ARTÍCULO TÉCNICO

Tendencias de cambio en la cobertura vegetal y uso de la tierra mediante procesamiento digital de imágenes satelitales en La Mojana, Colombia

Gabriel Roveda[1],
Cristina Salvatierra[2],
Edgar Villaneda[1]
Elizabeth Aguilera[1]

ABSTRACT

Title: **Trends in Vegetation Cover and Land Use by Digital Processing of Satellite Images in La Mojana, Colombia**

La Mojana region is located in the North Coast of Colombia. It is part of the alluvial extensive plain, where the Cauca, San Jorge and Magdalena rivers flow together. The region is representative of the tropical humid forest, and is affected by annual flooding cycles. The predominant soils are inceptisols, entisols, oxisols and vertisols. Human activity has been reported since pre-Columbiam times, with the Zenu culture. This research was conducted to determine the changes in vegetation cover and land use by means of remote sensing techniques, comparing two Lansat images-Thematic Mapper (TM), both recorded in January, 1987 and 1996. Results show increment in areas of water bodies (12.6%) and Arbutus Prairie (23.7%), thus reducing the land occupied by Arbutus Vegetation (37.8%) and for agricultural crops (4.5%). Analysis of the distribution of land for some activities remain stable, as in the case of Marshes (83.1%); while others, like Secondary Forest, Herbaceous Prairie and Open Arbutus Vegetation decreased. The Open Arbutus Vegetation was the most affected, being replaced by Arbutus Prairie (41%) and by Marshes (22.7%). These changes in cover of vegetation and land use demonstrate the continuous deforestation process occurring in La Mojana, with an increase in the areas dedicated to cattle production, which represents the main agricultural activity in the region.

Key works: vegetation cover, land use, remote sensing, La Mojana - Colombia.

1. Programas Nacionales de Manejo Integrado de Suelos y Aguas, y de Agroecosistemas; CORPOICA, C.I. Tibaitatá, A.A. 240142-Las Palmas, Santa Fe de Bogotá, e-mail: groveda@corpoica.org.co;
2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC-CIAF), Carrera 30 Nº 48-51, Santa Fe de Bogotá, Colombia, e-mail: csalvati@igac.gov.co.

RESUMEN

La región de La Mojana está ubicada en el norte de Colombia, en la región Caribe, y forma parte de una gran llanura aluvial (513.464 ha) donde confluyen los ríos Cauca, San Jorge y Magdalena. Esta región está sujeta a ciclos de inundación, su clima es estacional y corresponde al Bosque Húmedo Tropical (Holdridge, 1982). Presenta gran diversidad de suelos (Inceptisoles, Entisoles, Oxisoles y Vertisoles) y ha sido intervenida desde la época Precolombina (Cultura Zenú). El propósito de esta investigación fue determinar las tendencias de cambio y la distribución de la cobertura vegetal y el uso de la tierra, mediante técnicas de teledetección y la comparación de dos imágenes satelitales (Landsat-Mapeador Temático, TM) tomadas en los meses de enero de 1987 y 1996. Los resultados obtenidos muestran un incremento en los cuerpos de agua (12.6%) y las Praderas Arbustivas (23.7%) del área de trabajo, y una reducción en la superficie ocupada por la Vegetación Arbustiva (37.8%) y las tierras agropecuarias (4.5%). Al analizar la distribución porcentual y localización de las coberturas entre 1987 y 1996, algunas de las categorías se mantuvieron estables, tal como ocurrió con las ciénagas (83.1%); mientras que otras, como el Bosque Secundario, las Praderas Herbáceas y la Vegetación Arbustiva Abierta, modificaron su distribución y fueron reemplazadas por otras coberturas. La Vegetación Arbustiva Abierta fue la que más cambios mostró en el período, siendo reemplazada por Praderas Arbustivas (41.0%) y ciénagas (22.7%). Estos cambios en la cobertura y uso de la tierra ratifican los procesos de deforestación y la dedicación de extensiones mayores de tierra a la ganadería, principal actividad agropecuaria de la región.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito mundial, las técnicas de teledetección han sido utilizadas para la identificación de cambios en la cobertura y el uso de la tierra; esta valiosa tecnología sirve para el monitoreo de fenómenos naturales u otras modificaciones que experimenta una región, como consecuencia de la intervención del hombre (Muchoney and Haack, 1994; Chuvieco, 1990 y 1996; Lambin, 1996).

Los estudios de análisis multitemporal de la cobertura vegetal y el uso de la tierra, a partir de técnicas de teledetección, son de gran utilidad porque permiten acelerar los estudios de caracterización regional y contribuyen a establecer bases para la planeación regional y la definición de prioridades en la investigación (Carlson and Rubingh, 1979; Byrne *et al.*, 1980; Stow *et al.*, 1980; Jensen and Toll, 1982; Conese and Maselli, 1991).

En Colombia son escasas las investigaciones que han utilizado imágenes de satélite para indagar la dinámica de la cobertura vegetal y el uso de la tierra; algunos corresponden a estudios de monitoreo en zonas de colonización (Guaviare), parques naturales (Paramillo) y zonas agrícolas de los departamentos del Valle del Cauca y Cundinamarca, y la cuenca del río Sinú (López, 1990; Couillaud y Forero, 1991; Gónima *et al.*, 1991; Sionneau, 1991; González, 1995; Andrade y otros, 1996).

Los principales usos de la tierra reportados en la región de La Mojana se relacionan con explotaciones ganaderas extensivas dedicadas a la cría, levante y ceba de hatos vacunos (Rosero y Gutiérrez, 1996). También con el cultivo de arroz mecanizado, arroz secano manual, sorgo, maíz tecnificado y tradicional, yuca, plátano, caña panelera, patilla, coco y ahuyama (López y otros, 1997). Otras especies de relativa importancia en la región son: ñame, ajonjolí, fríjol,

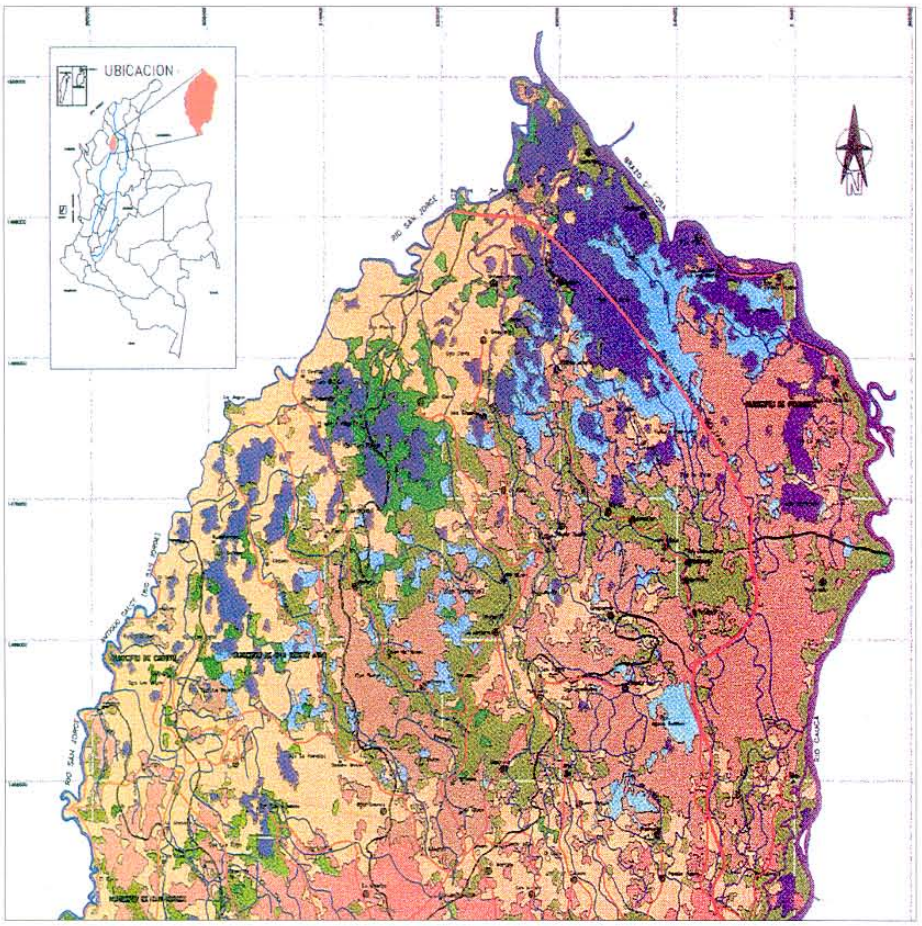

Figura 1. Mapa de cobertura y uso de la tierra, enero 1987.

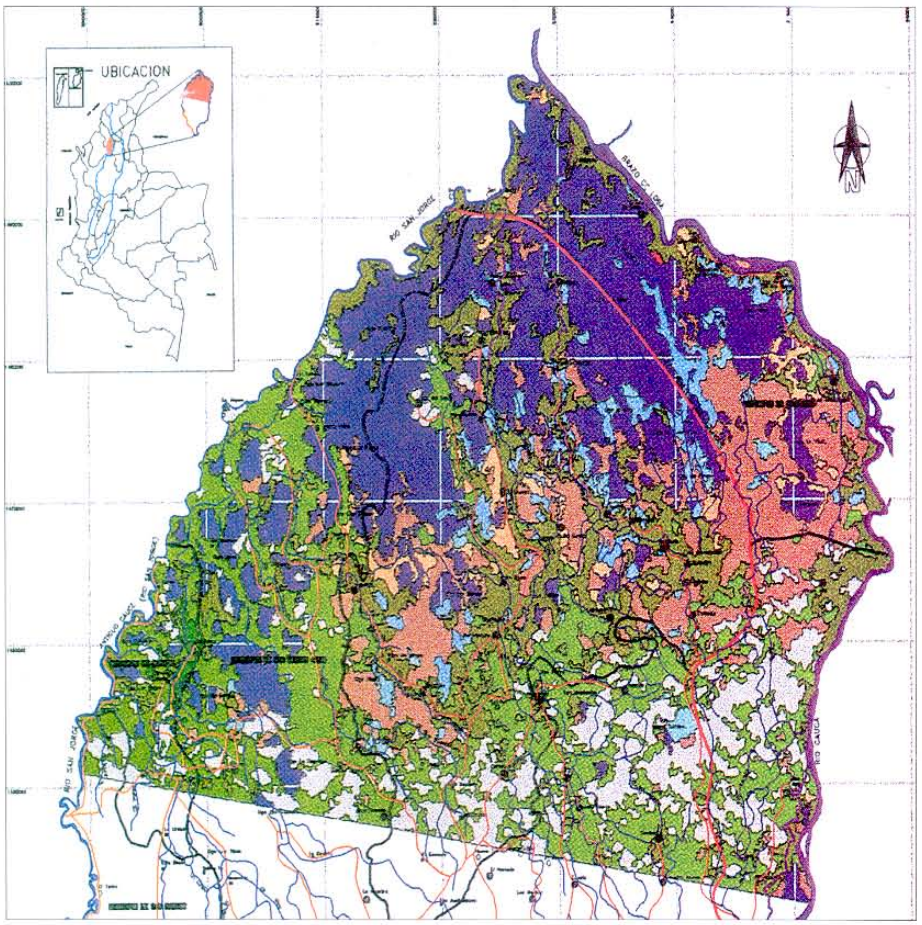

Figura 2. Mapa de cobertura y uso de la tierra, enero 1996.

NIVEL I	NIVEL II	CARACTERISTICAS	PRINCIPALES ESPECIES POR FRECUENCIA	COLOR
CUERPOS DE AGUA	CIENAGAS	Areas cubiertas con aguas de origen natural (ciénagas, etc.) con distintos grados de sedimentación.		
VEGETACION DE HUMEDAL	ANTIGUA	Asociación vegetal hidrofila formada por especies acuaticas (arraigadas emergentes) en contacto con el agua y el suelo	*Coccoloba obovata (Mangle)* *Thalia geniculata (Platanillo)* *Mimossa pigra (Zarza)* *Cyperus luzulae (Cortadera)*	
	RECIENTE	Asociación vegetal hidrofila formada por especies acuaticas (sumergidas y flotantes), arbustivas y arboreas.	*Eichornia crassipes (Taruya)* *Pistia stratiodes (Lechuga de agua)* *Ipomoea congesta (Batatilla)* *Panicum dilatatum (Gramalote)* *Coccoloba sp. (Uvero)*	
VEGETACION HERBACEA	PRADERAS HERBACEAS	Areas con dominio de especies graminoides (naturales o naturalizadas), con una cobertura igual o mayor del 75% de la superficie, dedicadas a la ganaderia extensiva en época de verano.	*Sesvania exaltata (Hierba de Chavarri)* *Sida acuta (Escobilla)* *Cyperus luzulae (Cortadera)* *Portulaca oleracea (Verdolaga)*	
	PRADERAS ARBUSTIVAS	Areas con dominio de especies graminoides (naturales o naturalizadas), con una cobertura del 51 al 75% de la superficie,entremezclada con especies arbustivas y algunas especies arboreas, dedicadas a la ganaderia extensiva.	*Portulaca oleracea (Verdolaga)* *Cassia grandis (Cana fistula)* *Sabal mauritiaeformes (Palma amarga)*	
VEGETACION ARBUSTIVA	ABIERTA	Fanerofitas leñosas encespedantes con alturas de 0.5 a 5 m., ramificadas desde la base, con una cobertura del 26 - 50 % de la superficie	*Sabal mauritiaeformes (Palma amarga)* *Sapium sp. (Finigue)* *Spondias monbin (Hobo)*	
	MEDIANAMENTE DENSA	Fanerofitas leñosas encespedantes con alturas de 0.5 a 5 m., ramificadas desde la base, con una cobertura del 51-75de la superficie	*Bactris minor (Palmalata)* *Cassia reticulata (Martin Galvis)* *Mimosa pigra (Zarza)* *Crataeva tapia (Limoncillo)*	
VEGETACION ARBOREA	BOSQUE NATURAL	Comunidad vegetal con dominancia de elementos arboreos con alturas mayores de 5 m. y una cobertura del 51 - 75% de la superficie.	*Albizzia saman (Campano)* *Ficus magdalenica (Mata palo)* *Phyllanthus sp. (Pimiento)* *Tabebuia roseae (Roble rosado)*	
TIERRAS AGROPECUARIAS	CON ENFASIS PECUARIO	Areas con predominio de pastos naturales o naturalizados con poco manejo, que cubren alrededor del 51% del area con inclusiones de cultivos de pancoger y pequeñas areas cubiertas con vegetación arbustiva, Presumiblemente son areas destinadas a la ganaderia extensiva	*Senna tora (Bicho)* *Cyperus luzulae (Cortadera)* *Cynodon dactilon (Pasto argentino)* *Paspalum sp. (Liendre de puerco)* *Mussa paradisiaca (Platano)* *Zea mays (Maiz)*	
	MISCELANEO	Complejo conformado principalmente por especies herbáceas mezclada con aproximadamente el 50% de tierras agropecurias, ubicadas principalmente a lo largo del caño San Matias entre otros con asociación de vegetación arbustiva y arborea	*Senna tora (Bicho)* *Mussa paradisiaca (Platano)* *Zea mays (Maiz)* *Sesvania exaltata (Hierba de Chavarri)* *Albizzia saman (Campano)* *Ficus magdalenica (Mata palo)*	
	CON ENFASIS AGRICOLA	Areas cubiertas con cultivos agricolas 26-50% de caracter comercial, transitorios y semipermanentes, con una cobertura igual o superior al 51% de la superficie, entremezclada con otros tipos de coberturas (pastos, arbustos, arboles, etc)	*Carica papaya (Papaya)* *Citrus Sp. (Citricos)* *Manihot dulce (Yuca)* *Phasseolus sp. (Frijol caupi)* *Oriza sativa (arroz)* *Zea mays (Maiz)*	
TIERRAS ANEGADAS		Areas con un alto nivel de encharcamiento, con probable cobertura de especies herbaceas y/o arbustivas		
NO IDENTIFICADO	NUBES, SOMBRAS Y OTROS	Areas con cobertura exclusiva de nubes, sombras y otros elementos dificiles de identificar.		

Figura 3. Leyenda general de cobertura de la tierra en la región de La Mojana Colombia.

cacao, verduras y frutales como el mango (Rosero y Gutiérrez, 1996).

La región de La Mojana se ve afectada por períodos frecuentes de inundación, los cuales originan cambios contínuos en la distribución y características de cobertura y uso de la tierra. El objetivo del trabajo consistió en analizar los cambios en la dinámica de la cobertura y uso de la tierra en dicha región, durante el período comprendido entre enero de 1987 y enero de 1996, utilizando la tecnología de procesamiento digital de imágenes Landsat (TM).

Materiales y métodos

El estudio se realizó con base en dos imágenes de satélite (Landsat-Mapeador Temático, TM) tomadas en los meses de enero de 1987 y 1996 (path 9, row 54, 7 bandas, formato BSQ, cuadrante II). Para el procesamiento digital se usó el software ERDAS IMAGINE® (versión 8.2), operado bajo la plataforma Silicon Graphics®, y con el sistema operativo IRIX® (versión 5.3). Los procesos iniciales de edición y diseño de las coberturas topológicas se realizaron en AUTOCAD® y ARCAD®, para su posterior utilización en ARCVIEW® (versión 3.0). El Sistema de Información Geográfica usado fue ARC-INFO® (versión 7.0). La información secundaria provino de cartografía básica (IGAC y DMA) e información de campo (López y otros, 1997; Terán y otros, 1996).

El modelo metodológico empleado integra las técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélite y el análisis espacial de la información temática georreferenciada, a través de un Sistema de Información Geográfica. Los procesos desarrollados fueron los siguientes:

Procesamiento digital de imágenes

Inicialmente se seleccionó una ventana de trabajo, el cuadrante II de las imágenes Landsat-TM, a la cual se aplicaron algoritmos para establecer diversos tipos de corrección (geométrica y radiométrica), así como mejoramiento (espacial y espectral) de las imágenes, a fin de homogeneizar las condiciones del estudio; éstas se describen a continuación.

La *corrección geométrica* utilizada corresponde al sistema de proyección Transverse Mercator, de la cual se obtuvo una imagen georreferenciada con un Error Medio Cuadrático de 0.8, valor que se considera aceptable para la zona.

La *corrección radiométrica* del fenómeno Mojana (bruma) se hizo mediante un algoritmo de corrección atmosférica denominado HAZE, el cual no ofreció los resultados esperados debido a que cubría todas las clases espectrales ubicadas bajo la zona de influencia de las nubes; por esta razón se utilizó la imagen en su formato original. La variación en intensidad de los pixeles, derivada de la topografía del terreno, fue insignificante y no se detectaron errores por mal funcionamiento de los sensores del satélite.

El *mejoramiento espacial* consistió en la aplicación del algoritmo Convolution Filtering (3 x 3 edge enhancement), utilizado para optimizar la visualización de las categorías temáticas a discriminar en la clasificación. Adicionalmente, se evaluaron los Histogramas de Ecualización (Erdas Imagine, 1993).

El *mejoramiento espectral* de las imágenes procesadas se realizó por el método de Análisis de Componentes Principales (ACP), que permite comprimir y sintetizar las bandas originales, y generar nuevas bandas de salida: de las 7 bandas originales se generaron 3 componentes principales. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios debido a que algunas clases espectrales quedaron enmascaradas, lo cual interfirió la identificación de las categorías temáticas específicas. Por esta razón, la clasificación definitiva se hizo sobre las bandas originales.

La *clasificación digital* de las imágenes fue de carácter mixto (supervisada y no supervisada); para efectuarla se siguió una secuencia de cuatro fases:

- *Fase de entrenamiento.* La definición digital de las categorías o de las imágenes se inició con una clasificación no supervisada, donde se seleccionaron 12 clases. Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada sobre las bandas originales y de allí se seleccionaron 13 clases, 7 de las cuales provenían de la clasificación no supervisada. Sin embargo, no todas las categorías se identificaron en ambas imágenes.
- *Fase de asignación.* A partir de la fase de entrenamiento, se realizó una agrupación de los pixeles de la imagen por categorías. El criterio empleado para definir los límites entre clases fue el de "máxima verosimilitud", en virtud del cual, el pixel se asigna a aquella clase que posea una mayor probabilidad de pertenencia.
- *Fase de agrupación y vectorización.* Con el propósito de minimizar el número de polígonos, se eliminaron las unidades menores de 25 hectáreas. Las imágenes clasificadas y recodificadas fueron convertidas de formato raster a formato vector, a través de un proceso automatizado. Posteriormente, las coberturas temáticas fueron procesadas en Autocad-Arcad, a fin de lograr ajustes en la delimitación del área de trabajo de los mapas temáticos y generar nuevos mapas de salida.

Elaboración del mapa final

Para la producción definitiva del mapa de 1996, se realizó una comprobación estratificada de campo, con énfasis en aquellas unidades cartográficas en las cuales la respuesta espectral de las clases no permitió su completa identificación, y con menor detalle en aquellas unidades que no presentaron confusión espectral. La colecta de información se hizo mediante la identificación visual de la cobertura y uso de la tierra a lo largo de los transectos y sobre parcelas de muestreo. El mapa de 1987 no tuvo comprobación de campo, y los ajustes a la clasificación se hicieron con base en la información colectada para el mapa de 1996 (Figuras 1 y 2).

Para el ajuste de la clasificación se asignaron nuevas áreas de entrenamiento a las categorías que presentaban confusión espectral, mediante la técnica de clasificación supervisada. Posteriormente, se procedió a la aplicación de filtros de generalización y a la realización de una nueva vectorización. La edición final de la cartografía temática se hizo de acuerdo con las normas internacionales de color y achurado para las distintas clases de cobertura y uso de la tierra.

Elaboración de la leyenda

El nivel de levantamiento de la cartografía temática final fue de reconocimiento (escala 1:100.000), de acuerdo con lo propuesto por Vargas (1991). La leyenda de los mapas combina criterios de cobertura vegetal y uso de la tierra, y responde a las necesidades del proyecto global que actualmente se realiza en la región de La Mojana. La leyenda está conformada por dos niveles jerárquicos e incluye la descripción de las principales características de cada una de las categorías representadas en los mapas, como son el tipo y la proporción de cada cobertura y uso de la tierra. (Figura 3). Además, informa sobre algunas de las principales especies vegetales encontradas durante el trabajo de campo y el color específico que se asignó a cada categoría.

Análisis estadístico y uso del Sistema de Información Geográfica (SIG)

Se calcularon los valores mínimos y los promedios de la Matriz de Separabilidad para cada imagen. Esta matriz indica los límites entre clases, con el criterio de máxima verosimilitud, en donde el pixel se asigna a aquella clase con la que posee mayor

Tabla 1. Niveles de reflexión en las bandas 4, 5 y 3 de las imágenes Landsat

CATEGORíAS	Bandas	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
CIÉNAGAS	4	10,0	16,0	11,7	0,6
	5	1,0	8,0	4,3	1,0
	3	26,0	31,0	28,8	0,7
HUMEDAL ANTIGUO	4	35,0	68,0	52,6	3,9
	5	32,0	69,0	53,2	6,2
	3	17,0	28,0	22,5	2,5
HUMEDAL RECIENTE	4	19,0	64,0	43,0	8,2
	5	23,0	69,0	53,5	7,9
	3	15,0	32,0	22,6	2,7
PRADERA HERBACEA	4	48,0	69,0	58,0	3,3
	5	63,0	103,0	88,3	6,4
	3	27,0	45,0	34,3	2,8
PRADERA ARBUSTIVA	4	31,0	95,0	73,4	8,7
	5	29,0	111,0	71,2	10,6
	3	16,0	62,0	23,9	3,3
ARBUSTIVO ABIERTO	4	64,0	85,0	75,9	4,1
	5	43,0	61,0	52,5	3,2
	3	17,0	25,0	20,8	1,2
ARBUSTIVO MEDIANAMENTE DENSO	4	50,0	92,0	63,7	5,3
	5	37,0	65,0	49,2	3,7
	3	16,0	26,0	19,9	1,2
BOSQUE SECUNDARIO	4	55,0	72,0	62,8	4,1
	5	23,0	34,0	28,7	2,1
	3	17,0	19,0	17,9	0,6
TIERRAS AGROPECUARIAS	4	21,0	93,0	57,0	10,4
	5	23,0	133,0	66,3	12,1
	3	16,0	73,0	26,4	6,5

probabilidad de pertenencia. Las imágenes de salida mostraron una buena resolución temática, con índices de separabilidad de las imágenes Landsat de 1.358 para 1987 y 1.377 para 1996, los cuales estaban dentro del rango permisible de acuerdo con la ecuación de Jeffries y Matusita, citado por Chuvieco (1996).

Adicionalmente, se analizaron algunos parámetros estadísticos (los valores mínimos y máximos, la media y la desviación estándar) de los pixeles para cada una de las categorías de cobertura y uso de la tierra obtenidas a partir de las bandas 4, 5 y 3 de las imágenes Landsat, tal como se presenta en la Tabla 1. Estos parámetros permitieron verificar los niveles de reflexión (*reflectance*) para cada categoría en cada banda del sensor, es así como, los cuerpos de agua (Ciénagas) mostraron los menores valores en las bandas del infrarrojo (4 y 5), por la capacidad de absorción de radiación del agua, mientras que la vegetación de tipo arbustiva registró los mayores valores de reflexión para estas mismas bandas (4 y 5), debido a que los picos de absorción de la vegetación están en el espectro visible. La combinación de la información que proporciona cada banda para cada categoría (Firma espectral) junto con los patrones de distribución, permitieron discriminar cada una de las categorías dentro de los rangos de variabilidad aceptados para un estudio de tipo general.

Finalmente, las coberturas vectoriales resultantes de los mapas temáticos fueron introducidas en un SIG para su análisis espacial y temporal, a partir de las relaciones de unión e intersección de las coberturas. Los resultados de este proceso fueron analizados estadísticamente con relación a los cambios detectados en la cobertura y uso de la tierra, tal como se describe en la siguiente sección.

Resultados y discusión

El análisis de las tendencias de cambio en la cobertura y el uso de la tierra para la zona norte de la región de La Mojana, se basó en la superposición de los mapas temáticos generados a partir del procesamiento de las imágenes Landsat de los meses de enero de 1987 y 1996 (Figuras 1, 2 y 3). A continuación se discuten los tipos de cobertura encontrados en cada fecha, y se analizan las tendencias de cambio y distribución de cada cobertura vegetal y uso de la tierra para la región de La Mojana.

Tipos de cobertura vegetal y usos de la tierra

Los principales tipos de cobertura encontrados en 1987 fueron: Vegetación Arbustiva medianamente densa (27.5%) y abierta (26.8%), Tierras Agropecuarias con énfasis pecuario (19.8%), cuerpos de agua (13.3%) y Humedal Reciente (6.5%), los cuales corresponden al 74.1% del área de la zona norte de La Mojana. Otras coberturas que ocupan una menor proporción fueron: Vegetación Herbácea, Vegetación de Humedal Antiguo y Bosque Secundario. A diferencia de 1987, en 1996 los principales tipos de cobertura encontrados fueron: cuerpos de agua (25.9%), Praderas Arbustivas (24.1%), Tierras Agropecuarias (15.3%) y Vegetación Arbustiva medianamente densa (14.1%), que corresponden al 79.4% de la zona de estudio. Otras coberturas que ocupan una menor proporción fueron: Humedal Reciente, Vegetación Arbustiva abierta y Humedal Antiguo (Tabla 2). En la zona sur de La Mojana predominan tierras misceláneas y áreas no identificadas por la presencia de nubes; esta zona no fue considerada dentro del análisis multitemporal, puesto que no se dispuso de información satelital para el año de 1996.

Tendencias de cambio

Al superponer los mapas de cobertura de los años considerados, se observaron las principales tendencias de cambio para cada tipo de cobertura y uso de la tierra. Estas diferencias fueron expresadas como proporción, en donde los valores mayores a uno (>1.0) significan un incremento o ganancia en la superficie (ha) de 1996 con relación a 1987; los valores inferiores a uno

relación a 1987; los valores inferiores a uno (<1.0) representan una reducción o pérdida de superficie entre ambas fechas y los valores iguales a uno (=1.0) significan que no hubo cambios, es decir, que la superficie ocupada por esa categoría se mantuvo estable (Tabla 2).

A partir de estos valores se establecieron las siguientes relaciones. La superficie ocupada por los cuerpos de agua prácticamente se duplicó entre los dos períodos (1.93), pasando de 32.028 ha en 1987 a 62.014 ha en 1996. Estos cuerpos están representados por las ciénagas, que en 1987 ocupaban el 13,3% de la zona y en 1996 el 25,9%. El aumento de la superficie de los cuerpos de agua en 1996, puede ser el resultado de dos procesos: por un lado, la acumulación de sedimentos en la región redujo la capacidad de regulación del agua en los basines y ciénagas, expandiendo las áreas anegadas; por otro lado, el año de 1996 fue especialmente lluvioso en el país, por lo que aumentó el volumen de agua que llegó a la zona.

La Vegetación de Humedal perdió 7.170 ha de superficie entre 1987 y 1996, tanto en los Humedales Antiguos (714 ha) como en los Humedales Recientes (6.456 ha). Esta reducción se explica, en parte, por el incremento de las tierras ocupadas por ciénagas, aledañas a los cuerpos de agua, principalmente al norte de La Mojana.

Dentro de la Vegetación Herbácea se distinguieron dos tipos: Praderas Herbáceas y Praderas Arbustivas. En el primer caso, se observó una reducción de 7.366 ha entre las dos fechas (3,1% del área), mientras que en el segundo, se detectó un incremento de 56.863 ha entre 1996 y 1987 (23,7% del área). Estas variaciones podrían explicarse por un cambio en el uso de la tierra, debido a una reducción de las áreas dedicadas a la ganadería de trashumancia que favoreció el incremento de praderas arbustivas.

La Vegetación Arbustiva presentó una severa reducción (90.736 ha) entre las dos fechas, la cual correspondió al 37,8% del área. Este tipo de vegetación se diferenció en Vegetación Arbustiva abierta y medianamente densa, con una reducción de 58.549 ha y 32.187 ha, respectivamente. Dicha cobertura vegetal se encuentra localizada en las tierras más altas en la zona central de La Mojana, contigua a la región de Bosque Secundario, lo que hace suponer que es un estado de sucesión del bosque ocasionado por una creciente intervención antrópica (tala y quema).

La extensión de Vegetación Arbórea en 1996 refleja un proceso de tala y quema del bosque, con una disminución de 1.574 ha con relación a 1987. Los Bosques Secundarios se localizan principalmente en la zona norte, circundando zonas de ciénagas y vegetación de humedal. Es probable que los valores de absorción y reflectividad observados en esta categoría representen una asociación estrecha entre vegetación arbórea y arbustiva.

Las tierras agropecuarias correspondían al 20% de la superficie en 1987 y al 15%, en 1996. La reducción se explica por el aumento en los cuerpos de agua de la región, debido a las inundaciones registradas en el año de 1996. Estas tierras se localizan en las parte altas de la zona sur, y a lo largo de los diques de los ríos San Jorge, Cauca y de los principales caños de la región (Mojana y Panceguita). Es importante destacar que las imágenes de satélite fueron tomadas en época de verano, y por tanto, los niveles de inundación de la región se encuentran en su mínima expresión (niveles bajos). Durante este período, la mayoría de las tierras agropecuarias dedicadas a la agricultura se encuentran en descanso (barbecho) con la presencia de áreas de suelo desnudo. En consecuencia, durante esta época del año la utilización del suelo presenta un énfasis pecuario, principalmente ganadería de trashumancia. Algunos cambios observados en la cobertura vegetal son de difícil análisis debido al efecto de nubes y sombras presentes en la imagen de 1996.

Tabla 2. Tendencias de cambio de la cobertura y usos de la tierra (enero 1987 a enero 1996).

NIVEL I	NIVEL II	SUPERFICIE		TENDENCIAS DE CAMBIO
		1987	1996	Proporción
Cuerpos de agua	Ciénagas	32.028 ha 3,3%	62.014 ha 25,9%	1,93 ganó
Vegetación de humedal	Antigua	3.523 ha 1,5%	2.809 ha 1,2%	0,79 perdió
	Reciente	15.629 ha 6,5%	9.173 ha 3,8%	0,59 perdió
Vegetación herbácea	Praderas herbáceas	8.351 ha 3,5%	985 ha 0,4%	0,12 perdió
	Praderas arbustivas	865 ha 0,4%	57.728 ha 24,1%	66,7 ganó
Vegetación arbustiva	Abierta	64.321 ha 26,8%	5.772 ha 2,4%	0,09 perdió
	Medianamente densa	65.865 ha 27,5%	33.678 ha 14,1%	0,51 perdió
Vegetación arbórea	Bosque secundario	1.628 ha 0,7%	54 ha 0,0%	0,03 perdió
Tierras agropecuarias	Con énfasis pecuario	47.452 ha 19,8%	36.695 ha 15,3%	0.77 perdió
No identificado	Nubes, sombras y otros	– –	30.754 ha 12,8%	–
Total		239.662 ha 100%	239.662 ha 100%	

Distribución temporal de la cobertura y uso de la tierra

Como resultado de la superposición de los mapas de cobertura y uso de la tierra de 1987 y 1996 (nueve años), se calcularon los cambios en la distribución de cada categoría. Éstos se expresan como porcentajes y representan el grado de estabilidad en su localización y el tipo de cambio que tuvo cada categoría. La Tabla 3 expone la distribución porcentual de la cobertura de 1987 con relación a la observada en 1996.

Algunas de las categorías mantuvieron su localización entre ambas fechas, tal como ocurrió con las ciénagas: el 83.1% de los cuerpos de agua identificados en 1987 continuaron en 1996; mientras que otras, como el Bosque Secundario, las Praderas Herbáceas y la Vegetación Arbustiva abierta, modificaron su distribución por reem-

plazo con otras coberturas. Las demás categorías mantuvieron su localización en forma parcial, tales como: tierras agropecuarias (17.509 ha, el 36,9%), Vegetación Arbustiva medianamente densa (34,5%) y Praderas Arbustivas (32,1%).

El sitio de localización de las tierras agropecuarias fue ocupado principalmente por Praderas Arbustivas (25,5%) y Vegetación Arbustiva medianamente densa (12,3%); estas variaciones en la distribución expresan un abandono de las tierras agrícolas en la zona norte de La Mojana. Es importante destacar que la mayor extensión agrícola corresponde a la zona sur, que es la zona menos afectada por las inundaciones.

Las áreas donde se ubicaba la Vegetación Arbustiva medianamente densa fue ocupada por Praderas Arbustivas (20,8%) y una extensión importante no pudo ser precisada por encontrarse cubierta de nubes y sombras (20,9%). Estos resultados confirman la teoría de un acelerado proceso de tala y quema en la región concurrente con la transición de vegetación arbustiva a praderas. Las Praderas Arbustivas fueron ocupadas por diferentes tipos de coberturas, tales como: ciénagas (19,3%), tierras agropecuarias (15,4%) y por un 23,7% que no pudo ser identificado por estar cubierto de nubes y sombras.

Los Humedales Antiguos y Recientes fueron cubiertos en un 38,7% por ciénagas y, en menor proporción, transformados en Vegetación Arbustiva medianamente densa (12,9%) y Praderas Arbustivas (12,2%). Estos resultados reflejan la dinámica propia de los Humedales, los cuales son cubiertos eventualmente por cuerpos de agua, para volver después a la condición de Humedal, lo cual depende de procesos regionales de sedimentación. De igual forma, pueden ser colonizados por especies de arbustos cuando los cuerpos de agua se retiran.

La Vegetación Arbustiva Abierta fue uno de los tipos de cobertura vegetal que más cambios mostró entre ambos períodos, pues la mayor parte de esta vegetación pasó a ser Pradera Arbustiva (41,0%), y en menor proporción fue ocupada por ciénagas (22,7%) y tierras agropecuarias (14,7%). Estos cambios en la cobertura y uso de la tierras ratifican los procesos de deforestación y la dedicación creciente de la tierra a la ganadería.

Tabla 3. Distribución porcentual de la cobertura y uso de la tierra 1987 / 1996

AÑO 1987	COBERTURA Y USO DE LA TIERRA AÑO DE 1996									
	Ciénagas	**Tierras Agropecuarias**	**Vegetación arbustiva mediana / densa**	**Pradera arbustiva**	**Humedal antiguo / reciente**	**Vegetación Arbustiva abierta**	**Pradera herbácea**	**Bosque Secundario**	**Nubes y sombras**	**Total**
Ciénagas	**83,1**	7,6	2,0	3,2	0,9	1,6	0,0	0,0	1,6	100,0 /32.028 ha
Tierras Agropecuarias	7,1	**36,9**	12,3	25,5	6,0	1,9	0,2	0,0	10,1	100,0 / 47.452 ha
Vegetación Arbustiva mediana / densa	7,1	7,1	**34,5**	20,8	5,9	3,7	0,0	0,0	20,9	100,0 / 65.865 ha
Pradera Arbustiva	19,3	15,4	0,4	**32,1**	1,9	1,9	5,3	0,0	23,7	100,0 / 865 ha
Humedal antiguo / reciente	38,7	6,8	12,9	12,2	**19,4**	2,3	0,0	0,3	7,4	100,0 / 15.629 ha
Vegetación Arbustiva abierta	22,7	14,7	2,7	41,0	1,6	**1,9**	1,3	0,0	14,1	100,0 / 64.329 ha
Pradera Herbácea	61,7	13,5	2,9	12,5	1,4	2,7	**0,3**	0,0	5,0	100,0 / 8.351 ha
Bosque Secundario	1,2	4,5	1,9	54,4	0,0	0,0	0,0	**0,0**	38,0	100,0 / 1.628 ha

Las Praderas Herbáceas presentaron un cambio drástico hacia ciénagas (61,7%) y en menor proporción cambiaron hacia tierras agropecuarias (13,5%) y Praderas Arbustivas (12,5%). Es importante considerar que durante el año de 1996, los cuerpos de agua prácticamente se duplicaron ocupando Humedales, Praderas Herbáceas y Arbustivas. Finalmente, la vegetación de Bosque Secundario cambió hacia Praderas Arbustivas (54,4%), pero una gran proporción del área no pudo ser analizada por estar cubierta de nubes y sombras, razón por la cual no fue posible precisar la tasa de deforestación de la zona norte de La Mojana.

Conclusiones

El uso de las técnicas de teledetección fue una valiosa herramienta para determinar las tendencias de cambio de la cobertura y el uso de la tierra a nivel de estudios generales (1:100.000). Los resultados muestran un incremento en los cuerpos de agua (12,6%) y las Praderas Arbustivas (23,7%) con relación a la superficie total de trabajo, y en detrimento de la superficie ocupada por la Vegetación Arbustiva (37,8%) y las tierras agropecuarias (4,5%).

Al analizar la distribución porcentual de las coberturas de 1987 hacia 1996, se observó que algunas de los categorías mantuvieron su localización entre ambas fechas, tal como ocurrió con las ciénagas, en donde el 83,1% de los cuerpos de agua identificados en 1987 continuaron en 1996; mientras que otras, como el Bosque Secundario, las Praderas Herbáceas y la Vegetación Arbustiva Abierta, modificaron su distribución y fueron reemplazadas por otras coberturas. Las demás categorías mantuvieron su localización en forma parcial, así: tierras agropecuarias (17509 ha, 36,9%), Vegetación Arbustiva medianamente densa (34,5%) y Praderas Arbustivas (32,1%). Finalmente, la Vegetación Arbustiva Abierta fue la cobertura vegetal que mayores cambios mostró entre ambos períodos. Es importante considerar que en el año de 1996 los cuerpos de agua se duplicaron.

BIBLIOGRAFÍA

Andrade, A., Cárdenas, L., Otero, J., Romero, J., Leal, R. y Triana, G. 1996. Zonificación ecológica y caracterización de las unidades ecológicas del paisaje en la Cuenca Hidrográfica del Río Sinú (parte media y baja). SIG-PAFC. Santa Fe de Bogotá, Colombia, año 3, 12: 6-89.

Byrne, G. F., Crapper, P. F. y Mayo, K. K. 1980. Monitoring Land Cover Change by Principal Component Analysis of Multitemporal Landsat Data. Remote Sensing of Environment 10: 175-184.

Carlson, D. and Rubingh, J. 1979. Agricultural Land Conversion in Colorado. Denver, Colorado Department of Agriculture.

Conese, C. and Maselli, F. 1991. Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 46: 187-197.

Couillaud, P. y Forero, J. 1991. Estudio de avance del comportamiento de la caña de azúcar según la variedad y la edad frente a la roya. Proyecto Cobertura Vegetal. Reporte interno, Subdirección de Docencia e Investigación - IGAC.

Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones RIALP, S.A. Primera edición. 400 pp.

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones RIALP, S.A. Segunda edición. 451 pp.

Erdas Imagine® Erdas Field Guide. 1993. Third Edition. ERDAS Inc.

Holdridge, L. R. 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. Segunda Reimpresión, 159 pp.

Gónima, L., Suárez, A. y León, J. 1991. Estudio radiométrico de zonas agrícolas utilizando imágenes de satélite SPOT. Rev. CIAF 12 (1).

González, A. 1995. Aplicación de la teledetección para la fotointerpretación preliminar de unidades de paisaje en el Parque Natural de Paramillo (Córdoba). SIG-PAFC. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Año 2 (7): 34 -72.

Jensen, J. R. and Toll, D. L. 1982. Detecting Residential Land-Use Development as the Urban Fringe. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48: 629-643.

Lambin, E. F. 1996. Change Detection at Multiple Temporal Scales: Seasonal and Annual Variations in Landscape Variables. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 62 (8): 931-938.

López, A., Aguilera, E., Arriaza, L., Forian, N., Romero, J. y Abuabara, Y. 1997. Caracterización de los sistemas de producción de la región de La Mojana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. C.I. Turipaná, Montería. Informes Técnicos de Avance.

López, J. 1990. Procesamiento digital de imágenes multiespectrales. IGAC. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

Muchoney, D. and Haack, B. 1994. Change Detection for Monitoring Forest Defoliation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 60 (10): 1243-1251.

Rosero, O. A. y Gutiérrez, M. 1996. La Ciénaga de Ayapel, un paraíso amenazado y desprotegido. Corporación para la protección y el desarrollo sostenible del Bajo Cauca y de la Ciénaga de Ayapel. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 20 pp.

Sionneau, J. 1991. Diferenciación de cultivos en el Valle del Cauca a partir de imágenes SPOT. Proyecto Cobertura Vegetal. Reporte interno. Subdirección de Docencia e Investigación - IGAC.

Stow, D. A., Tinney, L. R. and Estes, J. E. 1980. Deriving Land-Use Land Cover change statistics from Landsat: A Study of Prime Agricultural Land. *In*: Proceedings, 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor (Mich), ERIM. p.1227-1237.

Terán, C. A., Villaneda, E., De Almeida, L. y Jiménez, H. 1996. Análisis agroclimático de la región de La Mojana. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. C.I. Tibaitatá. Informes Técnicos de Avance.

Vargas, E. 1991. Análisis y clasificación del uso y cobertura de la tierra con interpretación de imágenes. IGAC, Subdirección de Docencia e Investigación. Santa Fe de Bogotá, Colombia.