

CONSIDERACIONES Y METODOS PARA LA DETECCION DE CAMBIOS EMPLEANDO IMAGENES DE SATELITE EN EL MUNICIPIO DE PAIPA

Orlando Riaño M.¹

INTRODUCCION

La detección de cambios se ha convertido en una aplicación importante de los datos multiespectrales y multitemporales de los programas satelitales para estudios de recursos naturales Landsat TM (Estadounidense) y SPOT XS (Europeo). Debido a la constante adquisición de imágenes en el tiempo, es posible determinar los tipos y extensión de los cambios que se dan en el medio ambiente. Para llevar a cabo éste proceso se han utilizado algunas técnicas digitales para detección de cambios, tales como: sobreposición de imágenes, diferencia entre imágenes y análisis de componentes principales. En este artículo se presentan las consideraciones y métodos para la detección de cambios en la cobertura de la tierra, empleando dos imágenes Landsat TM de diferentes fechas para un área del municipio de Paipa.

La detección de cambios consiste en identificar diferencias en el estado de una característica o fenómeno por observaciones que se hacen en diferentes épocas. Las imágenes de sensores remotos ofrecen una fuente invaluable de datos para detectar y seguir cambios de un determinado fenómeno o variable ambiental en el tiempo y en el espacio.

Mediante el procesamiento digital de imágenes de diferentes fechas, complementadas con análisis de información auxiliar y datos de campo, es

posible detectar los cambios en cobertura y uso en un área de interés. Los datos provenientes del Landsat TM, por su regular cubrimiento (cada 16 días y año tras año) ofrecen el potencial para detectar perturbaciones y otros cambios que ocurren en el uso de la tierra, tipo de cobertura y condiciones de ésta en áreas de interés.

La representación espacial permite detectar y estimar la extensión de los cambios, mientras que la frecuencia provee la proporción en la que tales modificaciones ocurren.

FUNDAMENTO TEORICO

Los conceptos teóricos de éste artículo son extractos de los textos de **Jensen, (1.996)** y **Chuvieco (1.996)**.

Uno de los aportes más destacados de la Percepción Remota al estudio del medio ambiente es su capacidad para seguir procesos dinámicos. La información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, como lo son las imágenes de satélite, constituyen una fuente muy valiosa para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debidos al ciclo estacional de las cubiertas, a catástrofes naturales o a alteraciones de origen humano. El ritmo máximo de observación depende de la resolución temporal del sensor -aunque en términos prácticos ese período se amplía, si

¹ Matemático. Universidad Nacional de Colombia; Ingeniero de Sistemas y Computación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor de Matemáticas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal.

consideramos la cobertura nubosa o posibles problemas generados por el sensor-, variando con los sistemas disponibles entre 30 minutos para los satélites geo-estacionarios y varias semanas para los de estudios de recursos naturales con órbita polar.

Así, la frecuencia de observación puede adaptarse al estudio de diversos problemas, desde la dinámica atmosférica, que requiere una observación continua, hasta los cambios urbanos o agrícolas, que sólo precisan actualización en el orden de varios meses o años. En los comienzos de la percepción remota, la resolución espacial del sensor se consideraba el elemento más crítico para valorar su potencialidad, actualmente la resolución temporal se califica como un criterio más protagonista, al acentuarse la necesidad de contar con información suficientemente actualizada. Por ejemplo, para evaluar las condiciones vegetales a corto plazo, con el propósito de predecir el rendimiento de un cultivo o el peligro de incendios- por poner dos ejemplos de gran interés-, de nada serviría una alta precisión espacial sin el adecuado ciclo de cobertura. Un buen detalle espacial no es suficiente para estimar operativamente el riesgo de incendio si sólo contamos con una imagen de cada 16 días. Será preferible, en este contexto, emplear imágenes con menos detalle, siempre que proporcionen información con mayor frecuencia. Para que puedan abordarse estudios multitemporales con percepción remota es preciso que el sistema sensor proporcione una cobertura periódica, en las mismas bandas espectrales y bajo condiciones de observación similares (altura, hora, ángulo de adquisición). La mayor parte de los satélites de recursos naturales cumplen estos requisitos, excepción hecha de los instalados sobre aeronaves espaciales que no ofrecen una cadencia y homogeneidad adecuada, aunque permiten comparaciones visuales-cualitativas de gran interés.

La dimensión temporal puede considerarse en la Percepción Remota con un doble objetivo: multiestacional y multianual. En el primer caso, la dimensión temporal sirve para refinar la discrimina-

ción de algunas categorías, que pueden no ser separables espectralmente, pero si atendiendo a su variedad fenológica. Con este objetivo, se seleccionan imágenes adquiridas en distintas estaciones, de acuerdo al calendario estacional de esas cubiertas. Habitualmente, se combinan las bandas de todas las imágenes en un sólo archivo, de tal manera que se enriquezca la clasificación espectral incorporando un componente temporal (**Lo, 1986**). También hay ejemplos de comparación entre clasificaciones realizadas para distintas estaciones, comparando las categorías que en cada una se pueden separar (**Shriever y Conglaltón, 1995**).

Los resultados suelen mejorar notablemente la clasificación mono-temporal (**Berg y Galli, 1980; Girard, 1981; Mergerson, 1981**), si bien es preciso ajustar geoméricamente muy bien las imágenes, para evitar confusiones en los perfiles temporales generados, ya que la asignación se realiza píxel a píxel (**Lo et al., 1986**).

El segundo enfoque, denominado análisis multianual, tiene por objeto detectar los cambios producidos entre dos o más fechas, para lo que suele partirse de imágenes adquiridas en distintos años, que se comparan visual o digitalmente (**Sader y Winne, 1992**). En este caso, por contraposición al enfoque multiestacional, se procura que las imágenes sean de la misma época del año, para aislar más fácilmente lo que ellas manifiestan de cambios en el terreno. Con este objetivo, el análisis multianual requiere una homogenización radiométrica y geométrica de las imágenes para minimizar la influencia de la atmósfera, las condiciones del sensor, o la geometría de iluminación.

ETAPAS PARA LLEVAR A CABO UN ESTUDIO DE DETECCIÓN DE CAMBIOS USANDO DATOS DE IMÁGENES DE SATELITE

Para los datos que se adquieren por sensores remotos y se utilizan para estudios de detección de cambios deben seguirse las siguientes pautas:

Presentación del problema

- * Definir el área de estudio
- * Definir la frecuencia de la detección de cambios (ejemplo: multiestacional, multianual)
- * Identificar las clases a partir de un sistema de clasificación de uso y cobertura de la tierra apropiado.

Consideraciones relevantes

- * Del sistema de Percepción Remota
 - Resolución temporal
 - Resolución espacial
 - Resolución espectral
 - Resolución radiométrica
- * Ambientales
 - Condiciones atmosféricas
 - Condiciones de humedad del suelo
 - Características del ciclo fenológico

Procesamiento de imágenes para extraer información de cambios

- * Adquisición apropiada de datos para detección de cambios
 - Datos in situ y adicionales
 - Datos de Percepción Remota
 - Año base (tiempo n)
 - Años(s) subsecuentes (tiempo n-1 ó n+1)
- * Preprocesamiento de datos multitemporales
 - Corrección geométrica
 - Homogenización radiométrica
- * Selección del algoritmo para detectar cambios
- * Clasificación digital de la imagen (si es necesario)
 - Híbrido entre clasificación supervisada y no supervisada
- * Ejecución de la detección de cambios usando algoritmos de SIG

- Generación de productos con cambios
- Cálculo de estadísticas de cambio

* Presentación de resultados

- Productos digitales de detección de cambios
- Productos análogos de detección de cambios

Consideraciones del sistema de Percepción Remota

Los datos adquiridos de sensores remotos y utilizados para estudios de detección de cambios deberán tener las resoluciones temporal, espacial, espectral y radiométrica constantes. Las características de estos parámetros deben ser conocidas por el analista. Igualmente se debe identificar como éstos aspectos pueden tener un impacto sobre el éxito de un proyecto de detección de cambios con el empleo de la percepción remota.

Resolución temporal. Cuando se realizan estudios de detección de cambios usando datos de sensores remotos de diferentes épocas, para obtener óptimos resultados, debe tenerse en cuenta que los siguientes aspectos sean constantes:

- Los datos deberán ser adquiridos aproximadamente a la misma hora del día. Los datos de Landsat TM se adquieren alrededor de las 9:30 a.m. en nuestra Latitud. Esto elimina los efectos diurnos del ángulo solar que pueden causar anomalías y diferencias en las propiedades de reflectancia de los datos de percepción remota.
- Los datos tomados el mismo día en diferentes años disipan el ángulo solar estacional que podría afectar el proyecto de detección de cambios.

Resolución espacial y ángulo de visión. El registro espacial de al menos dos imágenes es esencial para la detección de cambios en forma digital. Debe considerarse que las siguientes variables sean constantes:

- Cuando los datos adquiridos con sistemas de sensores remotos tienen el mismo campo instantáneo de vista, el registro es más fácil y exacto. Si el campo instantáneo de vista es diferente en las dos imágenes, éstas deben remuestrearse a un igual tamaño de pixel.
- Rectificación del error cuadrático medio a menos de medio pixel. Los errores en el registro entre las dos imágenes pueden resultar en la identificación de áreas de cambio falsas entre el conjunto de datos
- Dos imágenes con ángulo de visión significativamente diferente pueden causar problemas cuando son usadas para propósitos de detección de cambios. Las diferencias en las reflexiones de las dos imágenes pueden causar resultados de detección de cambios erróneos.

Resolución espectral. Con datos adquiridos en las diferentes fechas del mismo sensor y en las mismas bandas, se logran mejores resultados. De no ser esto posible, deben usarse las bandas que estén lo más cercanamente posible.

Resolución radiométrica. Cuando la resolución radiométrica de los datos adquiridos por el sistema es comparada con los datos proporcionados por un instrumento de alta resolución radiométrica, entonces los de baja resolución deben ser ajustados para propósitos de detección de cambios. No obstante, la precisión de los valores descomprimidos no puede ser mayor que la de los originales.

Consideraciones ambientales

Cuando se lleva a cabo la detección de cambios es conveniente considerar variables ambientales tales como: condiciones atmosféricas, suelo y de vegetación en lo posible.

Las condiciones atmosféricas ideales para la recolección de datos de sensores remotos incluyen ausencia de: nubes y extrema humedad. Una cobertura de nubes mayor al 20 % es usualmente considerada como inaceptable. Los analistas tienen que considerar con más detalle la canti-

dad aceptable de cobertura de nubes en su área de estudio. La nubosidad no sólo oscurece el terreno sino que la sombra de la nube puede incluso causar mayores problemas en la clasificación de la imagen.

Si existen diferencias dramáticas en las condiciones atmosféricas de las imágenes que serán utilizadas en el proceso de detección de cambios, se permite disipar la atenuación atmosférica. Es importante que datos del sitio estén disponibles el día de la toma. Para corregir los datos de sensores remotos de diferencias atmosféricas dramáticas pueden emplearse modelos sofisticados de transmisión atmosférica o métodos empíricos alternativos. (Jensen, 1996).

Bajo condiciones ideales, las características de humedad del suelo deberán ser idénticas para cada una de las imágenes usadas en el proyecto de detección de cambios. Cambios en las condiciones de humedad en una de las fechas pueden causar serios problemas en el proceso de detección de cambios.

Problemas causados por cambios en las condiciones de humedad del suelo deben evitarse revisando cuidadosamente los registros de precipitación para determinar que tanta lluvia o nieve cayó en los días y semanas previos de la toma de datos. Cuando las diferencias de humedad del suelo entre los datos de cada fecha son significativas para algunas partes del área de estudio (quizá debido a tormentas locales), deben cortarse las áreas afectadas y hacer un análisis por separado en la etapa final del proyecto.

REQUISITOS PREVIOS PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Corrección geométrica:

Para abordar digitalmente la detección de cambios es preciso que las imágenes se ajusten con gran nivel de detalle, ya que de otro modo estaríamos detectando como transformaciones lo que sería sólo fruto de una falta de ajuste entre imágenes (Hord, 1982). El efecto puede llegar a ser

muy grave, especialmente cuando se trata de detectar categorías con una gran variabilidad espacial, como es el caso de las urbanas (**Gordon, 1980**), dependiendo también de la resolución espacial del sensor (**Nelson y Grebowsky, 1982**).

La mayor parte de las imágenes basan el ajuste geométrico en la localización de una serie de puntos de control imagen-mapa. Para el análisis multitemporal, los puntos se toman entre imágenes, eligiendo una como referencia. En éste caso, el proceso de seleccionar puntos comunes resulta más sencillo, ya que es mucho más fácil de identificar los rasgos comunes entre dos imágenes, que entre una imagen y un mapa. Aquí suelen emplearse formas características de la vegetación, del trazado parcelario o la hidrografía, visibles entre imágenes, pero que habitualmente no son localizables en el mapa.

Homogenización Radiométrica

Otro importante problema en la detección de cambios es el producido por las variables: condiciones de observación, situaciones atmosféricas o condiciones de calibración del sensor. Estos efectos modifican la firma espectral de un píxel, aunque se mantenga constante la cubierta. En consecuencia, es preciso homogenizar los Niveles Digitales (ND) de las imágenes que intervienen en el análisis. Para ello, puede optarse por un doble enfoque:

- Calibrar los ND de modo absoluto, convirtiéndolos a medidas de reflectividad o temperatura del suelo, o
- Equiparar los ND entre imágenes.

TECNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS

En los últimos años han proliferado notablemente los estudios de detección de cambios, aplicándose a una gran variedad de disciplinas (**Mouat, 1993**). Intentando resumir estos trabajos, podemos presentar las técnicas empleadas en dos grandes categorías, según utilicen imágenes continuas o categorizadas (**Eastman, 1994**). En el

primer caso, se emplean técnicas cuantitativas: diferencias, regresión, componentes principales, etc., mientras en el segundo se comparan imágenes previamente clasificadas, mediante tablas de contingencia.

Composiciones multitemporales

Esta técnica de detección se basa en comparar visualmente los tonos de gris o de color que ofrecen dos o más imágenes multitemporales. Habitualmente, se aplican previamente algunas técnicas de realce del color o transformaciones, como índices de vegetación o componentes principales. Posteriormente, se realizan composiciones multitemporales de color con esas bandas (**Sader y Winne, 1992**). Una muy común es aplicar el cañón rojo a la primera fecha y el verde a la segunda, dejando el azul vacío. Aparecerán en tonos de amarillo las áreas estables, en tonos rojos las zonas que hayan reducido sus ND entre fechas y en tonos de verde las que lo hayan ganado. El método resulta bastante sencillo y tiene la ventaja de incorporar el conocimiento y los criterios de análisis del intérprete, lo que resulta muy ventajoso en categorías urbanas (**Martín, 1989**).

Diferencia entre imágenes

Una simple resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogenizadas radiométrica y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras que las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos). Si el equipo de procesamiento digital no permite visualizar valores negativos, conviene añadir al cálculo una constante para evitarlos. Resumiendo: $ND_c = ND_{t_2} - ND_{t_1} + K$

Donde ND_c indica el ND correspondiente a la imagen de cambios, ND_{t_1} y ND_{t_2} los correspondientes niveles digitales a las imágenes de la primera y segunda fecha, respectivamente y K es una constante para evitar valores negativos.

Como resultado de este cálculo se obtiene una imagen de cambios, que presentará tonos oscuros para las zonas que hayan reducido sus ND, los más claros para aquellos que hayan ganado y los intermedios para las zonas estables. El cálculo puede realizarse sobre los ND de alguna de las bandas originales, aunque es más frecuente aplicar esta operación sobre índices de vegetación. En este caso, el valor de la diferencia nos permite señalar las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal (**Viedma, 1993; Coppin y Bauer, 1994**). El histograma de esa imagen de cambios suele revelar un perfil gaussiano, con las máximas frecuencias para las zonas estables (en el centro del histograma) y las dinámicas ocupando las colas de la distribución

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) permite sintetizar un conjunto de bandas en otro más reducido, sin perder gran parte de la información original. En el caso de aplicaciones multitemporales, se utiliza esta técnica de un modo particular. Se genera, en primer lugar, un archivo multitemporal con las bandas correspondientes a las dos fechas, sobre el que se aplica el ACP. En este caso, los primeros componentes resultantes del análisis no son los más interesantes, ya que estos recogerán la información común a las dos fechas; esto es, la estable. Por su parte, los componentes inferiores ofrecen la información no común: el cambio, que es precisamente lo que más interesa en este contexto.

AREA DE ESTUDIO

El municipio de Paipa está localizado en el centro de la parte norte del departamento de Boyacá. Su cabecera municipal se encuentra a los 5°47' de latitud norte y 73° 06' de longitud oeste, y a una altitud de 2525 m. Presenta una temperatura promedio de 13°C., con una precipitación media anual de 944 mm. Abarca una extensión de 42.000 hectáreas aproximadamente (**Figura 1**).

El área ocupada por el municipio, forma parte de la cuenca alta del río Chicamocha. Morfológicamente su territorio de norte a sur, presenta tres regiones a saber: media falda con colinas y páramos al norte; un plano inclinado con aguas freáticas superficiales (utilizadas antes en aljibes) y un área pantanosa, asiento de antiguo lago, el cual hace parte del pantano de Vargas, donde brotan aguas termominerales en inusitada abundancia. La red hidrográfica esta conformada por el río Chicamocha y las Quebradas Valencí y El Rosal y el Lago de Sochagota, alimentado este último por la Quebrada El Salitre o Quebrada Honda.

Las tierras del área se encuentran dedicadas a ganadería extensiva y cultivos de papa, cebada, maíz, trigo, arveja, frijol y hortalizas. En los sectores próximos a los núcleos urbanos se cultivan frutales perennes como: pera, manzana, ciruela. La ganadería esta principalmente orientada a la cría, levante y engorde de ganado vacuno, también se da en menor escala la explotación de ganado lechero. Además existen explotaciones de ganados lanar y porcino y aves de corral. En jurisdicción del municipio se encuentran excelentes instalaciones turísticas y hoteleras que son visitadas anualmente por miles de turistas, tanto nacionales como extranjeros.

PROCEDIMIENTO METODOLOGICO

MATERIALES Y METODOS

Información Análoga y digital

- Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra. Escala 1:25.000 del IGAC de 1998.
- Imágenes multispectrales Landsat TM (Path: 7, Row 56), 7 bandas del 11 de enero de 1988 y diciembre 5 de 1994.

Programas y Equipos

- Ilwis versiones 1.41 y 2.1
- Erdas Imagine versión 8.3
- Office 97 - PC Acer Power 433 con pantalla monocromática y alta resolución

- PC Microcom con pantalla Samsung
- Impresora HP 1200c Desk Jet
- Cámara fotográfica Olympus
- Tabla de colores del ITC para Ilwis

METODOLOGÍA

Recopilación de la Información

La información cartográfica, tanto análoga como digital, fue recopilada en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Se evaluó la información, en lo referente a escala, año de elaboración y leyenda empleada para la clasificación de la cobertura y uso de la tierra.

Preprocesamiento

Las imágenes digitales fueron leídas con el software Erdas, de las cuales se extrajo la ventana de trabajo, que se exportó con la extensión .lan para importarse en Ilwis, para luego corregirse geométricamente la imagen de 1994 con referencia en la de 1988.

Trabajo de campo Con el propósito de establecer las variables a considerar en la detección de cambios a partir de los datos de las imágenes procesadas en el trabajo de campo, se realizaron observaciones de las diferentes coberturas recorriendo vías de acceso posible y fácil para cubrir gran parte del área de estudio (**Figuras 2,3 y 4**).

Tipos de cobertura

Mediante el análisis digital de las imágenes, la interpretación visual de las mismas, la interpretación de fotografías aéreas y visita de campo fue posible diferenciar en el área de estudio 15 subgrupos de cobertura y uso de la tierra (**Figuras 5, 6 y 7**). Adicionalmente se han separado complejos de coberturas, los cuales incluyen dos tipos de coberturas que por presentarse en una patrón intrincado o en unidades muy pequeñas, no es posible separarlas individualmente a la escala del levantamiento. (**López, 1998**).

Bosques naturales (BN)

Corresponden a relictos de bosques naturales en diferente grado de intervención. Están distribuidos en toda el área de estudio, siendo más importante su presencia en la zona norte del municipio. Gran parte de estos bosques están asociados a los drenajes naturales.

Bosque Plantado (BP)

Corresponde esta unidad a bosques de pinos y eucaliptos de diferentes edades, plantados con fines de conservación y/o recuperación de suelos. Excepto las plantaciones que corresponden a la reserva forestal propiedad del municipio ubicada en la zona norte, el resto de áreas con bosques plantados se ubican en la zona sur.

Arbustales (AR)

Corresponden a áreas ocupadas por vegetación arbustiva. Se encuentra esta unidad en todo el municipio. En la zona sur se presentan en asociación pequeñas áreas de pastos naturales.

Pastos naturales (PN)

Corresponden a áreas cubiertas de pastos naturales, dedicados a pastoreo extensivo y muy extensivo o sin uso. Se presentan con mayor frecuencia en la zona norte del municipio, generalmente localizados en relieves fuertemente inclinados con pendientes entre 50% y 75% y mayores.

Praderas (PR)

Son áreas con pastos naturalizados (kikuyo); dedicados a la ganadería extensiva. Se localizan principalmente en la zona norte del municipio.

Pastos Manejados (PM)

Comprenden pastos naturalizados (kikuyo, ray gras) dedicados a la ganadería semi-intensiva e intensiva, con buenas prácticas de manejo que incluyen fertilización, riego y rotación de potreros. Están localizados en el valle aluvial del río Chicamocha y en algunos de sus afluentes como

la quebrada Toibita y Quebrada Honda, así como en la zona del pantano de Vargas.

Cultivos Anuales (CA)

Corresponde esta unidad a áreas dedicadas en un gran porcentaje a actividades agrícolas, presentado inclusiones de zonas con pastos. De acuerdo al tipo de cultivos presentes se ha cartografiado dos subunidades, así:

Cultivos anuales (CA1): Se localizan en la zona norte del municipio, e incluyen los siguientes cultivos en su orden de importancia: papa, maíz, trigo, cebada. En asocio con el maíz o la papa suelen cultivar arveja y habas.

Cultivos anuales (CA2): Se localizan en la zona sur del municipio e incluyen los siguientes cultivos en su orden de importancia: trigo, maíz, cebada.

Áreas de explotación Minera (MI)

Se localizan en inmediaciones del área urbana del municipio. Corresponden a explotaciones de arcilla y carbón principalmente.

Canteras (CN)

Igualmente que el uso anterior se localizan en inmediaciones del área urbana y corresponden a explotaciones de materiales para la construcción.

Tierras erosionadas (TE)

Esta unidad se refiere a áreas afectadas por erosión hídrica en grado moderado y severo. En algunas de estas áreas se han plantado pinos o eucaliptos. Adicionalmente pueden presentar vegetación herbácea y arbustiva en menor escala.

Zona Urbana Construida (ZU)

Corresponde a la zona urbana construida. Se identificaron usos: residenciales, industriales y urbanos educacionales.

Cuerpos de Agua (LA)

Corresponde esta unidad al lago Sochagota.

Coberturas en Complejo:

Arbustales y Bosque Natural (ARBN)

Áreas cubiertas principalmente por arbustales con asocio de relictos de bosque natural, principalmente asociados a los drenajes naturales. Se localizan principalmente en el sector norte del municipio.

Arbustales y Bosque Plantado (ARBP)

Corresponden a áreas cubiertas principalmente por arbustales en asocio con pequeños sectores de bosques plantados. Se localizan hacia el sector sur del municipio.

Arbustales y Pastos naturales (ARPN)

Áreas cubiertas principalmente con arbustales en asocio con pastos naturales en menor escala.

Arbustales y Tierras erosionadas: (ARTE)

Áreas ocupadas por arbustales en asocio con áreas que presentan erosión hídrica severa.

Bosque natural y Arbustales (BNAR)

Corresponden a áreas ocupadas principalmente por bosque natural en asocio con arbustales en menor proporción.

Bosque Natural y Pastos naturales (BNPN)

Áreas cubiertas principalmente por bosques naturales, en asocio con pastos naturales en menor proporción.

Bosque plantado y Arbustales (BPAR)

Áreas cubiertas principalmente por bosques plantados en asocio con arbustales en menor proporción. Se localizan en el sector sur del municipio.

Pastos y Cultivos (PC)

Corresponden a áreas ocupadas principalmente por pastos naturalizados (kikuyo) en asocio con cultivos en menor proporción y dispersos. En la zona norte del municipio las especies cultivadas son en su orden de importancia: papa, maíz, trigo y cebada. En la zona sur: trigo, maíz, cebada.

Cultivos y Pastos (CP)

Corresponden a áreas dedicadas principalmente a actividades agrícolas en asocio con pastos naturalizados (Kikuyo) en menor proporción. En la zona norte del municipio las especies cultivadas son en su orden de importancia: papa, maíz, trigo y cebada. En la zona sur: trigo, maíz, cebada.

Procesamiento

Un esquema de la metodología empleada se presenta en la **Figura 8**.

El procedimiento empleado fue el siguiente:

- * Lectura de las imágenes originales, extracción de la ventana del área de trabajo con Erdas Imagine versión 8.3 en una estación Silicon Graphics. Se obtienen archivos .lan.
- * Conversión de archivos .lan a formatos mpd y mpi con Ilwis 1.41 en un PC.
- * Elaboración de composiciones de color con base en los factores de índice óptimo (OIF) para cada una de las fechas.
- * Rectificación geométrica de las bandas de 1994 tomando como referencia las del año de 1988.
- * Cálculo de estadísticas unibanda de cada escena para determinar la necesidad o no de hacer correcciones radiométricas. En este caso no se hace necesario homogenizar los Niveles Digitales (ND) dado que las diferencias son mínimas.
- * Cálculo de estadísticas multibanda multitemporal con cuatro bandas de cada una de las fechas en estudio. * Elaboración de composición de color con bandas de ambas fechas. * Cálculo de índices de vegetación modificados

Técnicas de análisis de cambios:

- * Elaboración de composición multitemporal
- * Diferencia entre imágenes y segmentación por intervalos
- * Análisis de componentes principales.

RESULTADOS Y ANALISIS

Para emprender estudios multitemporales con imágenes de satélite es preciso tener cobertura periódica, las mismas bandas espectrales, condiciones de toma (altura, hora, ángulo de visión) similares y los demás requerimientos ya descritos.

Estas pautas permitieron elegir las escenas de enero 11 de 1988 y 5 de diciembre de 1994 del sensor Landsat TM con referencia Path 7, Row 56 en la cual se encuentra el área de estudio seleccionada (municipio de Paipa). Así el objetivo de detectar los cambios producidos entre las dos fechas, hace que la frecuencia sea multianual.

Extraídas las ventanas que cubren el área de estudio se procedió a formar un sólo archivo con las 12 bandas (6 de cada una de las fechas, dado que se excluyó la termal de cada escena). Al calcular las estadísticas multibanda se notó que había problemas entre las bandas de la primera y segunda fechas. Se examinó el error y se evidenció que el campo instantáneo de vista era diferente, razón por la cual se realizó una corrección geométrica imagen - imagen. Para el remuestreo de los niveles digitales en la imagen de 1994 se empleó la técnica del vecino más cercano, dado que es la que menos modifica la radiometría de la imagen.

En la **Fotografía 1** se observa una composición de color 453 (RGB) que está entre las de mayor factor de índice óptimo (OIF) de cada escena (**Tablas 1 y 2**). En la **Fotografía 2** se presenta la imagen de 1994 corregida, geoméricamente, se puede notar una pérdida de información en las partes superior izquierda e inferior derecha debido al ajuste hecho a la ventana.

Debido a que la banda 6 es emisiva y de resolución espacial diferente a las demás y a que la banda 7 de 1994 presentó problemas en la radiometría (poco contraste, lo cual no es usual para esta banda) se descartaron para el estudio multianual. De la misma manera, analizando las correlaciones existentes entre las tres bandas del visible y la varianza de cada una de ellas (**Tablas**

1 y 2) se eliminaron las segundas bandas para quedar en total con ocho bandas (las: TM1, TM3, TM4, TM5 de cada uno de los períodos en estudio).

Con estas ocho bandas se generó un archivo multitemporal correspondiente a las dos fechas

(Tabla 3). La convención para interpretar los resultados es B88i es la banda i del año 1988 y B94i para la banda i del año 1994, $i = 1,3,4,5$. Además se reenumeran de uno a ocho dichas bandas en el orden dado y estos son los identificadores en el factor de índice óptimo.

TABLA 1. Estadísticas multibanda para la escena de 1988

Matriz de Varianza - Covarianza

TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
112.7					
72.1	51.9				
102.7	74.8	116.6			
117.6	95.6	128.0	360.3		
231.8	184.4	286.2	404.4	920.9	
112.5	85.8	136.3	146.3	411.8	202.5

Matriz de Correlación

TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	
1						
0.943	1					
0.896	0.961	1				
0.583	0.699	0.624	1			
0.719	0.843	0.874	0.702	1		
0.745	0.837	0.887	0.542	0.954	1	
59.55	25.81	27.36	60.98	74.12	28.26	Media Desv.
10.62	7.21	10.80	18.98	30.35	14.23	Est.

Factor de índice óptimo (OIF)

COMBINACION	VALOR
145	29.897
456	28.924
345	27.328
245	25.191
146	23.440
156	22.830
346	21.435
135	20.796
123	10.220

TABLA 2. Estadísticas multibanda para la escena de 1994

Matriz de Varianza - Covarianza

TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
84.0					
53.3	38.2				
66.3	46.1	62.0			
101.6	88.8	79.2	523.5		
141.4	111.7	143.4	326.8	502.1	
31.0	21.6	31.3	26.7	79.9	17.7

Matriz de Correlación

TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7		
1							
0.941	1						
0.920	0.947	1					
0.484	0.628	0.440	1				
0.689	0.806	0.813	0.637	1			
0.805	0.832	0.946	0.277	0.848	1		
50.68	2358	23.07	63.24	61.54	9.18	Desv.	Estándar
9.16	6.18	7.87	22.88	22.41	4.20	Media	

Factor de índice óptimo (OIF)

COMBINACION	VALOR
145	30.072
345	28.115
456	28.073
245	24.848
145	23.138
134	21.643
345	21.012
246	19.156
.	
.	
.	
123	8.270
236	6.700

TABLA 3. Estadísticas multibanda para el archivo multitemporal

Matriz de Varianza - Covarianza

881	B883	B884	B885	B941	B943	B944	B945
112.7	102.7	117.6	231.8	52.2	45.2	118.0	131.9
	116.6	128.0	286.2	54.6	51.6	143.8	165.4
		360.3	404.4	69.1	57.1	361.0	250.5
			920.9	140.1	142.1	468.8	556.6
				84.0	66.3	101.6	141.4
					62.0	79.2	143.4
						523.5	326.8
							502.1

Matriz de Correlación

B881	B883	B884	B885	B941	B943	B944	B945
1							
0.896	1						
0.583	0.624	1					
0.719	0.874	0.702	1				
0.536	0.552	0.397	0.504	1			
0.541	0.607	0.382	0.595	0.920	1		
0.486	0.582	0.831	0.675	0.484	0.440	1	
0.555	0.683	0.589	0.819	0.689	0.813	0.637	1

Factor de índice óptimo (OIF)

COMBINACION	VALOR
457	37.507
345	36.484
467	35.723
478	35.488
345	34.058
348	34.004
147	33.951
178	33.318
347	32.693
378	31.234

De acuerdo con el mayor valor del OIF obtenido en la **Tabla 3** se hizo la composición de color con las bandas 4, 5 y 7 así: B944, B885, B941 (RGB) que involucra bandas de ambas fechas (**Fotografía 3**), en la cual se puede apreciar la zona de páramo en tonos aguamarina en la parte superior derecha, el lago Sochagota en color azul rey lo mismo que algunas sombras, las áreas de pastos manejados en tonalidades moradas. Es de observarse que las nubes que hay en la escena de 1994 en esta composición se desvanecen completamente. Los bosques naturales en la parte central y superior de la imagen aparecen en tono morado y los bosques plantados en la misma tonalidad.

Para estudiar cada uno de los algoritmos tratados para la detección de cambios en este proyecto se calcularon los índices de vegetación para cada una de las fechas por separado, teniendo en cuenta que deben emplearse las mismas ban-

das. Se probó con el índice de vegetación de diferencia normalizada el cual se confrontó con el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo, escala 1:25.000 obteniéndose pequeñas diferencias con la escena de 1994, particularmente en el área de pastos manejados y bosques naturales, en razón a la anterior se aplicó el modelo teórico propuesto por **Guyot y Gu (1994)** quienes plantean que el cálculo de índices de vegetación para imágenes Landsat a partir de ND subestiman entre 5% y 20% el valor calculado con reflectividades; en consecuencia proponen una corrección que haga equivalente el cálculo con ND o reflectividades:

$$IVDN = \frac{ND_{IRC} - 0.801 * N_{DR}}{ND_{IRC} + 0.801 * N_{DR}}$$

Al analizar estos nuevos índices se encontró que las diferencias antes mencionadas para los índices normalizados se disminuyeron ostensiblemente.

Como los valores varían entre -1 y 1 y el software empleado no permite visualizar sino valores enteros positivos en el rango de 0 a 255, debe escalarse multiplicando por 127 el cociente y adicionar 128 para tal fin. A los productos obtenidos se les aplica la Tabla de Color del sistema Pericolor para poder hacer una discriminación más atinada (**Fotografías 4 y 5**). Así, a mayor contraste entre las bandas del infrarojo y rojo mayor vigor vegetal presenta la cubierta (tonos rojos, amarillos y verdes). Valores intermedios indican una vegetación menos vigorosa (tonos verde claro), hasta llegar a las cubiertas sin vegetación (tonos azules y negro) que ofrecen los valores más bajos.

Una vez obtenidos estos índices de vegetación se realizó una composición multitemporal en color, aplicando el del año 1988 al cañón rojo y el de 1994 al cañón verde y se asignó al del cañón azul una banda ficticia vacía (llamada banda 0). La imagen de cambio se puede apreciar en la **Fotografía 6**, se observa que las áreas con cierta estabilidad entre fechas aparecen en amarillo (= rojo + verde), en rojo las áreas que han reducido sus niveles digitales, es decir las zonas que han perdido vigor y en verde áreas que lo han ganado o aumentado. Para observar con mayor detalle se tomó una ventana (**Fotografía 7**) en la cual se evidenciaron parcelas estables, con

pérdida y con ganancia en vigor vegetal (pastos manejados con fines de ganadería lechera).

Posteriormente se abordó la técnica denominada: diferencia entre imágenes, que consiste simplemente en restar el índice de vegetación del año 1988 al obtenido para 1994. Para evitar valores negativos se añadió una constante. En total:

$$NDC = IVN_{1994} - IVN_{1988} + 127$$

Donde NDC, IVN_{1994} e IVN_{1988} corresponden al resultado del cambio y a los niveles digitales de los índices de vegetación de segundo y primer período respectivamente.

En la imagen de cambios obtenida (**Fotografía 8**), los tonos oscuros representan zonas que han reducido su vigor vegetal, los intermedios para aquellas que han permanecido estables y los más claros para las áreas que lo han ganado o aumentado. En el histograma de este producto se observa que las mayores frecuencias se presentan en las zonas estables (parte media del histograma) y las áreas con pérdida o ganancia ocupan las colas a lado y lado de la distribución.

Debido a la dificultad de discriminar términos tan subjetivos, como oscuro, intermedio y claro y por la necesidad de comparar y contrastar los métodos se aplicó una segmentación por intervalos (**Tabla 4**) a la imagen de cambios.

TABLA 4. Segmentación por intervalos para la imagen de cambios

SUBINTERVALO	MINIMO	MAXIMO	COLOR	INTERPRETACION
1	1	115	Rojo	Pérdida
2	116	155	Amarillo	Estabilidad
3	156	255	Verde	Ganancia

Así, con esta asignación de colores se busca, con el fin de comparar, un nuevo producto (**Fotografía 9**) con características similares de interpretación a la composición multitemporal obtenida anteriormente (**Fotografía 6**). Esto es: en amarillo las áreas con cierta estabilidad, en rojo áreas que han perdido cobertura ó vigor vegetal y en verde las zonas donde se ha aumentado o ganado.

Por último, con el archivo multitemporal con las bandas de las dos fechas (**Tabla 3**) se aplica el análisis de componentes principales. En la **Tabla 5** aparecen los vectores propios correspondientes a las ocho bandas de las dos imágenes del área de estudio (cuatro de 1988 y cuatro de 1994).

TABLA 5. Matriz de vectores propios

CP'S	B881	B883	B884	B885	B941	B943	B944	B945	% VAR	VAR.ACU
CP1	0.165	0.203	0.351	0.636	0.109	0.107	0.435	0.438	75.94	75.94
CP2	-0.104	-0.124	0.488	-0.330	-0.244	-0.198	0.641	0.343	10.72	86.66
CP3	-0.177	-0.207	-0.304	-0.475	0.243	0.176	0.389	0.606	6.00	92.66
CP4	0.360	0.340	0.546	-0.489	0.054	0.043	-0.349	0.302	2.43	95.09
CP5	0.541	0.544	-0.478	-0.138	-0.052	-0.042	0.348	-0.196	2.26	97.35
CP6	0.008	0.006	0.138	-0.038	0.691	0.549	0.074	-0.441	2.06	99.41
CP7	0.713	-0.700	0	0.038	0	0	0	0	0.39	99.80
CP8	-0.005	-0.006	-0.009	-0.017	-0.622	0.783	0	0	0.20	100

Se observa que las cuatro primeras componentes contienen más del 95% del total de la varianza de la escena. Los dos primeros componentes indican cierta estabilidad entre fechas (los signos de las componentes de los vectores propios son iguales), mientras el 3°, 4°, 5° indican cambios en la escena. La primera componente (**Fotografía 10**) fue el equivalente al brillo total de la imagen, corresponde a una suma ponderada de las ocho bandas originales. La segunda componente (**Fotografía 11**) denotaría el verdor estable de la imagen, en otras palabras este componente está relacionado con la actividad vegetativa (lo cual se aprecia por el alto valor positivo en la banda 4). La tercera componente (**Fotografía 12**) es interesante, ya que cambian los signos de las cuatro bandas entre las dos épocas (en la primera fecha presenta valoración negativa en todas las bandas y positiva en las bandas de la segunda fecha), es por este cambio de signos que se aprecian las nubes y sombras que originalmente están en la imagen de 1994.

La quinta componente (**Fotografía 13**) muestra los cambios en la vegetación debido a los cambios de signos de las bandas entre las dos fechas (valor negativo en la banda 4 y positivos en las del visible en la primera fecha y al contrario en la segunda). En definitiva, esta componente está bastante relacionada con procesos de pérdida de vigor vegetal producidos en la zona en este período. También se observa en la parte central derecha valores altos correspondientes a áreas urbanas (Paipa y Duitama) y sus alrededores lo mismo que el Lago Sochagota debido a altos valores en las bandas del visible en la primera fecha y negativos tendientes a cero para la segunda época.

El resto de componentes reúnen apenas el 4.91% de la variabilidad total, con diferencias representativas de toda la imagen que se deben a variaciones atmosféricas y del sensor mismo.

CONCLUSIONES

- * Los métodos de detección de cambios empleados en este estudio permitieron observar y analizar cambios en el uso y cobertura de la tierra en el municipio de Paipa, mediante el uso de imágenes de dos fechas diferentes.
- * Al comparar los resultados de los índices normalizados y de Guyot y Gu (1994), este último ofreció resultados más ajustados a la leyenda del mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra que se elaboró a partir de la interpretación visual de fotografías aéreas, análisis visual y digital de imágenes y trabajo de campo.
- * El método de composiciones multitemporales resultó más ajustado a la realidad que el de diferencia entre imágenes, pues al compararse los resultados de cada método con el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra el primero estuvo mejor categorizado.
- * El análisis de componentes principales en la detección de cambios muestra tanto en las zonas comunes a ambas fechas como las áreas de cambio que se recogen en las componentes centrales e incluso muestra los problemas de bandeamiento que se evidencian de manera muy clara en las últimas componentes.
- * Se observó que al realizar composiciones de color que involucren bandas originales de di-

ferentes fechas, pueden llegar incluso a desaparecer la cobertura de nubes que estén presentes en la escena de una de las fechas debido a que las que carecen de ellas se asignan a los cañones de mayor peso en la visualización.

- * La técnica de elaborar composiciones multitemporales de color es sencilla y como ventaja adicional presenta la incorporación del conocimiento y criterio de análisis por parte del intérprete.
- * La técnica de diferencia de imágenes debe segmentarse por intervalos de cambio o no cambio y agregar color para obtener una interpretación más acertada y poder establecer comparaciones con otros métodos.
- * La corrección geométrica es importante en la detección de cambios, dado que se detectarían falsas transformaciones de cobertura por falta de ajuste entre las imágenes.
- * El área analizada es muy estable en el uso y cobertura del suelo entre estas dos fechas, alrededor del 75% no presenta cambios y en el restante 25% son cambios poco significativos (de menor a mayor vigor vegetal o viceversa).
- * El software ILWIS limita a sólo 8 bandas el análisis de componentes principales, sin embargo en esta oportunidad no fue un problema debido a que la banda 7 debió descartarse por anomalías que presentaba.

Por revisión de literatura:

- * La resolución temporal debe ser un criterio de mucho peso en los estudios de detección de cambios en donde se requiera información donde la frecuencia sea más importante que el detalle (seguimiento de catástrofes naturales).
- * La detección de cambios es un procedimiento muy apropiado para estudiar situaciones que presenten un gran impacto (incendios, inundaciones, quemas, etc, igualmente monitoreo y uso con fines de planificación).
- * Las imágenes de satélite ofrecen una gran alternativa para detectar perturbaciones y seguir

cambios de determinado fenómeno natural en el tiempo y el espacio.

RECOMENDACIONES

- * Con el fin de ir consolidando una metodología para el análisis de detección de cambios multitemporal, debe continuarse apoyando el proceso de investigación que complementa el presente proyecto. Se sugiere una imagen programada y obtener una imagen actual, reunir información histórica del área, hacer trabajos de campo antes y después de una clasificación digital, llevar a cabo radiometría de coberturas de la zona ojalá el día de la toma e involucrar al estudio imágenes de sensores activos que permitan mejorar la resolución espacial.
- * En la verificación de campo, emplear sistemas de posicionamiento global con el fin de precisar la ubicación espacial de aquellas clases que presentan algún grado de confusión espectral.
- * Comprender que la naturaleza de los patrones de cambio en el uso de la tierra a través del tiempo son respuesta a diversas fuerzas: económicas, sociales y ambientales, es esencial su conocimiento para facilitar una adecuada planeación, manejo y regulación del uso de los recursos terrestres.

BIBLIOGRAFIA

- BERG, A y GALLI, S. 1980.** Some significant results of a Remote Sensing experiment under European Conditions, International Journal of Remote Sensing, Vol 1. Pp. 3-9.
- COPPIN, P.R. y BAUER, M.E. 1994.** Processing of multitemporal Landsat TM Imagery to optimize extraction of forest cover change features, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, pp. 918-927.
- CHUVIECO, E. 1996.** Fundamentos de Teledetección Espacial, (3ª edición revisada), Ediciones Rialp S.A., Madrid.
- EASTMAN, J.R., McKENDRY, J y FULK, M. 1994.** UNITAR Exploration in GIS Techno-

logy, Vol I: Change time Series Analysis, Geneva, Switzerland.

GIRARD, CM. 1981. Grassland mapping using satellite multitemporal data, Matching Remote Sensing Technologies and their Applications, Remote Sensing Society, London, pp. 111-122.

GORDON, S.I. 1980. Utilizing Landsat Imagery to monitor land use change study in Ohio, Remote Sensing of Environment, Vol. 9, pp. 189-196.

GUYOT, G. Y GU, X.F. 1994. Effect of radiometric Corrections on NDVI determined from Spot - Hrv and Landsat-Tm data, Remote Sensing of Environment, Vol. 49, pp.169-180.

HORD, R.M. 1982. Digital Image Processing of Remotely Sensed Data, Academic Press, New York.

JENSEN, J.R. 1996. Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective, (2nd ed), Prentice Hall, Upper Saddle River N.J.

LO, C.P 1986. Applied Remote Sensing, Logman Scientific and Technical, New York.

LOPEZ, D. 1988. Mapa de Cobertura y uso de la tierra. Municipio de Paipa (Boyacá). Proyecto Paipa, IGAC.

MARTIN, L.R.G. 1989. Accuracy assessment of Landsat based visual Change detection methods applied to the rural - urban fringe, Pho-

grammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, pp. 209-215.

MERGERSON, J.W. 1981. Crop area estimates using ground gathered and Landsat data: A multitemporal approach, en Proc. 15th International Symposium Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, pp. 1211-1218.

MOUAT, D.A, MATTIN; G.G. y LANCASTER J. 1993. Remote Sensing Techniques in the analysis of change detection, Geocarto International, Vol. 8, pp. 39-50.

NELSON, R. Y GREBOWSKY, G. 1982. Evaluation of temporal registration of Landsat Scenes, International Journal of Remote Sensing, Vol. 3. Pp. 45-50.

SADER, S.A. y WINNE, JC. 1992. RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics, International Journal of Remote Sensing, Vol. 13. Pp. 3055-3067.

SCHRIEVER, J.R y CONGALTON, T.G. 1995. Evaluating seasonal variability as an aid to cover-type mapping from Landsat Tm data into Northeast, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 61, pp 321 - 327.

VIEDMA, O, SALAS, J y CHUVIECO, E. 1993. Evaluación de daños causados por el incendio de Buñol (Valencia) con imágenes TM. En: V Reunión científica de la Asociación Española de Teledetección, las Palmas de Gran Canaria.

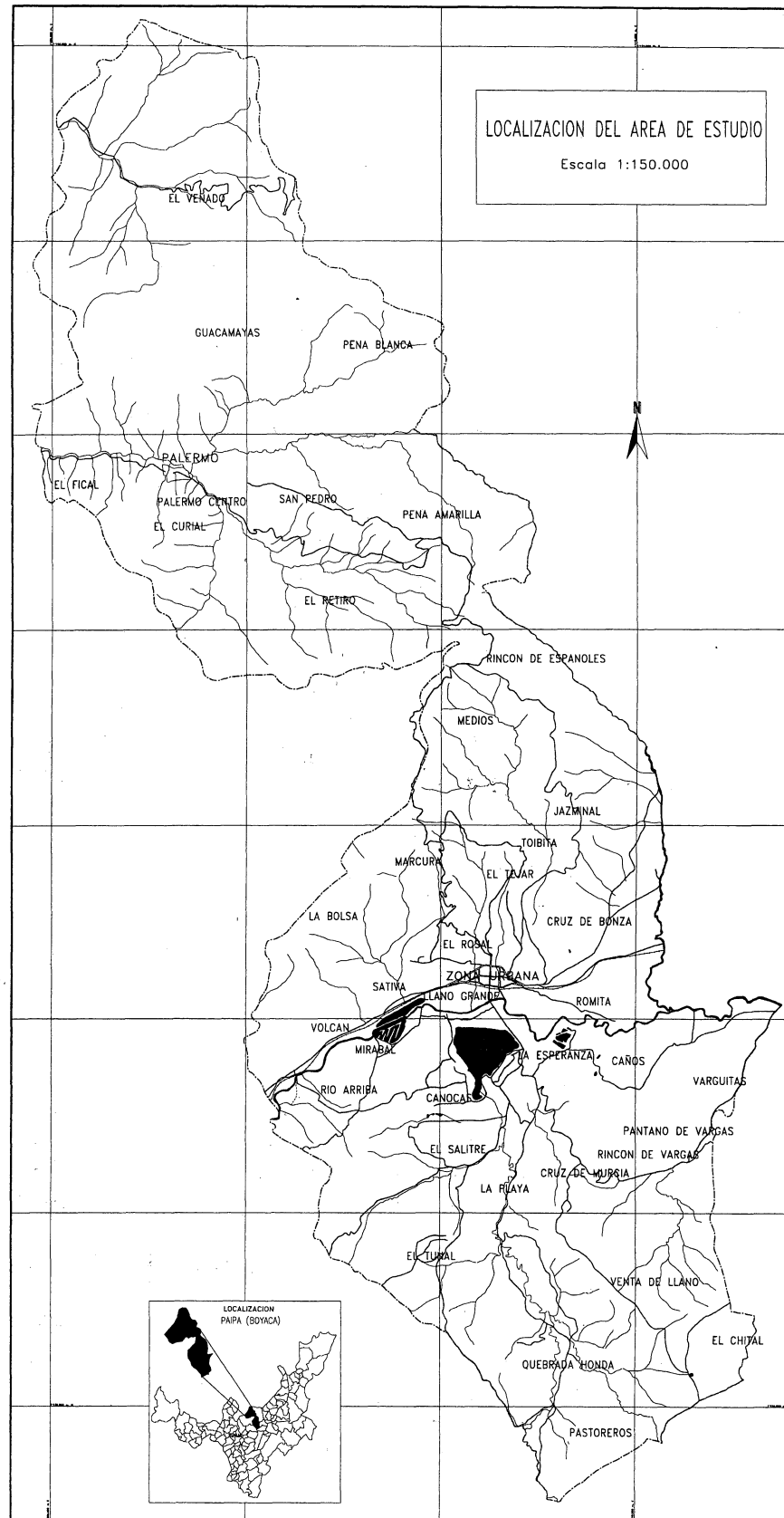


Figura No. 1 Localización área de estudio

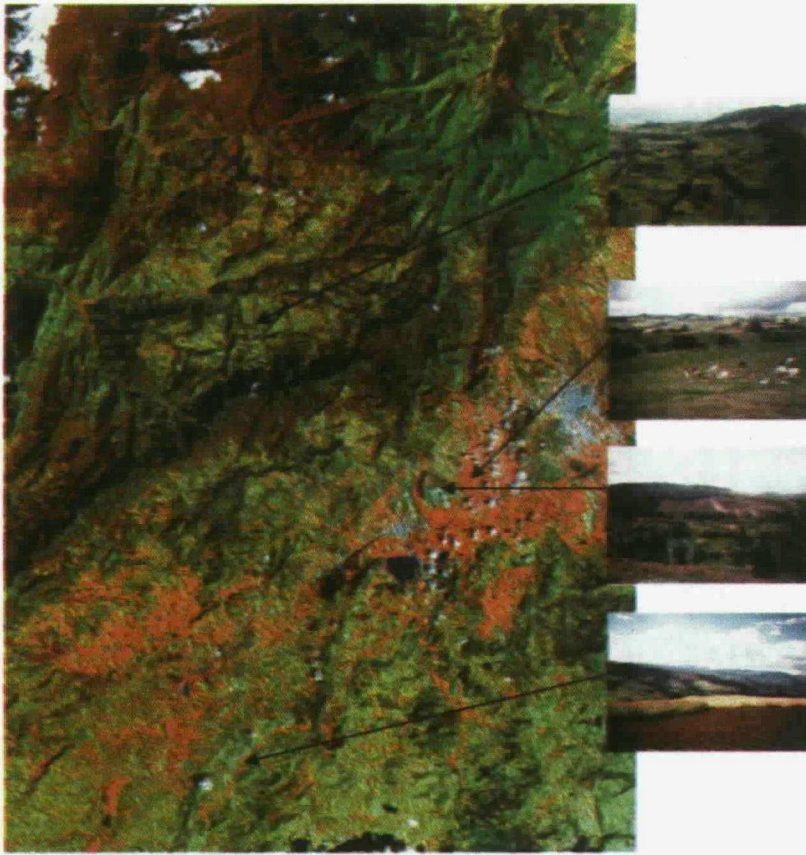


Figura 2.
Imagen Landsat TM 1994,
composición de color 453 (RGB)

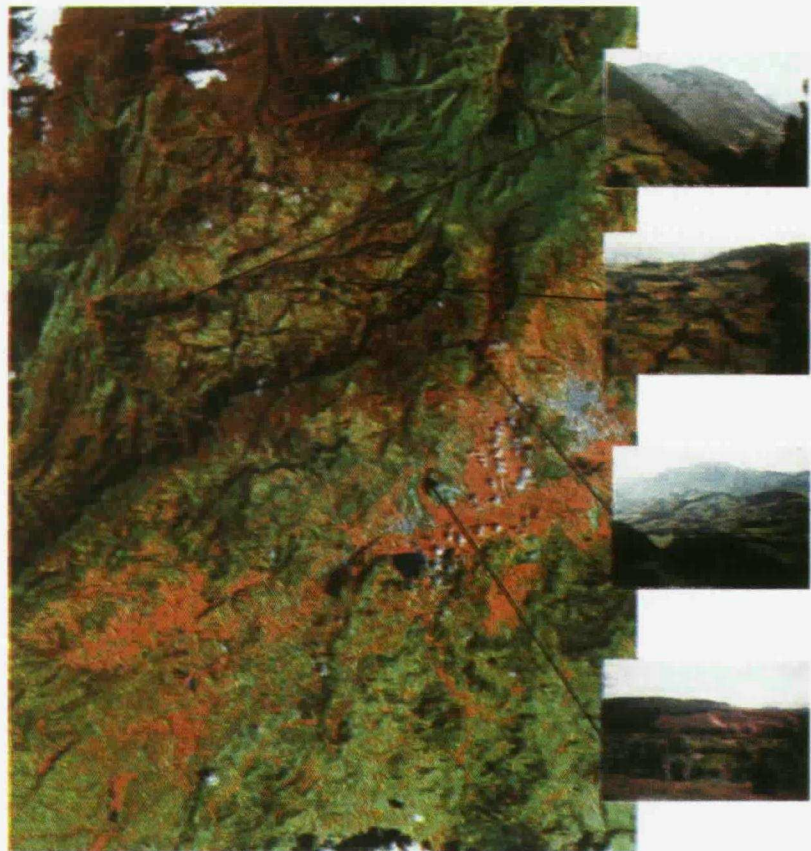


Figura 3.
Imagen Landsat TM 1994,
composición de color 453 (RGB)



Figura 4.
Imagen Landsat TM 1994,
composición de color 453 (RGB)

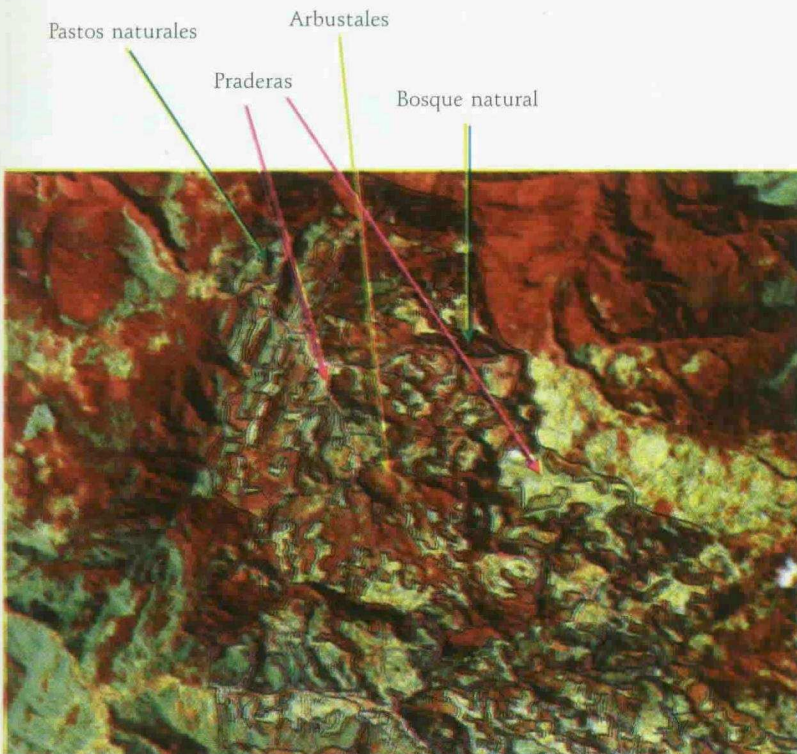


Figura 5.
Imagen Landsat TM 1994,
composición de color 453 (RGB). Sector Norte, Venado

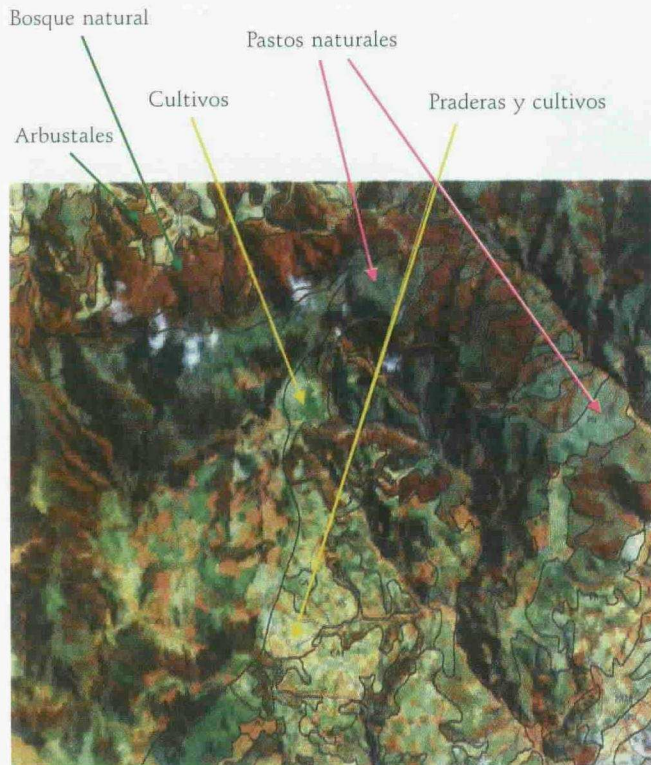


Figura 6. Imagen Landsat TM 1994, composición de color 453 (RGB)
Vereda Los Medios (López, 1998)

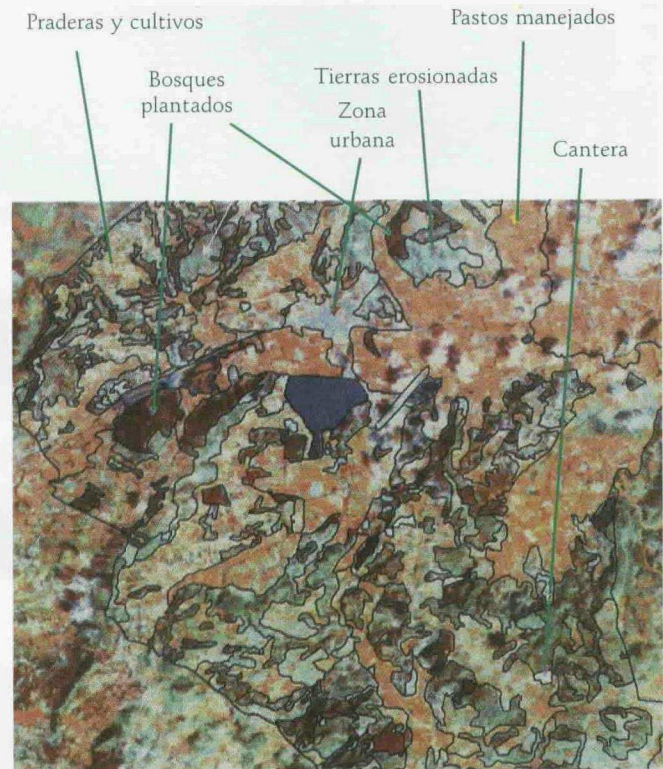


Figura 7. Imagen Landsat TM 1994, composición de color 453 (RGB).
Municipio de Paipa, sector centro-sur

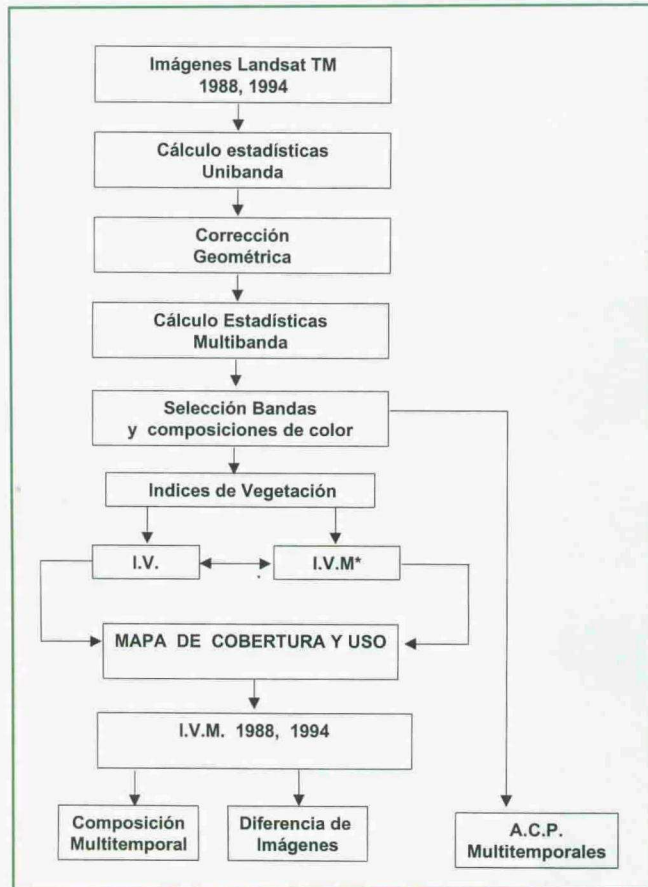


Figura 8. Esquema metodológico



Fotografía No. 1

Composición de color TM 453 Escena 1994



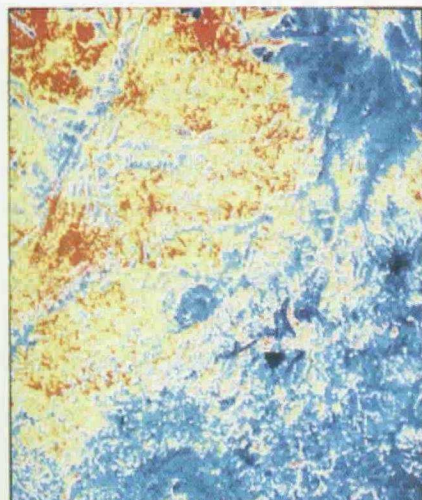
Fotografía No. 2

Escena 1994 con corrección geométrica



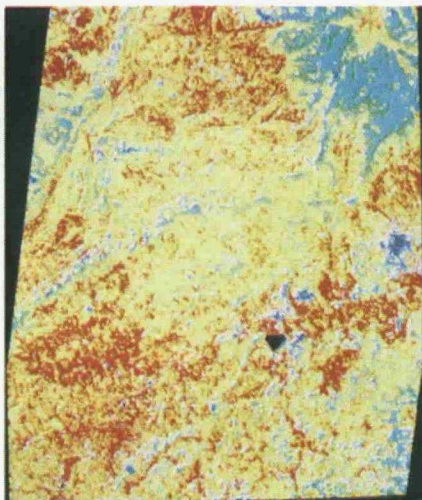
Fotografía No. 3

Composición de color TM 944-885-941 (RGB)



Fotografía No. 4

Índice de vegetación modificado / Escena 1994



Fotografía No. 5

Índice de vegetación modificado / Escena 1994



Fotografía No. 6

Composición multitemporal IVM 88-IVM94-(RGB)



Fotografía No. 7

Ventana
Composición
multitemporal



Fotografía No. 8

Diferencia entre imágenes
IVM)94-IVM88+127



Fotografía No. 9

Segmentación por intervalos para la imagen de cambios



Fotografía No. 10

Primera componente principal



Fotografía No. 11

Segunda componente principal



Fotografía No. 12

Tercera componente principal



Fotografía No. 13

Quinta componente principal