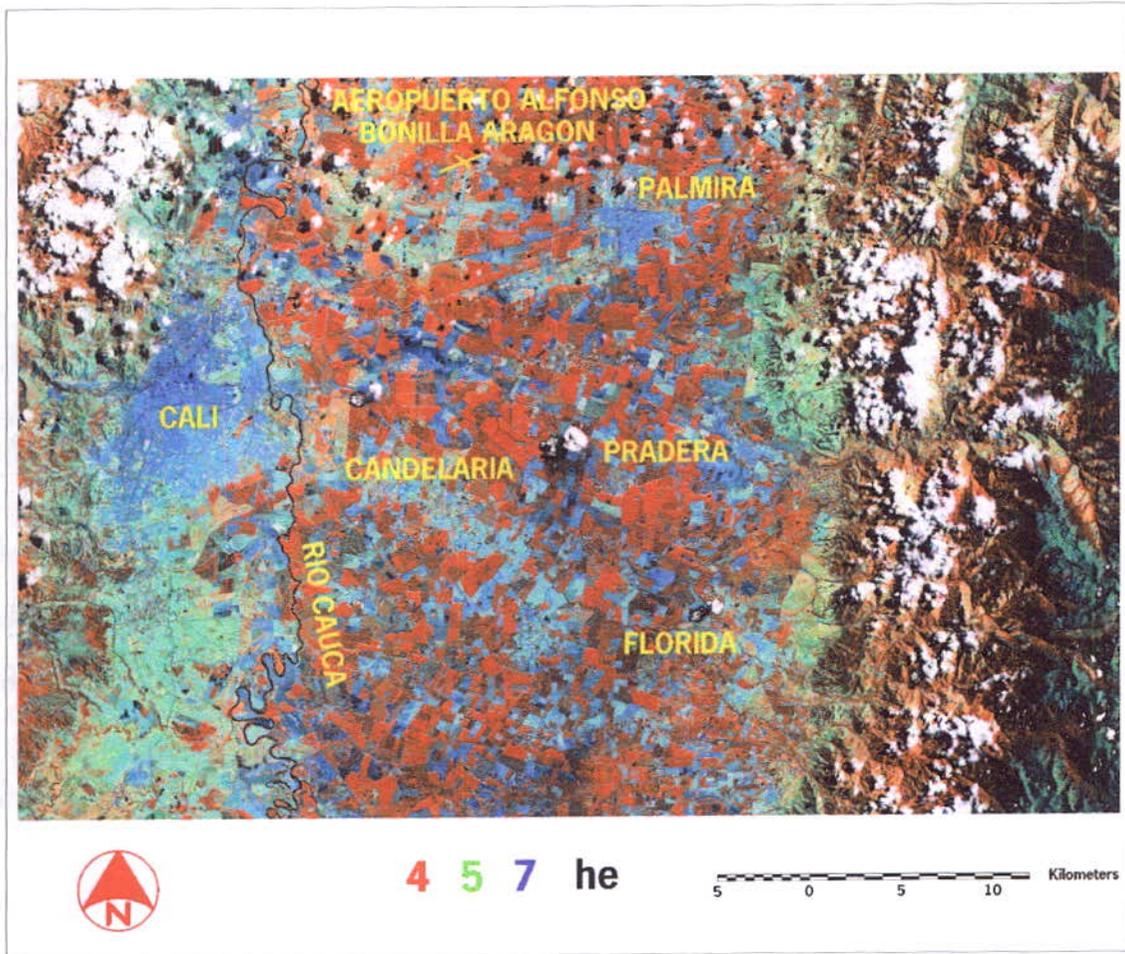
El área coincidente con los alrededores de la Ciudad de Cali, en composición en falso color Rojo Verde Azul (RVA) 321 (**Figura 4**), emula la percepción visual del sistema de visión humano sobre la superficie terrestre. Los asentamientos de Cali, Candelaria, Palmira, Pradera y Florida aparecen en tonos grises claros, como es de esperarse en áreas urbanizadas; los patrones de cultivo del Valle del Río Cauca se aprecian en verde, mientras la vegetación saludable y densa de la Cordillera Central se expresa en tonos marrones y verdes oscuros; los sedimentos que constituyen los meandros del Río Cauca aparecen en tonos color marrón, y las nubes en color blanco.



**Figura 4.** Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 321.

Teniendo en cuenta la espesa cubierta vegetal del terreno considerado, se dio mucha importancia a aquellas bandas que corresponden con propiedades de reflectividad alta de la vegetación, de acuerdo con la curva típica de reflectancia de una hoja (Drury, 1989) (**Figura 3**). Para el Landsat TM5 estas bandas son 2, 4, 5 y 7. Las composiciones en falso color que resultaron más útiles para aplicaciones geológicas son RVA 457 (**Figura 5**) y RVA 452 (**Figura 6**). La segunda composición además de mostrar los contrastes litológicos, resalta los patrones de drenaje en azul, que en muchas ocasiones suelen coincidir con el trazo de las

fallas geológicas. El incluir la banda 5 (infrarrojo lejano, 1.55 – 1.75  $\mu\text{m}$ ) en cualquier composición de falso color, permite la diferenciación entre las nubes (en blanco) y la nieve (en violeta) sobre la cima de los volcanes nevados. Por todo lo anteriormente expuesto, fue la combinación entre bandas elegida para el Proyecto MZSCali.



**Figura 5.** Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 457

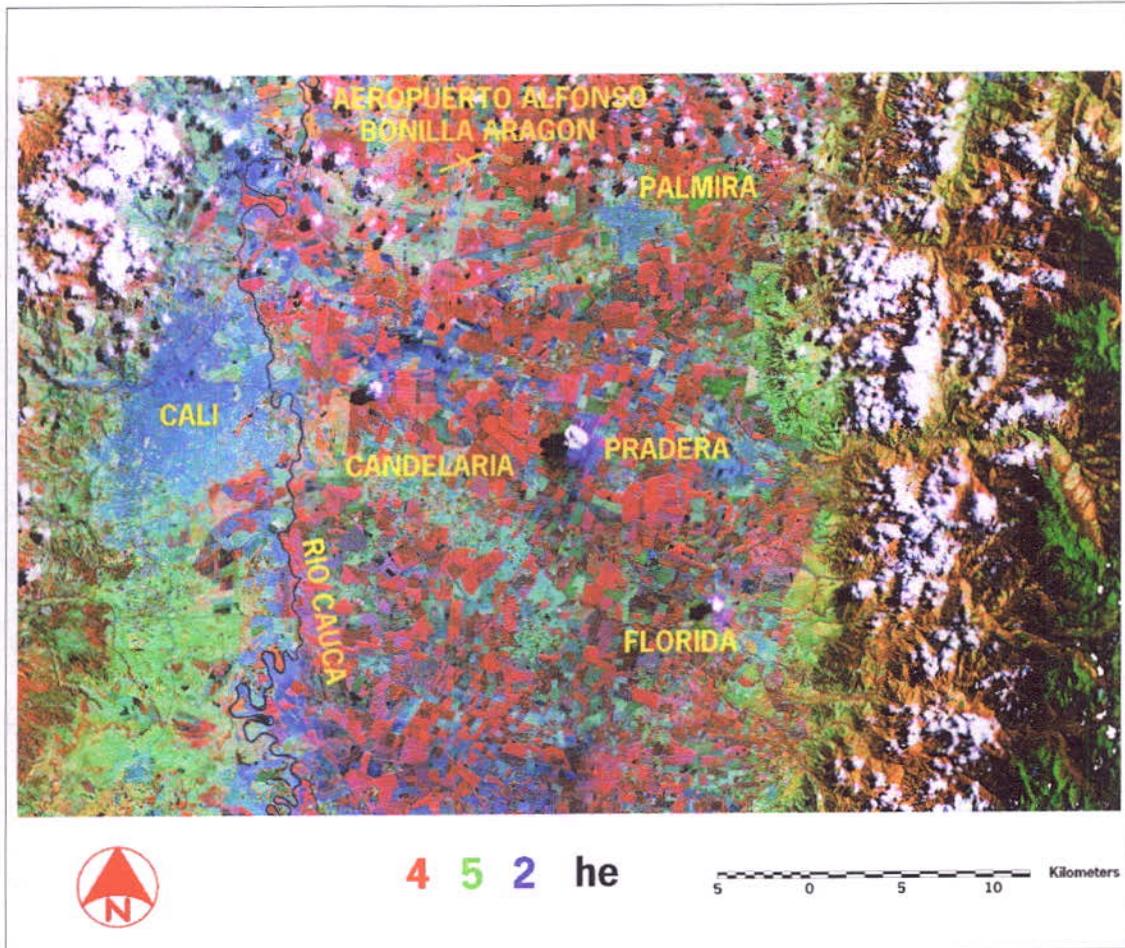


Figura 6. Sub-escena Landsat TM de Cali y sus alrededores, en composición de falso color RVA 452

#### 4.6. GEORREFERENCIACIÓN

Las imágenes generadas por percepción remota, están sujetas a una serie de distorsiones espaciales, que les llevan a carecer de precisión cartográfica en cuanto a la ubicación de los objetos, superficies o fenómenos en ellas representados. Además de esto, la información extraída de las mismas, necesita muchas veces ser integrada con otros tipos de datos, representados como mapas. Este requerimiento es muy común cuando se trabaja con sistemas de información geográfica, en los cuales las escenas de teledetección son una de las principales fuentes de datos. En otras ocasiones, las informaciones contenidas en una imagen de satélite, necesitan ser presentadas al usuario como un "mapa-imagen", con una red geográfica de referencia superpuesta a la misma.



Un mapa puede definirse como "una representación gráfica, en una superficie plana, de la superficie de la tierra o de parte de ella, mostrando sus rasgos geográficos superficiales. Estos son ubicados de acuerdo con controles geodésicos, mallas geográficas, proyecciones y escalas previamente definidas". Una proyección cartográfica es una manera de representar la superficie curva de la tierra, sobre una de naturaleza plana. Muchos tipos de proyecciones son utilizadas para lograrlo; en Colombia la más usada es la Universal Transversa de Mercator, que consiste en una superficie de proyección definida por un cilindro tangente a un meridiano determinado.

Para introducir precisión cartográfica en las imágenes de teledetección, es necesario corregirlas de acuerdo con algún sistema de coordenadas. Se llama georreferenciación, corrección geométrica o registro, la transformación de una imagen para que esta asuma las propiedades de escala y proyección de un mapa. Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen, aquí no se pretende modificar los niveles digitales (ND) de los mismos, sino sólo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen.

#### **4.7. TRANSFORMACIÓN MEDIANTE PUNTOS DE CONTROL EN EL TERRENO**

Para aplicar esta transformación, es necesaria la existencia de una imagen que se considera como referencia, o de un mapa planimétrico o planialtimétrico confiable, en una escala adecuada para el área considerada, dado que tanto en la imagen como en el mapa, será necesario identificar puntos de control. En ambos casos, la corrección se realiza en tres fases: localización de puntos comunes a la imagen y al mapa (o a otra imagen de referencia), cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, y transferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

Para el Proyecto MZSCali, se eligió la base cartográfica del DANE a escala 1:25.000 en formato digital. Las funciones que permiten transformar coordenadas de la imagen al mapa, precisan localizar una serie de puntos de control entre la imagen y el mapa. A partir de las coordenadas de estos puntos, puede estimarse una función que relacione ambos documentos. Dado que las funciones se estiman a partir de esa muestra de coordenadas, la calidad de ajuste dependerá de la precisión con que se localicen esos puntos. De lo contrario, la estimación resultará sesgada. En definitiva, el establecimiento de puntos de control resulta la fase más crucial del proceso de corrección geométrica, y la que demanda mayor dedicación humana.

Los puntos de control son rasgos bien definidos, generalmente de gran contraste espectral en relación con sus alrededores, fácilmente reconocibles, que pueden ser ubicados con exactitud tanto en el mapa como en la imagen, y que en lo posible, tengan poca variabilidad en el tiempo. Así el propósito de esta transformación, es la de establecer las diferencias de posicionamiento de algunos puntos en la imagen y en el mapa, para a partir de ellas estimar



1379

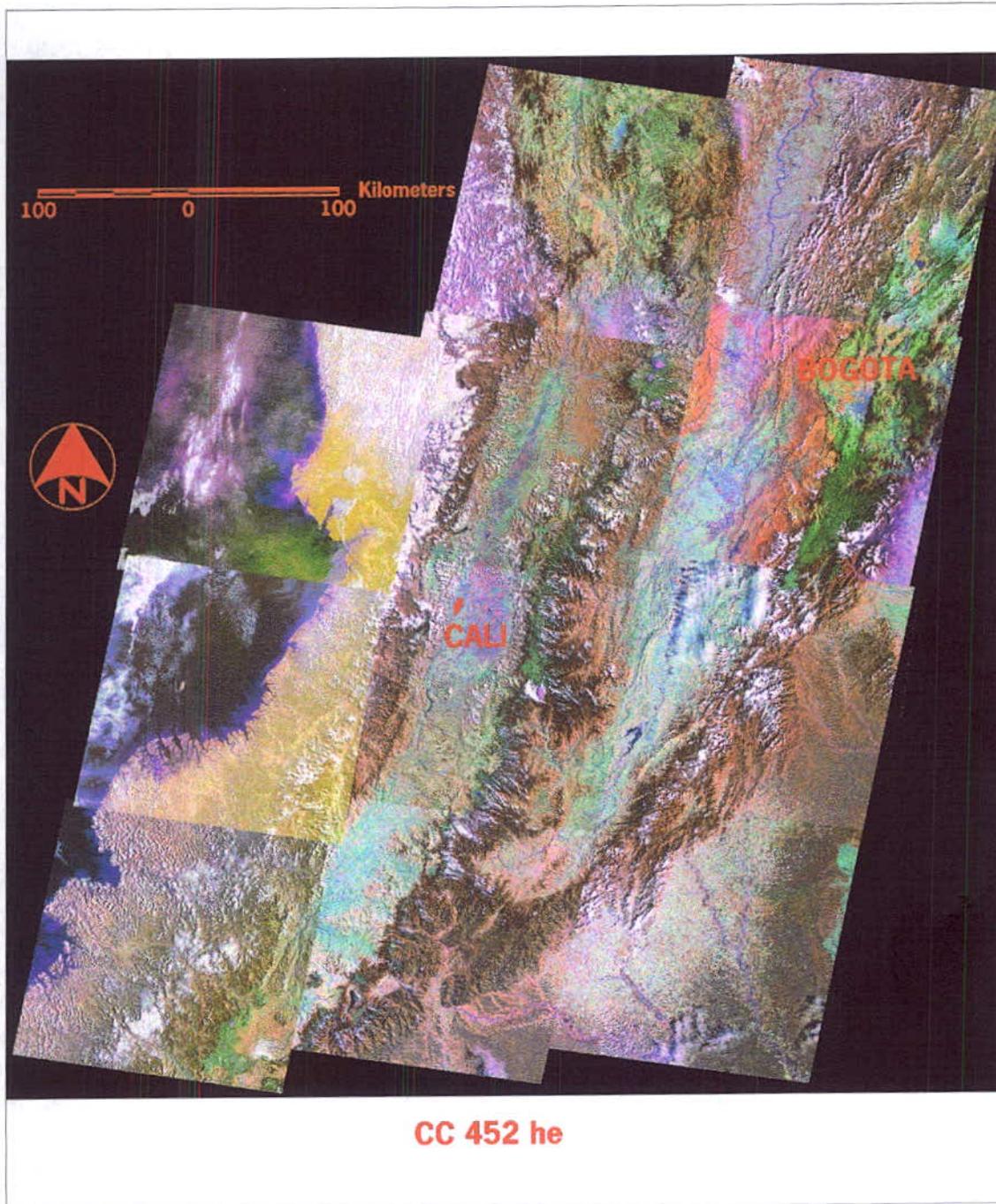
la naturaleza de la distorsión presente en la primera, para poder estimar la transformación razonable a ser calculada para corregirla.

Ejemplos de puntos de control en el terreno (Ground Control Points) son intersecciones de carreteras, límites de rasgos agrícolas, creces de drenajes, pistas de aeropuertos, municipios, entre otros. Tales puntos son identificados y ubicados en la imagen, como coordenadas de línea y columna, utilizando un programa de procesamiento digital de imágenes. Las coordenadas geográficas de los mismos se obtienen a partir de mapas.

Se recomienda que los puntos de control sean claramente identificables en la imagen y en el mapa, que sean rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril. No conviene señalar puntos en la línea de costa, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico. La misma idea puede aplicarse a los cursos de agua o embalses, que sufren alteraciones estacionales, en ocasiones de gran importancia.

Algún elemento destacado de la vegetación podría utilizarse como punto de control, siempre que se disponga de la cartografía temática apropiada, y no se hayan producido cambios entre la fecha de la imagen y la del mapa. Respecto a la distribución, conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el terreno abarcado en la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio (Chuvienco, 1990). La norma es especialmente importante cuando la zona presenta contrastes topográficos, tal como sucede en el área considerada por el Proyecto MZSCali.

Nuestra propia experiencia indica que la selección de puntos de control es una tarea bastante laboriosa. Para el caso del Suroccidente Colombiano, no fue fácil encontrar muchos rasgos humanos del paisaje no sujetos al dinamismo temporal, razón por la cual se hizo necesario utilizar principalmente cruces de drenajes para georreferenciar las imágenes. El resultado final es un mosaico de once (11) escenas Landsat TM 5 (Figura 7).



**Figura 7.** Mosaico de once (11) escenas Landsat TM del Suroccidente Colombiano, en composición de falso color RVA 452



---

## CAPITULO 5

---

### IMÁGENES DE RADAR

La banda del espectro que se inicia en las longitudes de onda milimétricas se denomina región de microondas. Se trata de las longitudes mayores, utilizadas tanto en teledetección como en otras aplicaciones civiles y militares.

La observación en esta banda del espectro es complementaria y más compleja que la realizada en las bandas ópticas, por lo que el rango de aplicaciones es todavía muy inferior al registrado en éstas. No obstante, el interés por la tele-observación a partir de microondas ha crecido notablemente en los últimos años, gracias a que la atmósfera es prácticamente transparente para estas longitudes de onda. Por tal razón, esta región resulta idónea para cartografiar áreas tropicales, muy frecuentemente cubiertas por las nubes, como la Costa Pacífica Colombiana, considerada por el Proyecto MZSCali.

A diferencia de los sensores pasivos, como el Landsat TM5, que mide radiación electromagnética natural reflejada o emitida, el radar es un sistema activo que utiliza energía artificialmente generada, para iluminar la superficie del terreno de la que recoge sus señales de retorno (Fig. 8). La palabra *radar* es la sigla de *Radio Detection and Ranging*, que significa detección y alcance por radio, dado que este sistema de percepción remota determina distancias mediante cálculo de intensidades de la señal de retorno (detección), y los tiempos que tardan estas en regresar (alcance – range), en las porciones del radio y las micro-ondas del espectro electromagnético, que están aproximadamente entre 0.5 y 75cms (Fig. 8).

#### 5.1. VENTAJAS

- La energía de las microondas puede atravesar las nubes, y en alto grado la lluvia. Los radares que operan en longitudes de onda superiores a 2 cms, no son afectados en forma significativa por la cobertura de nubes; la lluvia representa un factor que interfiere con la calidad de las imágenes, para longitudes de onda inferiores a 4 cms. En regiones de condiciones meteorológicas severas, como la Costa Pacífica Colombiana, que se tornan problemáticas para la adquisición de imágenes multispectrales de sensores como el Landsat TM, el radar se constituye en un sistema de teledetección altamente benéfico.
- Como el radar es un sensor activo que produce su propia señal, puede operar tanto durante el día como la noche. Esto es especialmente ventajoso en las regiones polares, donde los largos periodos de oscuridad restringen la adquisición de imágenes.

- Las imágenes de radar suelen contener información valiosa, no disponible en las porciones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Pueden proveer datos sobre la superficie de la tierra con relación a rugosidad, topografía, condiciones de humedad y vegetación.

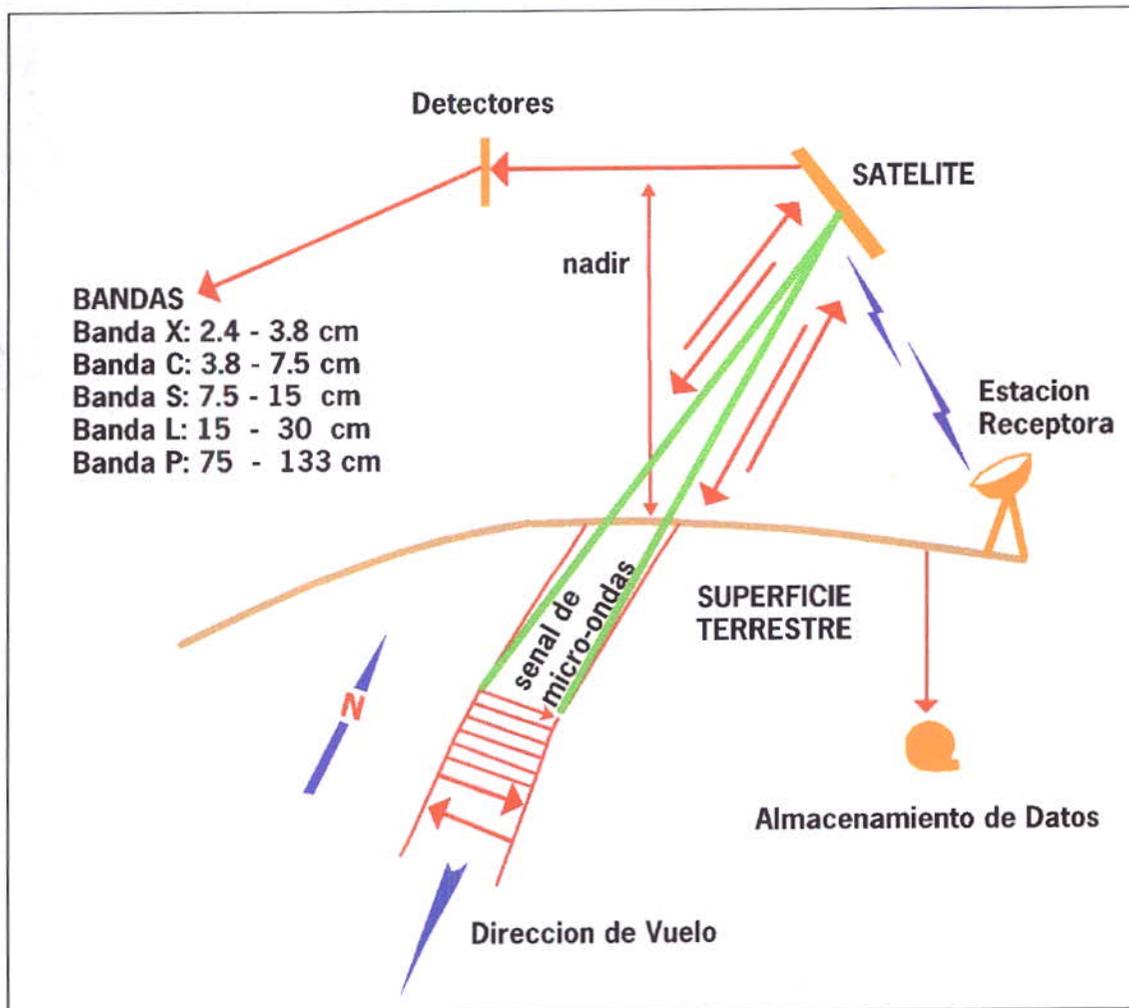


Figura 8. Componentes de un Sistema Sensor de Radar



## 5.2. MOSAICO DE IMÁGENES DE RADAR DE LA COSTA PACÍFICA COLOMBIANA

Según PLADEICOP (1983), en la Costa Pacífica Colombiana a partir de la línea costera se registra un aumento fuerte de la precipitación, en dirección hacia las laderas de la Cordillera Occidental. En la Costa Pacífica es de 1934 mm y asciende hasta 7597 mm en el piedemonte. En el Puerto de Guapi, uno de los más importantes de la región, se registran temperaturas mensuales entre 25.08°C y 26.25°C y una precipitación anual de 5054 mm.

El área de estudio presenta alta nubosidad; en las alturas de 1000 msnm, en las estribaciones occidentales de la Cordillera Occidental, se forman asociaciones atmosféricas muy húmedas, que se manifiestan como presencia frecuente de neblina o nubes en contacto con la vegetación. Por estar situada en el Cinturón de Lluvias de la Costa Pacífica, posee uno de los climas más húmedos del mundo (Times Atlas of the World, 1985), causante de una capa perenne de nubes, que dificulta el uso de sensores como el Landsat TM5, durante las campañas de cartografía geológica.

Para subsanar todas las dificultades que presenta la captación de la Costa Pacífica Colombiana, por parte de un sensor como el Landsat TM, se armó un mosaico de radar digital, a partir de sub-escenas coincidentes con veintinueve (29) planchas escala 1:100.000 (**Figura 9**). Dicho mosaico fue tomado por la empresa canadiense INTERA para el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), durante los meses de junio y julio de 1992, utilizando el radar digital de apertura sintética de alta resolución (Digital High Resolution Synthetic Apertura Radar – STAR 1), montado en una plataforma aerotransportada, que opera a una altitud promedio de 7620 m sobre el nivel del mar.

Para ensamblar el mosaico de imágenes de radar INTERA, fue necesario georreferenciar las veintinueve sub-escenas con respecto a la base cartográfica del DANE, que como se dijo antes, también se utilizó para ajustar las escenas Landsat TM.

El comparar el área de la Plancha 203 del Departamento del Chocó, percibida por Landsat TM 5 (**Figura 10**) y el radar INTERA (**Figura 11**), permite apreciar las ventajas de este último sensor, para la captación de terrenos con alta pluviosidad de la Costa Pacífica Colombiana. De hecho, la ausencia de información en la porción noroccidental de la **Figura 10**, obedece a la imposibilidad de conseguir escenas Landsat TM con cubrimiento de nubes menor del 90%.

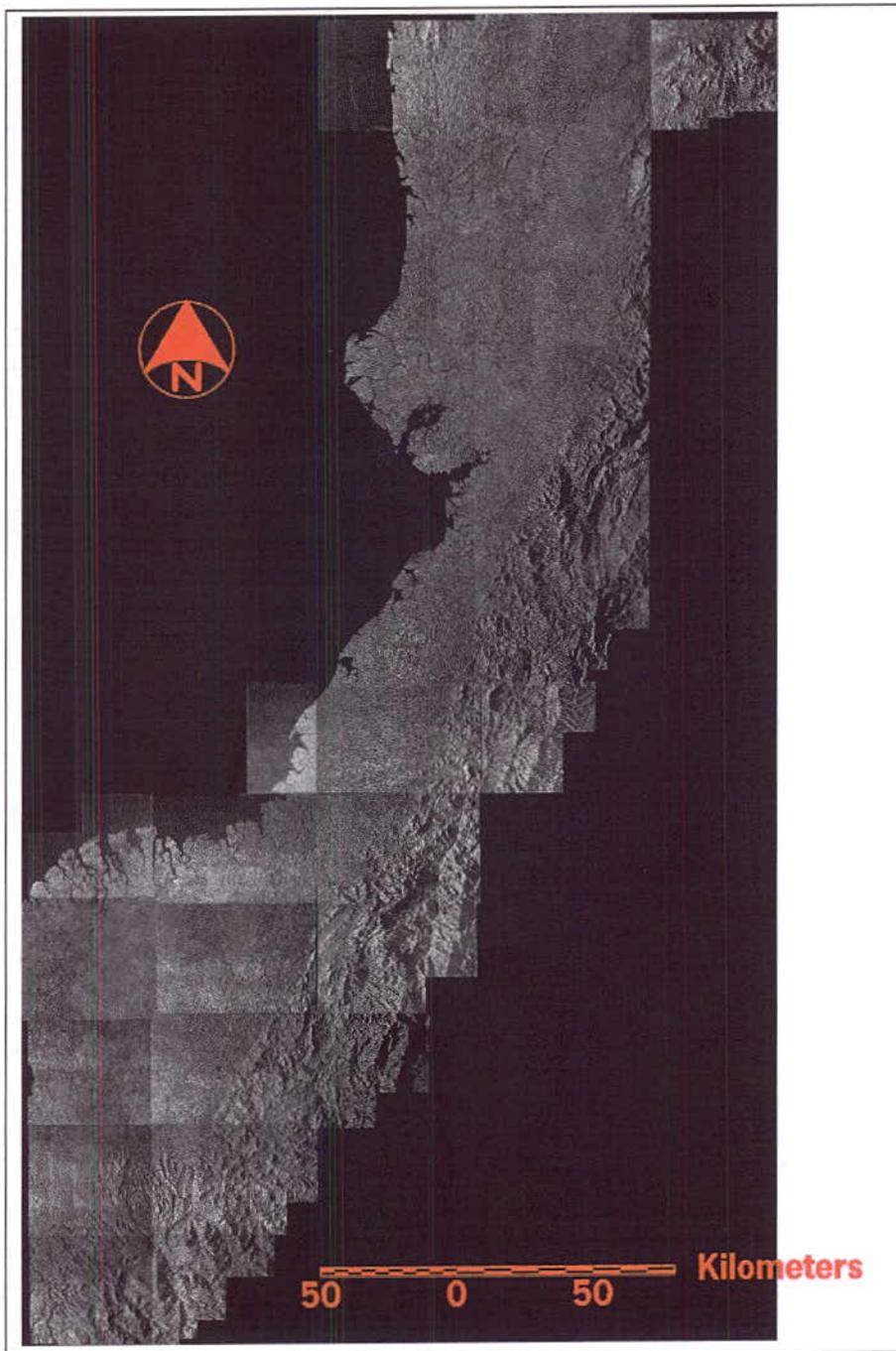
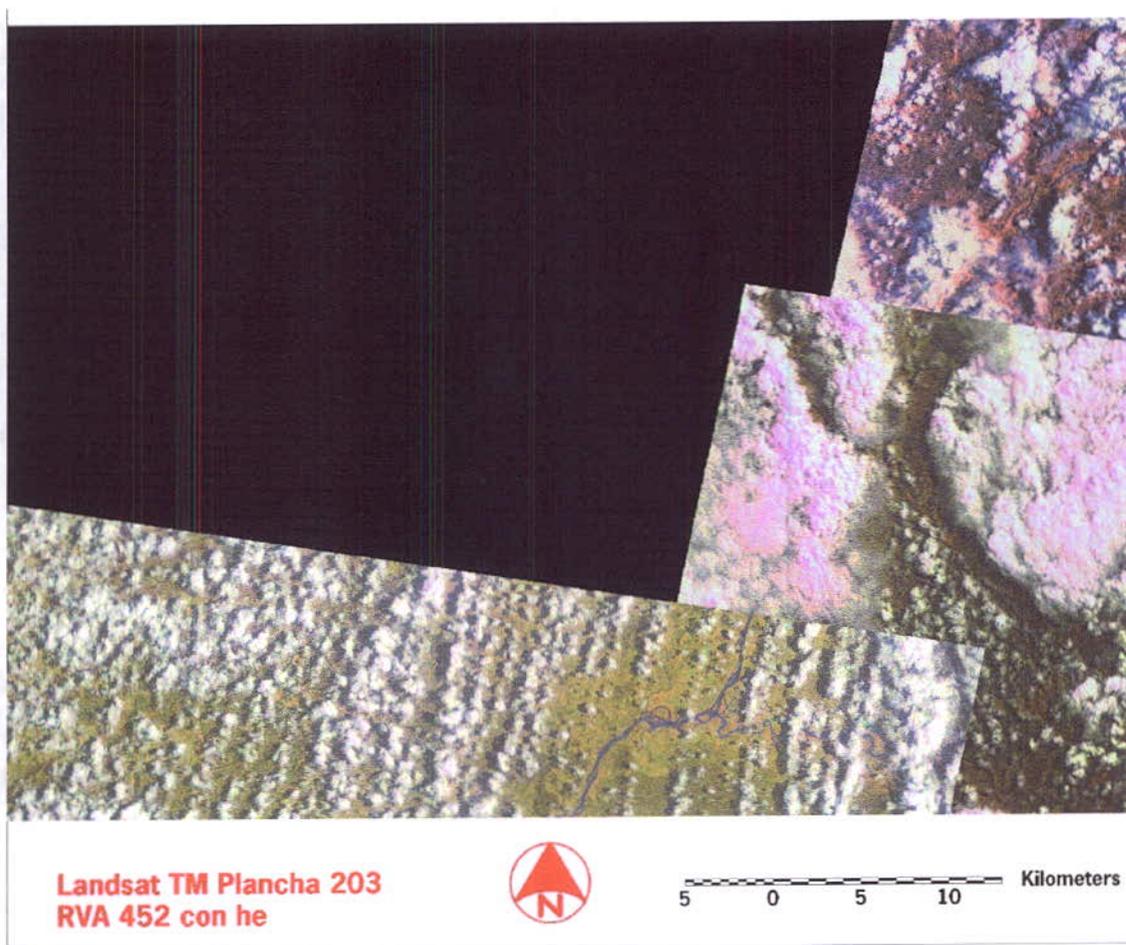


Figura 9. Mosaico de Radar INTERA de la Costa Pacífica Colombiana.



**Figura 10.** Sub-escena Landsat TM de la Plancha 203, en composición de falso color RVA 452



**Radar Intera Plancha 203**



5 0 5 10 Kilometers

**Figura 11.** Sub-escena Radar INTERA de la Plancha 203



---

## CAPITULO 6

---

### SINERGISMOS

El término sinergia se define como la acción de una o más sustancias, para lograr un efecto que ninguna de ellas es capaz de producir individualmente. Con la disponibilidad de imágenes de diferentes sensores, frecuencias, resoluciones y temporalidades, generadas por diversos satélites para la observación de la tierra, la fusión de imágenes o sinergismo se ha convertido en una herramienta valiosa para la evaluación de la superficie de la tierra.

Los sensores que en la actualidad están operando, producen datos que cubren porciones distintas del espectro electromagnético, con diferentes resoluciones espaciales y espectrales. Las imágenes fusionadas aportan mejoras para la interpretación y resultados más confiables, dado que se combinan datos de características diferentes.

Las imágenes varían en resolución espacial, espectral y temporal, y por lo tanto aportan una visión más completa de los objetos observados. El objetivo de la fusión de imágenes es el de integrar datos complementarios, para obtener más información de la que puede derivarse a partir de los datos de un solo sensor (Pohl, 1996).

Para la zona regional considerada por el proyecto se fusionaron los datos de radar INTERA con los provenientes del Landsat TM. El área de la Plancha 427 ilustra las diferencias entre la captación de la superficie terrestre por parte del radar INTERA (**Figura 12**), el Landsat TM (**Figura 13**) y la sinergia entre las dos (**Figura 14**). Para el intérprete de estos productos, es crucial conocer las imágenes a partir de las cuales se generaron.

La fusión de radar con Landsat TM genera un mejoramiento textural en el producto final (**Figura 14**), que se observa hasta en las nubes, las cuales aunque son tan evidentes en la sub-escena Landsat TM (**Figura 13**), adquieren apariencia de nieve en la sinergia de las dos imágenes (**Figura 14**).



Figura 12. Sub-escena Radar INTERA de la Plancha 427

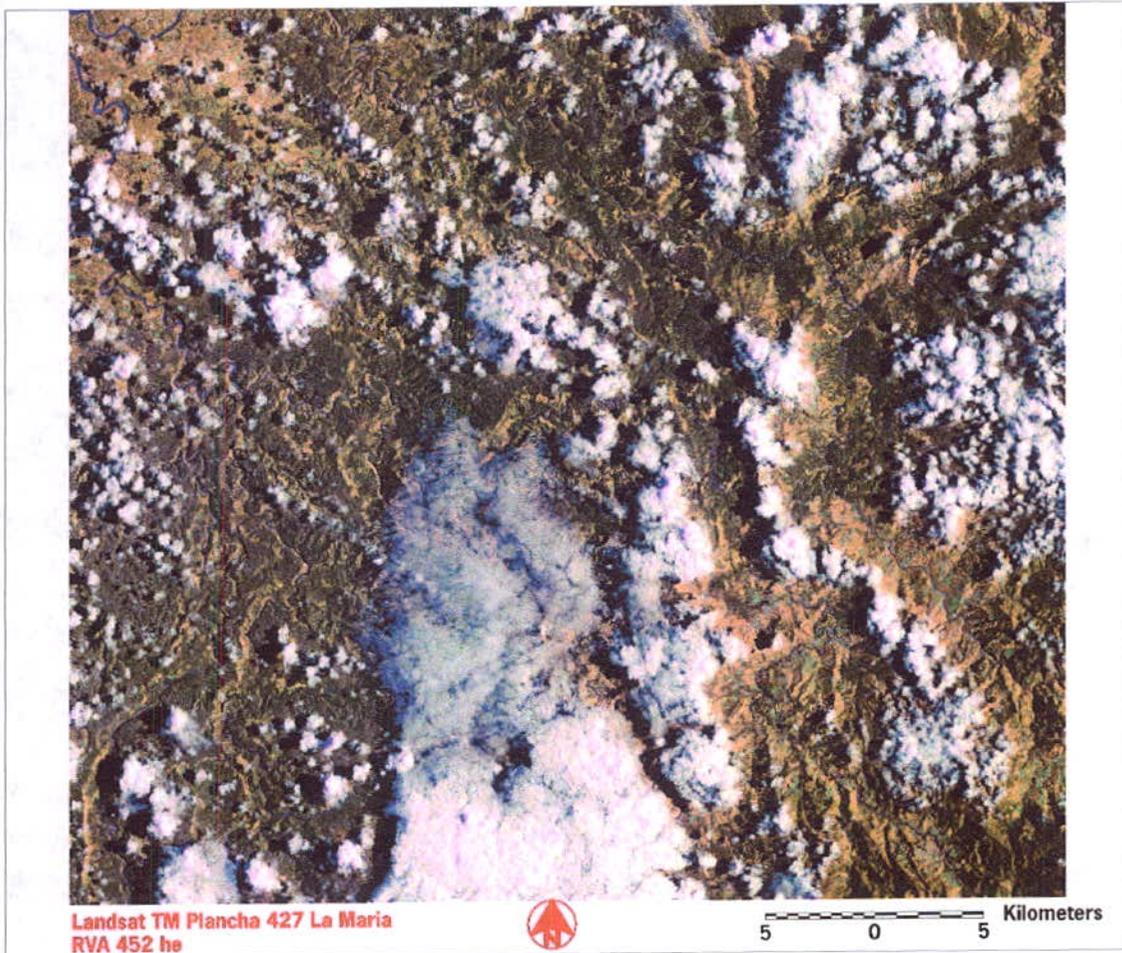


Figura 13. Sub-escena Landsat TM de la Plancha 427, en composición de falso color RVA 452



Figura 14. Sinergia Landsat TM - Radar INTERA de la Plancha 427



---

## CAPITULO 7

---

### CONCLUSIONES

- Por su captación sinóptica de la superficie terrestre, los mosaicos Landsat TM y Radar Intera usados de manera independiente, resultaron muy útiles para realizar la interpretación geológica y estructural del área de estudio a escala regional.
- Los productos obtenidos por la fusión de datos Landsat TM y Radar Intera, no fueron muy útiles para la interpretación geológica y estructural a escala regional del área de estudio. La cobertura de nubes presente en las escenas Landsat TM, principalmente en las zonas correspondientes con la Región Pacífica, generó texturas confusas en los sinergismos que dificultaron su interpretación.



---

## CAPITULO 8

---

### BIBLIOGRAFIA

Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2ª Edición, Ediciones RIALP, S.A., Madrid (España), 459 pp.

Crosta, A.P., 1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, S.P.: UNICAMP, 170 pp.

Drury, S.A., 1989. Image interpretation in geology. London Allen & Unwin, 243 pp.

PLADEICOP, 1983. Plan de Desarrollo Integral de la Costa Pacifica Colombiana. Cali, Colombia.

Pohl, C., 1996. Geometric Aspects of Multisensor Image Fusion for Topographic Map Updating in the Humid Tropics. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC publication No. 39, 159 pp.

TIMES ATLAS OF THE WORLD, 1985. (7th ed.) (London: Times Books and Bartholomew).