

# Un Modelo para la Georeferenciación de la Colonización del Bosque a Futuro

*Recibido para evaluación: 05 de Mayo 05 2003*  
*Aceptación: 20 de Junio de 2003*  
*Recibido versión final: 10 de Noviembre de 2003*

Enrique Angel Sanint<sup>1</sup>  
Carlos Mario Castaño Posada<sup>2</sup>

## RESUMEN

Se plantea un modelo matemático de proyección geográfica del proceso de colonización del bosque a futuro. El modelo permite tanto estimar la cantidad de bosque remanente, y por ende la colonización, como georeferenciar dicho proceso, de tal manera que es posible construir una imagen probable del bosque remanente para una fecha futura. El modelo se basa en la obtención de parámetros estadísticos históricos del proceso a través de un análisis multitemporal de imágenes de satélite.

La metodología de proyección del estado de los bosques desarrollada se aplica al municipio de San Vicente del Chucurí (Santander, Colombia) utilizando 4 imágenes de satélite Landsat de 1977, 1985, 1991 y 1998, se establecen comportamientos geoestadísticos de la colonización, para proyectar y producir una imagen futura probable de los bosques para el año 2005 en el municipio.

**PALABRAS CLAVE:** Colonización del Bosque, Modelación del Paisaje, Sistema de Información Geográfica

## ABSTRACT

A mathematical model for the future geographical projection of the forest colonization process is proposed. The model allows the estimation of future forest areas and their geographical location, in such a way that it is possible to create a probable image of the forest coverage at a given future date. The model is based on the preservation of historical statistical parameters through the use of multi-temporal analysis of satellite images.

The developed projection method is applied to San Vicente del Chucurí (Santander, Colombia) using four Landsat satellite images from 1977, 1985, 1991 and 1998. The statistical behavior of the colonization process is established, to produce a future forest image for the year 2005 in the study area.

**KEY WORDS:** Deforestation, Landscape Modeling, Geographic Information System

---

1. Interconexión Eléctrica S.A. ESP.  
enangel@isa.com.co  
2. PROSIS S.A.  
ccastano@prosis.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en una herramienta fundamental de gestión y planificación ambiental para las entidades territoriales. Como fuente de información, los sensores remotos y específicamente las imágenes de satélite son invaluable para capturar variables ambientales con componente geográfica.

En este trabajo se desarrolla y aplica un modelo para la proyección de la colonización del bosque apoyado en análisis multitemporales de imágenes de satélite y haciendo uso de técnicas y herramientas de procesamiento digital de imágenes y Sistemas de Información Geográfica. La proyección del fenómeno de colonización busca establecer el comportamiento a futuro de esta dinámica para fines de gestión ambiental, proyección de vital importancia en la conservación y utilización sostenible de los bosques.

## 2. MODELO DE PROYECCIÓN

El modelo de proyección plantea los conceptos que se proponen y la formulación matemática necesaria para implementar la aplicación.

### 2.1 Definición de Conceptos

Con el fin de lograr una aproximación a la compleja dinámica de la colonización del bosque, ha sido necesario plantear varios conceptos que permiten desagregar el fenómeno en sus dimensiones espacio-temporales.

Se denominará **BOSQUE** a la cantidad de bosque remanente en una determinada fecha.

Se llamará **COLONIZACION** al paso de cobertura de bosque a otra cobertura cualquiera, por lo tanto:

La **COLONIZACION** en un periodo será la diferencia entre los **BOSQUES** al principio y al final del mismo.

Para tener en cuenta la diversidad de tamaños de los fragmentos de colonización se propone el concepto de **GRUPO**, definido como el conjunto de fragmentos de colonización cuyas áreas se encuentran en un intervalo de tamaños previamente definidos.

Para aproximarse a la distribución geográfica de los fragmentos de colonización se propone el concepto de **CUADRANTE**, definido como una sub-área del área total de estudio de forma regular (cuadrada) cuya dimensión se define previamente.

Finalmente, para cada fragmento de colonización se puede calcular su centro geométrico que se llamará **CENTROIDE**. En la Figura 1, a continuación, se presentan gráficamente los conceptos.

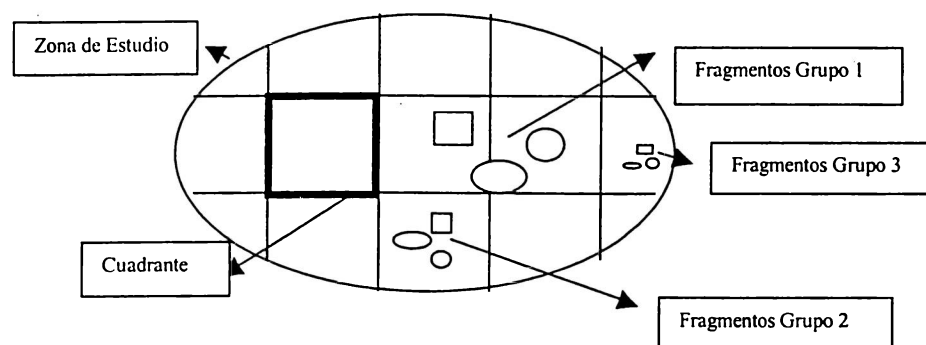
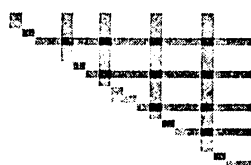


Figura 1.  
Esquema gráfico de los principales  
conceptos

## 2.2 Modelo Matematico

### 2.2.1 Histórico

Sean  $1, 2, \dots, u$ . los momentos de toma de las imágenes de satélite históricas, siendo  $u$  el momento de la última imagen disponible y  $p$  el momento para el que se quiere realizar la proyección.

Sea  $B_p$ , la extensión de bosque en le período  $t$

$C_{t1-t2}$ , la colonización en el período  $(t1 - t2)$ , por tanto:

$$C_{(t1 \rightarrow t2)} = B_{(t1)} - B_{(t2)}. \quad (1)$$

Sea  $i = 1, n$ ; los cuadrantes presentes en la imagen y  $n$  el número total de ellos.

Sea  $j = 1, m$ ; los grupos definidos de fragmentos de colonización y  $m$  el número total de ellos.

Sea  $A_{ij}^{t1-t2}$  el área total de los fragmentos del grupo  $j$  en el cuadrante  $i$  en el período  $t1 - t2$ , por tanto:

$$C_{(t1 \rightarrow t2)} = \sum_i \sum_j A_{ij}^{t1-t2} \quad (2)$$

Sea  $C_j$  el área total de los fragmentos del grupo  $j$  en el período  $t1 - t2$ , sumando sobre todos los  $i$ , por tanto:

$$C_j^{t1 \rightarrow t2} = \sum_i A_{ij}^{t1-t2} \quad (3)$$

Sea  $r_{ij}^{t1-t2}$  la relación entre la colonización en el grupo  $j$  y la colonización total en el período  $t1 - t2$ , por tanto:

$$r_{ij}^{t1-t2} = C_j^{t1 \rightarrow t2} / C_{(t1 \rightarrow t2)} \quad (4)$$

Sea  $n_{ij}^{t1-t2}$  el número de fragmentos de colonización del grupo  $j$  en el cuadrante  $i$  en el período  $t1 - t2$ , se puede definir un área promedio  $a_{ij}^{t1-t2}$  de los fragmentos en ese grupo, cuadrante y período como:

$$a_{ij}^{t1-t2} = A_{ij}^{t1-t2} / n_{ij}^{t1-t2} \quad (5)$$

Conceptualizando la aparición de un fragmento de colonización con sus características de grupo, cuadrante y período como un fenómeno aleatorio, se abre la posibilidad de tratar el número de realizaciones de dicho proceso como una variable aleatoria cuyos parámetros futuros (media y desviación) se pueden proyectar en el tiempo a partir de los datos históricos. A partir de los  $n_{ij}^{t1-t2}$  se pueden determinar  $n_{2j}^t, n_{3j}^t, \dots, n_{uj}^t$  la serie de los promedios del número de fragmentos de colonización para el grupo  $j$ , al final de cada intervalo entre imágenes de satélite. Igualmente se puede determinar  $\sigma_{n_{2j}^t}, \sigma_{n_{3j}^t}, \dots, \sigma_{n_{uj}^t}$  la serie de las desviaciones estándar correspondientes.

### 2.2.2 Proyección

Para realizar la proyección de la cantidad de bosque remanente en el momento  $p$  y de su georeferenciación, las expresiones son las siguientes:

Para el área total:

$$B_p = f_1(B_1, B_2, \dots, B_u) \quad (6)$$

De donde:

$$C_p = B_u - B_p \quad (7)$$

Para conservar la dinámica de la relación entre el área colonizada en un grupo y el total del área colonizada:

$$r_p^j = f_2(r_{2j}^t, r_{3j}^t, \dots, r_{uj}^t) \quad (8)$$

Es posible que los  $r_p^j$  no sumen uno, por efecto de que algún grupo con un área promedio de fragmento grande ya no se presente, pues no hay parches remanentes de esas dimensiones, por tanto es necesario ajustar los  $r_p^j$  para que sumen uno:

$$r_p^{*j} = r_p^j / \sum r_p^j \quad (9)$$



La media y la desviación estándar del número de fragmentos por cuadrante, para cada grupo  $j$ :

$$\begin{aligned} n_p^j &= f_3 (n_2^j, n_3^j, \dots, n_u^j) \\ \sigma_{n_p}^j &= f_4 (\sigma_{n_2}^j, \sigma_{n_3}^j, \dots, \sigma_{n_u}^j) \end{aligned} \quad (10)$$

Para localizar espacialmente los fragmentos de colonización, se genera como un número aleatorio, el total de fragmentos para cada grupo y cuadrante, utilizando para ello la media y desviación proyectadas mediante [8]:

$$n_p^j \sim N(n_p^j, \sigma_{n_p}^j) \quad (11)$$

Para el área total por grupo:

$$C_p^j = C_p \cdot r_p^j \quad (12)$$

Finalmente, para determinar el área equivalente de cada fragmento nuevo en cada grupo:

$$a_p^j = C_p^j / n_p^j ; \forall i \quad (13)$$

### 3. MODELO OPERATIVO

El modelo operativo utilizado para esta proyección se presenta en la Figura 2:

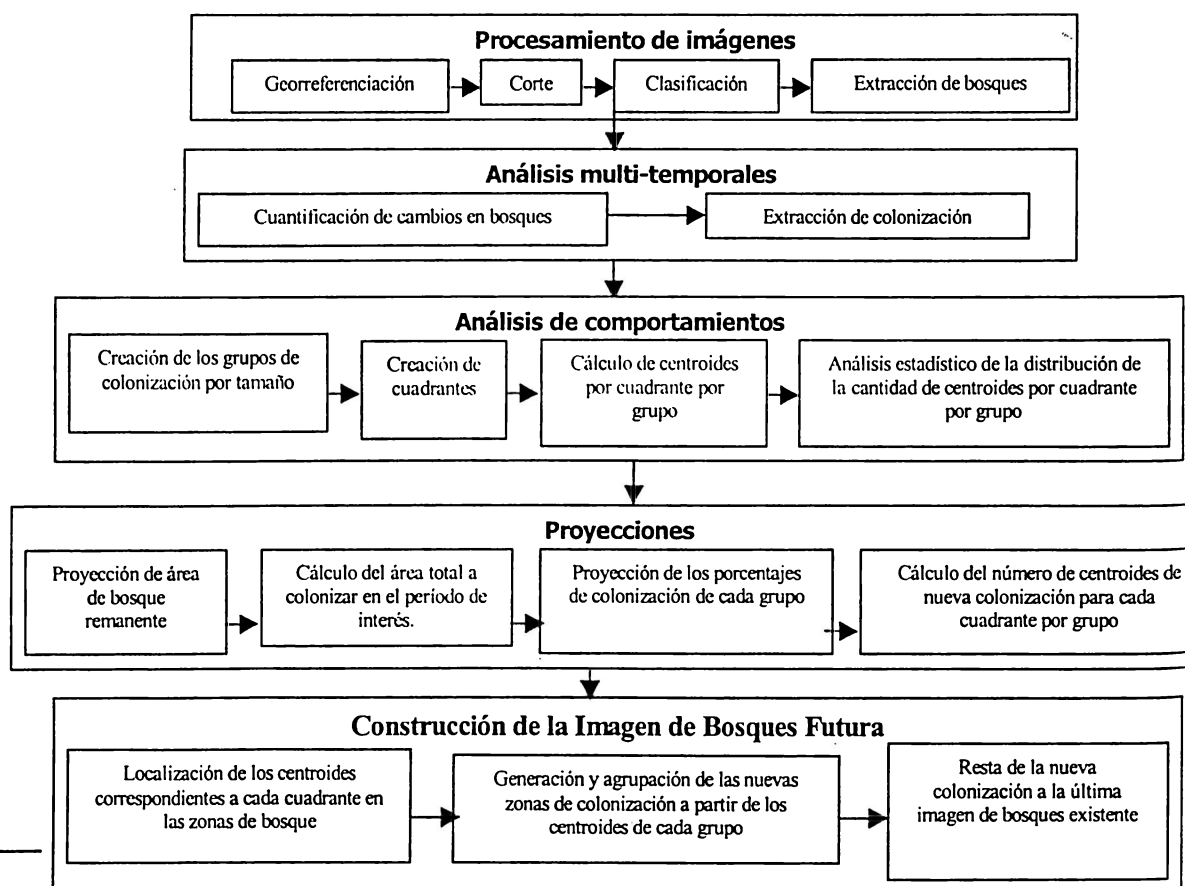


Figura 2.  
Modelo operativo

### 3.1. Procesamiento Digital

#### 3.1.1. Georreferenciación

La georreferenciación consiste en la ubicación geográfica real de las imágenes sobre la superficie terrestre. Es decir, es una reubicación o remuestreo de todos los píxeles de la imagen original a la posición geográfica real a la cual pertenecen. Esto se hace a través de puntos de control de terreno o "Ground Control Points" (GCPs) que pueden ser recolectados con GPS o a través de cartografía u otras imágenes existentes previamente georreferenciadas.

#### 3.1.2. Corte

Esta etapa consiste en la creación del subconjunto o "subset" de imágenes que contiene únicamente el área de estudio.

#### 3.1.3. Clasificación supervisada

El proceso de clasificación de las imágenes se realiza utilizando el método supervisado. Para esto debe hacerse la recolección de muestras o firmas espectrales seleccionando algunas zonas de cada cobertura de interés. Para este caso se identifican varias coberturas de bosque (bien distribuidas espacialmente) que servirán para generar la muestra de la clase o categoría "Bosque" y se señalan sobre la imagen para asignarlas como muestras de bosque. Lo mismo se hace para las demás coberturas: Vegetación, suelo urbano, suelo desnudo, pasto, cultivo, agua, nube y sombra.



### 3.2. Análisis Multi-Temporales

Utilizando las funciones de cambios temáticos de los programas de procesamiento de imágenes, se obtiene como producto otra imagen en la que cada clase representa el cambio que hubo entre cada píxel de las imágenes fuente.

#### 3.2.1. Cuantificación de cambios

De estas imágenes de cambios sólo interesan aquellos que se dieron de bosque a otra cobertura (colonización), es por eso que únicamente se cuantificarán los cambios de bosque a suelo urbano, de bosque a vegetación y de bosque a otros (pasto, cultivo, suelo desnudo, etc.). En este paso se determina  $B_i$ .

#### 3.2.2. Extracción de Colonización

De manera similar al paso anterior, es necesario extraer sólo los cambios de interés en imágenes de colonización, es decir, todo lo que de bosque pasó a ser vegetación, o suelo urbano, u otro (cultivo, pasto, etc.). Aquí se determina  $C_{11-12}$ .

### 3.3. Análisis de Comportamientos y Patrones de Colonización

Con el fin de allegar los parámetros para la aplicación del modelo, se desarrollaron dos operaciones; la separación en grupos o bloques de fragmentos de acuerdo a su tamaño y la creación de cuadrantes o subimágenes sobre el área de análisis.

Con estas operaciones es posible una caracterización espacial y temporal del comportamiento de los fragmentos de colonización en toda la extensión del municipio. En este paso se determinan  $A^j$ ,  $C^j$ ,  $r^j$ ,  $n^j$ ,  $a^j$ ,  $n^j$ ,  $\sigma_n^j$ .

### 3.4. Proyección a Futuro de la Colonización del Bosque en la Zona de Estudio

Se selecciona una fecha para la proyección de colonización futura buscando que haya homogeneidad en los lapsos de tiempo entre imágenes del bosque existentes.

#### 3.4.1. Proyección del área total a colonizar

Lo primero que se proyecta es el área total colonizada, teniendo en cuenta las áreas de bosque de las imágenes clasificadas y los cambios entre ellas, es decir, se proyecta  $B_p$ .

### 3.4.2. Determinación y proyección de porcentajes de colonización por grupo

A continuación se procede a proyectar los porcentajes de participación en área de colonización para cada uno de los grupos en el momento de proyección,  $r'_p$ .

## 3.5. Construcción de la Imagen Futura de Bosques

Luego de tener las cantidades de colonización futura total y para cada uno de los grupos se procede a la repartición espacial de las mismas.

### 3.5.1. Cálculo del número de centroides futuros por cuadrante por grupo

Consiste en la asignación del número de centroides o fragmentos nuevos de colonización para el lapso entre la última imagen histórica y la fecha de proyección para cada cuadrante de cada grupo, conservando las características históricas del proceso, generando las variables  $n^l_p$ .

### 3.5.2. Localización de polígonos por grupo en zonas boscosas

Es la repartición espacial de los fragmentos de colonización futuros sobre las zonas de bosque remanente en la última imagen histórica, se realiza creando  $n^l_p$  áreas para cada cuadrante, con un área media correspondiente a  $a^l_p$ .

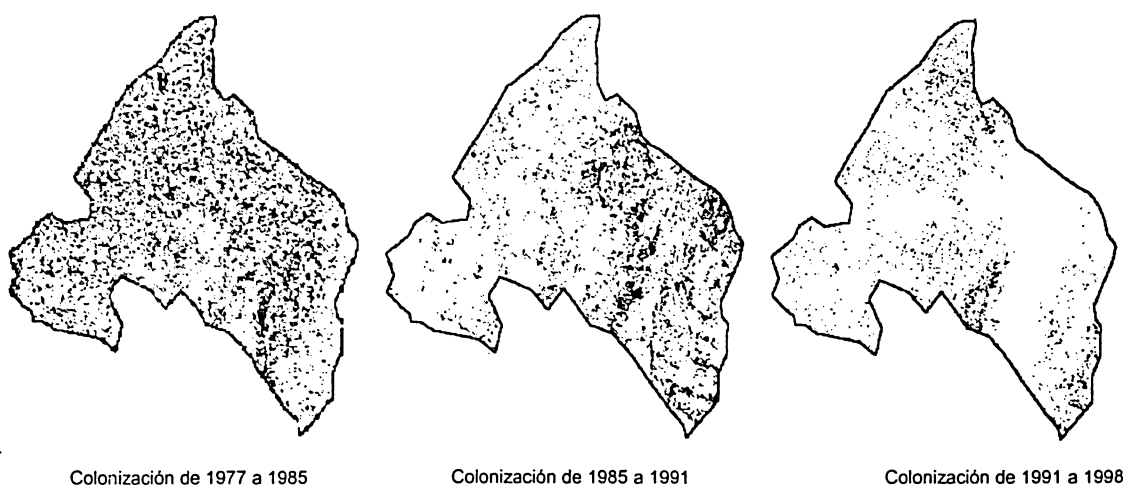
### 3.5.3. Resta de los bosques

A la última imagen de bosques se le resta entonces la proyección de colonización a través de herramientas de geoprocésamiento para generar la imagen futura de bosques.

## 4. APLICACION DEL MODELO

### 4.1. Procesamiento Digital y Análisis Multitemporal

Se desarrolló el procesamiento e interpretación de las imágenes compuesto por la georreferenciación, corte, clasificación temática y extracción de los bosques sobre el municipio de San Vicente de Chucurí. Al extraer sólo los cambios de interés en imágenes de colonización, es decir, todo lo que de bosque pasó a ser vegetación, o suelo urbano, u otro (cultivo, pasto, etc.), se generaron 3 imágenes de colonización: colonización 77-85, colonización 85-91 y colonización 91-98, que se presentan en la Figura 3, donde los píxeles oscuros son los que representan la colonización.



Luego del procesamiento y las conversiones, puede observarse en la Tabla 1 que los resultados son:

Período	Area colonizada (C) ha
77 a 85	36983
85 a 91	19310
91 a 98	6643
Total	62936

Tabla 1.  
Cambios en las áreas de bosque

#### 4.2. Análisis de Comportamientos y Patrones de Colonización

Los fragmentos de colonización se dividieron en cinco grupos en un esfuerzo por capturar las diferentes dinámicas de colonización que pueden afectar tanto a zonas extensas como a otras más pequeñas. Para tal efecto se definieron unos límites que se utilizaron para la clasificación de los fragmentos de colonización a través de todos los lapsos de tiempo.

Se crearon cuadrantes de 5 km. x 5 km. sobre el área del municipio con el objeto de hacer el análisis del comportamiento de los fragmentos de colonización en una escala más detallada. El área de los cuadrantes debe seleccionarse de tal manera que sea lo suficientemente pequeña para ser representativa del fenómeno de estudio y lo suficientemente grande para que se facilite el proceso estadístico posterior.

Siendo el área del municipio de 124.339 Has y el área de los cuadrantes de 2.500 Has, se generan aproximadamente 50 subimágenes de colonización. En la Figura 4 se muestran todos los cuadrantes (68) y en color claro los que están totalmente incluidos dentro del municipio (33).

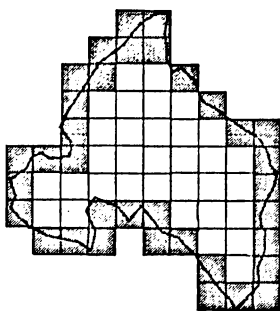


Figura 4.  
Cuadrantes

En la Figura 5 se muestran los fragmentos de colonización para los diferentes grupos del período 1977 a 1985, y se le superponen los cuadrantes. Pueden observarse claramente las diferencias en tamaño y en cantidad de fragmentos para cada uno de los grupos en este intervalo de colonización a lo largo del municipio y para cada uno de los cuadrantes generados.

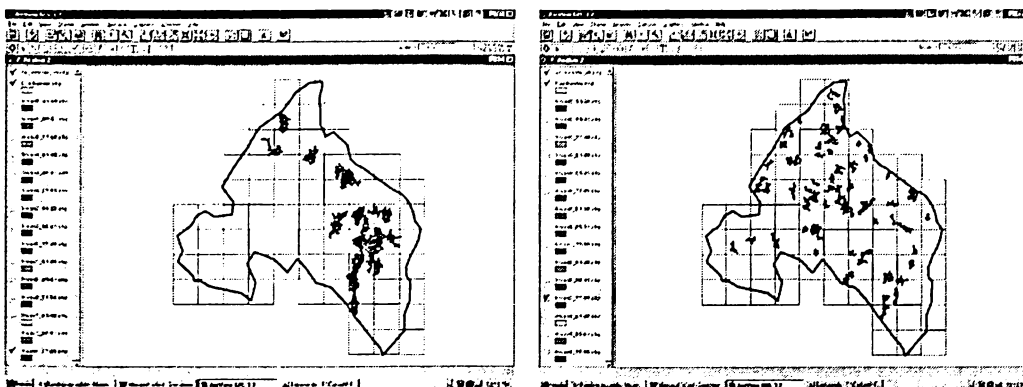


Figura 5.  
Colonización por grupos en el  
período 1977 a 1985

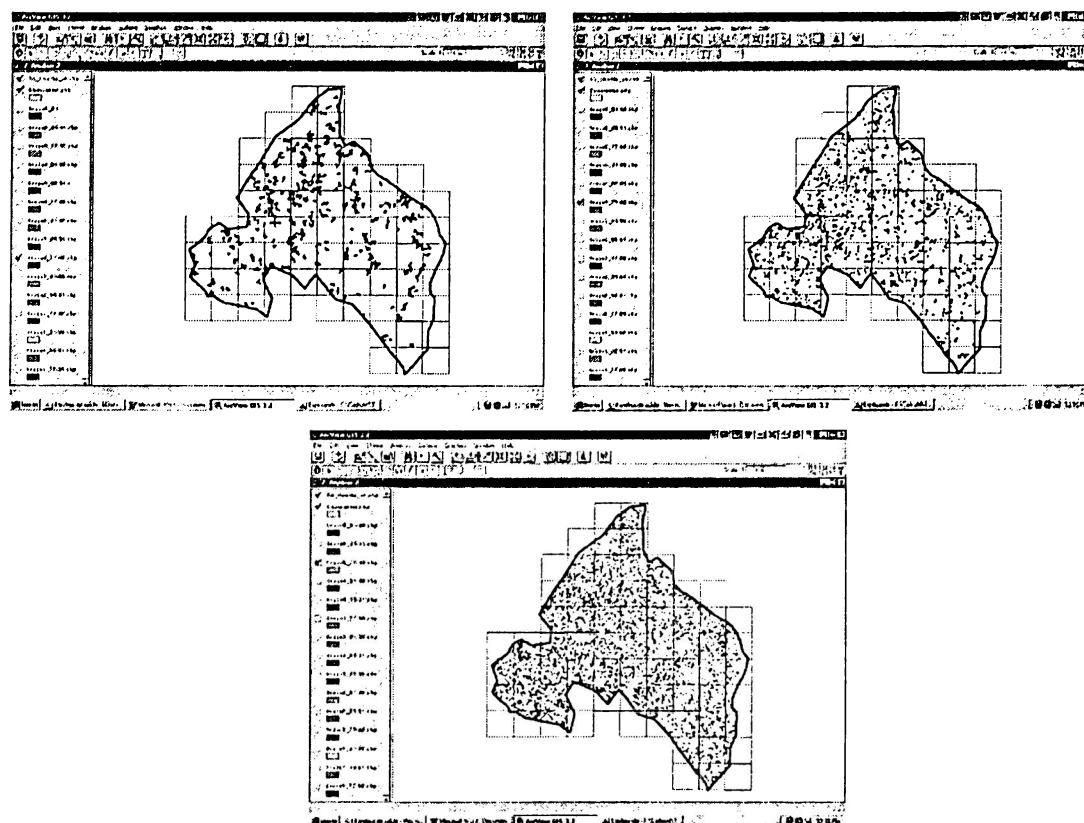


Figura 5. (continuación)  
Colonización por grupos en el  
período 1977 a 1985

A continuación, se calculó del centroide de cada fragmento de colonización. Luego de tener las coordenadas de los centroides se dibujaron los puntos. Esto se realizó para cada uno de los grupos de colonización con el fin de cuantificar la cantidad de fragmentos por cuadrante sin que hubiera lugar a errores de cálculo por la existencia de un mismo fragmento en varios cuadrantes, es decir, de esta manera se garantiza que los fragmentos que se tocan más de un cuadrante van a ser asignados sólo al cuadrante en el que se encuentre su centroide.

Luego de tener los cuadrantes y los centroides se hizo el cálculo de número de centroides por cuadrante para cada uno de los grupos de colonización. Como resultado se obtiene la cantidad de centroides para cada uno de los grupos de colonización en los cuadrantes que se encuentran totalmente incluidos dentro del municipio debido a que sólo se tendrán en cuenta éstos para el análisis estadístico. Lo que se pretende estudiar es la distribución estadística de estas cantidades para todos los cuadrantes incluidos en el municipio, con la finalidad de tratar el número de centroides por cuadrante,  $n^j$ , como un campo aleatorio.

#### 4.2.1. Análisis estadístico

Para esta prueba sólo se tuvieron en cuenta los grupos 3, 4 y 5 ya que los grupos de áreas grandes (1 y 2) presentan una distribución espacial muy heterogénea sobre las zonas boscosas de mayor tamaño y por lo tanto no se puede determinar un comportamiento estadísticamente representativo en los cuadrantes. El comportamiento de las cantidades de centroides en los grupos 1 y 2 hace evidente que con el tiempo los grupos grandes de colonización disminuyen drásticamente en cantidad ya que a medida que la colonización avanza los bosques de mayor tamaño se van fragmentando y desintegrando y por lo tanto cada vez quedan menos áreas grandes por colonizar.

El propósito es encontrar una distribución estadística que se ajuste a las cantidades de centroides por grupo (3, 4 y 5) en los cuadrantes. Puede observarse por simple inspección visual de



la Figura 5 que estas cantidades no obedecen a una distribución uniforme. Como primera hipótesis se probará si obedecen a una distribución normal, utilizando la prueba Chi cuadrado.

Se estiman los límites entre 10 intervalos, de tal manera que en cada uno de ellos se encuentre la misma frecuencia teórica de acuerdo con la distribución normal. Para tal efecto se toman las ordenadas correspondientes a las probabilidades acumuladas de la normal estándar (0.1, 0.2, 0.3,...).

Las ordenadas correspondientes de Z se transforman de acuerdo con :

$$\sigma = (X - \mu) / z ; X = z \cdot \sigma + \mu,$$

con  $\sigma$  y  $\mu$  los valores correspondientes a la desviación estándar y media, respectivamente, del número de centroides por cuadrante para cada grupo (3, 4 y 5) y período de tiempo. Luego se elabora un histograma de frecuencias para la serie de datos de cada grupo y período de tiempo, en el que se utilizan como límites entre los intervalos las ordenadas transformadas X.

La frecuencia empírica así obtenida se compara con la frecuencia teórica que es igual a un décimo del número de cuadrantes en cada clase, pues se utilizaron intervalos de igual probabilidad acumulada equivalente a 0.1. Esta frecuencia teórica, es entonces igual a 3.3 para todos los casos ya que es la décima parte del número de cuadrantes totalmente incluidos que es 33.

La comparación se realiza mediante el estadístico Chi cuadrado, definido como:

$$\chi^2 = \sum [(f - \mu)^2 / \mu]$$

Para la realización de la prueba de ajuste es necesario tener en cuenta que el número de grados de libertad debe ser corregido por el hecho de haber estimado un par de parámetros ( $\sigma$ ,  $\mu$ ) a partir de los datos. Por tanto :

Grados de libertad = número de intervalos – 1 – número de parámetros estimados ( $\sigma$ ,  $\mu$ ) = 10 – 1 – 2 = 7.

De acuerdo con los valores tabulados para la distribución Chi cuadrado con 7 grados de libertad y un nivel de confianza del 95%, la hipótesis puede aceptarse si el estadístico es menor a 16.01.

En la Tabla 2 pueden observarse los grupos que cumplen la prueba.

GRUPO	$\chi^2$	Estado
G5_91_98	6.70	Cumple
G5_85_91	9.12	Cumple
G5_77_85	6.09	Cumple
G4_91_98	13.36	Cumple
G4_85_91	10.94	Cumple
G4_77_85	9.12	Cumple
G3_91_98	143.67	No Cumple
G3_85_91	16.39	No Cumple
G3_77_85	15.18	Cumple

Tabla 2.  
Resultados Prueba Chi cuadrado.

Todos los grupos 4 y 5 pasaron la prueba mientras que solo un grupo 3 lo hizo, por tanto los grupos 4 y 5 obedecen a una distribución normal. Esto puede explicarse debido a que estos grupos 4 y 5 son los de áreas más pequeñas y por lo tanto a lo largo del tiempo tiene un comportamiento más estable. Por otro lado, el grupo 3 por ser de tamaños medios, sólo pasa la prueba en la primera etapa (77 a 85) ya que en épocas posteriores empiezan a desaparecer los fragmentos grandes y medios de colonización.

#### 4.3. Proyección a Futuro de la Colonización del Bosque en la Zona de Estudio

Se seleccionó el año 2005 como fecha para la proyección de colonización futura buscando una homogeneidad en los lapsos de tiempo entre imágenes del bosque existentes.

##### 4.3.1. Proyección del área total a colonizar

Lo primero que se proyectó fue el área total colonizada ( $B_p$ ), teniendo en cuenta las áreas de bosque de las imágenes clasificadas y los cambios entre ellas (Ver Tabla 1). Se realizó la proyección con la siguiente función de ajuste :

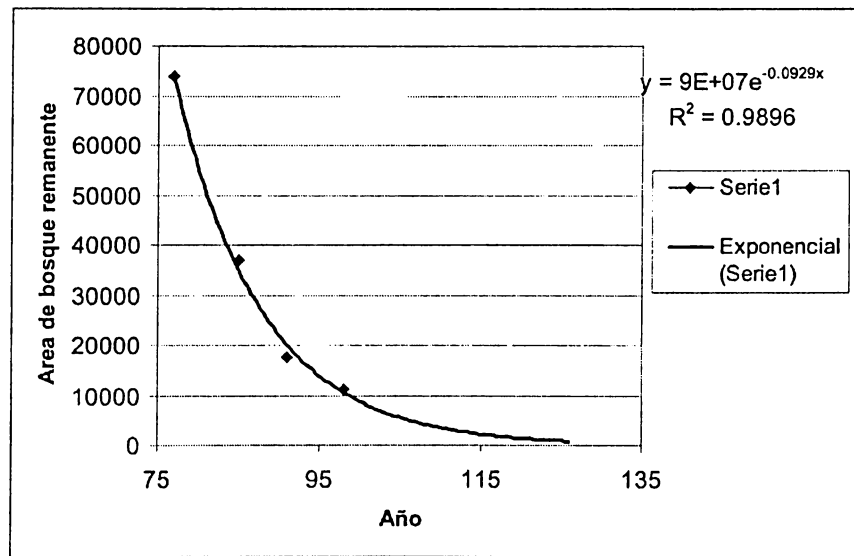


Figura 6.  
Proyección área de bosques.

Puede observarse en la Figura 6 que esta curva de proyección exponencial se ajusta muy bien al comportamiento de los puntos históricos. De la curva se obtiene que el área de bosque proyectada al 2005, ( $B_{2005}$ ), será de 5.223 Has, por tanto el área a colonizar en el período 1998 – 2005, es de 5893 Ha

##### 4.3.2. Determinación y proyección de porcentajes de colonización por grupo

En las gráficas mostradas en la Figura 7 se compara la participación en porcentaje de cada grupo frente al total de área colonizada en ese intervalo de tiempo, ( $r$ ), (contados a partir del año 1900).

Se realizó una proyección lineal de la participación por grupo ( $r$ ) para reflejar la dinámica de cada grupo en particular. Como se puede observar los grupos 1 y 2 (áreas de fragmentos mayores) ya no se encuentran presentes, el grupo 3 tiende a disminuir drásticamente, mientras que el grupo 4 conserva su participación porcentual y el 5 la incrementa. Esto es consecuente con la mayor fragmentación del bosque remanente en el cual ya no se encuentran parches lo suficientemente grandes para que en ellos se pueda dar colonización de los grupos 1 y 2. Como se observa en la Tabla 3, esta proyección sobrepasa el 100% y por lo tanto se ajustan los porcentajes ( $r$ ) de manera que el área a repartir (5893 Has) sea el 100%.

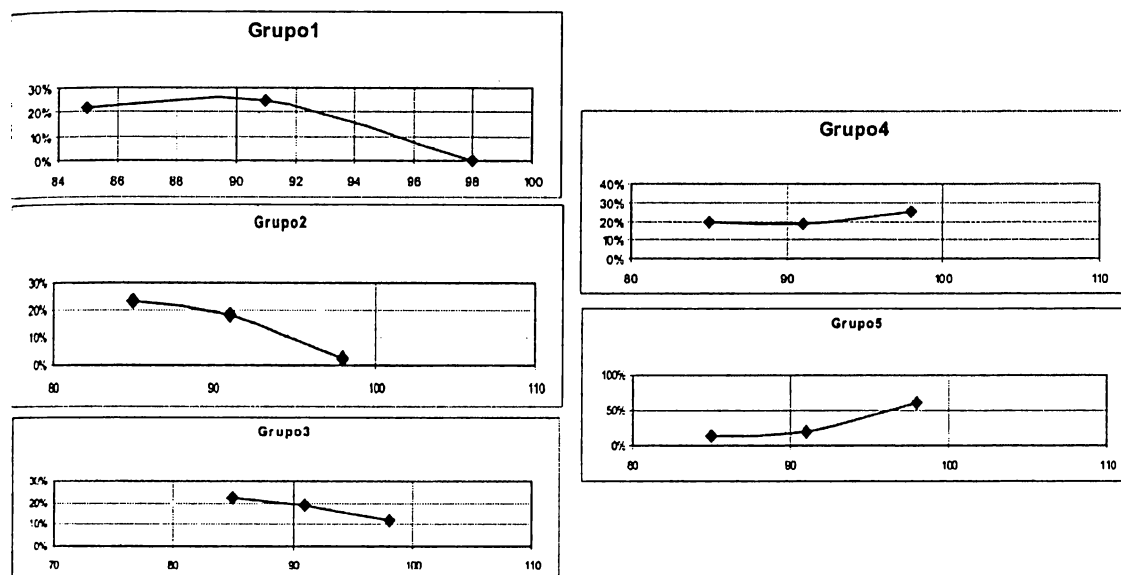


Figura 7.  
Porcentajes de participación para  
cada grupo ( $r'$ ), (a partir de 1900).

Se realizó una proyección lineal de la participación por grupo ( $r'$ ) para reflejar la dinámica de cada grupo en particular. Como se puede observar los grupos 1 y 2 (áreas de fragmentos mayores) ya no se encuentran presentes, el grupo 3 tiende a disminuir drásticamente, mientras que el grupo 4 conserva su participación porcentual y el 5 la incrementa. Esto es consecuente con la mayor fragmentación del bosque remanente en el cual ya no se encuentran parches lo suficientemente grandes para que en ellos se pueda dar colonización de los grupos 1 y 2. Como se observa en la Tabla 3, esta proyección sobrepasa el 100% y por lo tanto se ajustan los porcentajes ( $r'$ ) de manera que el área a repartir (5893 Has) sea el 100%.

	$r'_{2005}$	$r'_{2005}$	Area (Ha) $C'_{2005}$
Grupo1 :	0%	0%	0.0
Grupo2 :	0%	0%	0.0
Grupo3 :	3%	2%	129.0
Grupo4 :	32%	23%	1376.5
Grupo5 :	102%	74%	4387.5
Total	137%	100%	5893.0

Tabla 3.  
Área a colonizar al 2005 por grupo.

#### 4.4. Construcción de la Imagen Futura de Bosques

##### 4.4.1. Cálculo del número de centroides futuros por cuadrante por grupo

Consecuente con el planteamiento de que el número de centroides por cuadrante en la zona de estudio es una variable aleatoria y con los resultados de la prueba Chi cuadrado, en el sentido de que se puede aceptar que dicha variable aleatoria se distribuye normalmente, al menos para los grupos 4 y 5, se determina el número de centroides ( $n'_{2005}$ ) que contendrá cada grupo para el año 2005. Para lo cual, se acude a la generación de números aleatorios normales para los cuadrantes de los grupos 4 y 5, teniendo en cuenta la media teórica y la desviación estándar teórica, las cuales se calcularon proyectando linealmente al 2005.

Tabla 4.  
Proyección de media y desviación

Media ( $n^I$ )	77-85	85-91	91-98	Proyección	
				( $n^I_{2005}$ )	
Grupo3	6.7	3.2	0.5	0	
Grupo4	33.8	17.8	7.7	3.69	
Grupo5	143.2	291.9	352.6	372	

Desv. Est. ( $\sigma_n^I$ )	77-85	85-91	91-98	Proyección	
				( $\sigma^I_{2005}$ )	
Grupo3	3.5	2.4	1.1	0.00	
Grupo4	11.9	6.7	7.8	1.51	
Grupo5	34.8	90.4	218.9	345.96	

Con los valores teóricos de la Tabla 4, se generaron los números aleatorios normales que representan el número de centroides futuros para cada uno de los cuadrantes (70 cuadrantes en total). Luego se calcula el número de centroides real teniendo en cuenta la relación del área total del cuadrante con el área de municipio contenida en él.

Se estimaron las áreas del polígono (círculo) a asociar a cada centroide a efecto de garantizar que el área total colonizada coincida con la proyección para ese año. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5.  
Área de centroides futuros para los grupos 4 y 5.

Grupo	$C^I_{2005}$	Centroides Totales ( $n^I_{2005}$ )	Área media ( $a^I_{2005}$ )
G4	1376.5	171	8.050
G5	4387.5	16164	0.271

Dado que el grupo 3 no pasó la prueba de ajuste, además de que su proyección de media y desviación es cero y el área a repartir es tan pequeña (2% del área total), la distribución de su área no se realizó por cuadrantes sino para todo el municipio, como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6.  
Área y cantidad de centroides futuros para el grupo 3.

Grupo	$C^I_{2005}$	( $a^I_{2005}$ )	( $n^I_{2005}$ )
G3	129.0	16.48	7.83

Para los grupos 4 y 5 la colocación de los centroides a cada cuadrante se hace sobre las zonas de bosque de 1998 de forma aleatoria. Esto se logra seleccionando el área boscosa de cada cuadrante y ejecutando un sub-programa disponible en la herramienta GIS que permite la localización aleatoria de puntos al cual basta con especificarle el número de centroides a generar. Alrededor de cada centroide se localiza un círculo con un radio tal que su área sea  $a^I$

Con esto se generaron tres áreas de influencia a través de la función "Buffer" (una para cada grupo) y luego se unieron en una sola capa correspondiente a la zona total a colonizar desde 1998 hasta 2005. En la Figura 8 se muestra la colonización 98-05 total del municipio para los tres grupos de colonización, la cual conforma un área de 5457 Has.

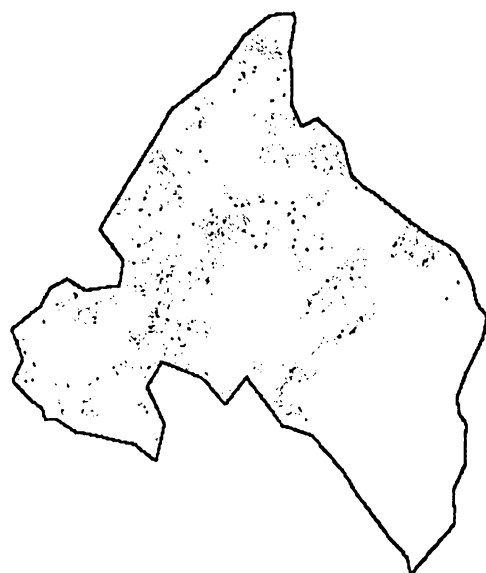


Figura 8.  
Imagen de Colonización futura

#### 4.4.2. Resta de los bosques de 1998 con la colonización al 2005

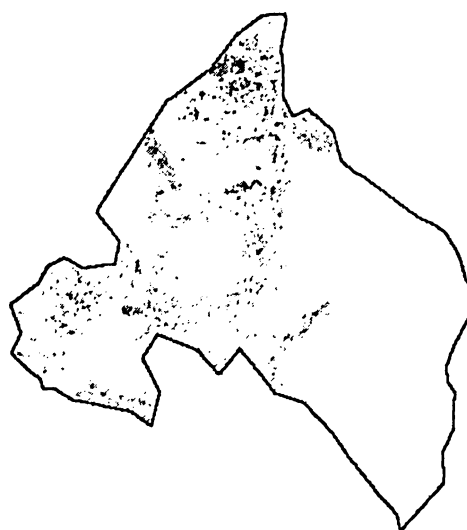
A la imagen de bosques del 98 se le resta entonces la capa de colonización al 2005 para de esta manera generar la imagen futura de bosques del 2005.

$$\text{Bosque 1998} - \text{Área colonizada 98-05} = \text{Bosques 2005 ;}$$

En la Figura 9 se observa la imagen de bosques de 1998 y la nueva imagen a 2005, respectivamente.



Bosques 1998



Bosques 2005

Figura 9.  
Bosques 1998 y 2005

En la Figura 10, a continuación, se presenta un resumen de los resultados del proceso de colonización que se llevó a cabo desde 1977 hasta 1998 y lo que se proyecta al 2005:

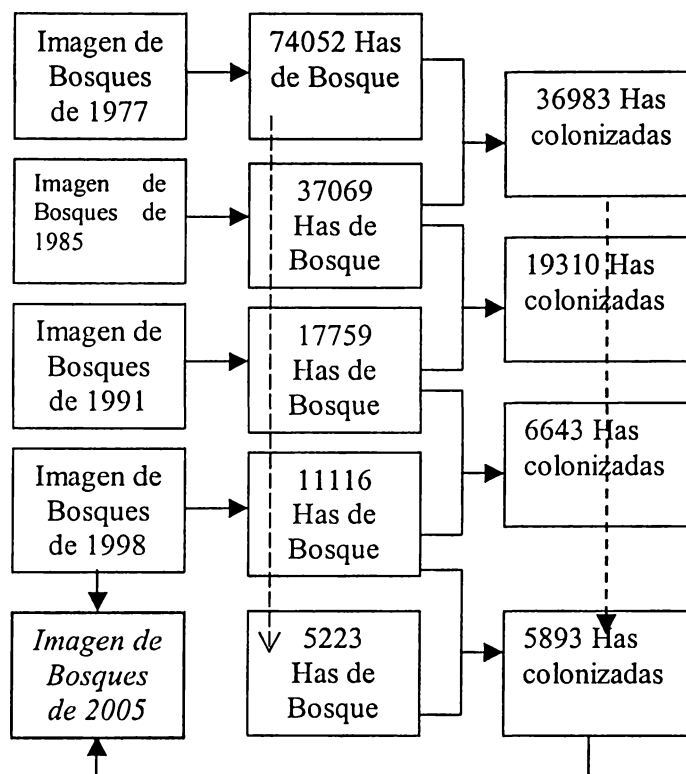


Figura 10.  
Resultados numéricos del Proceso

## 5. CONCLUSIONES

1. Los análisis multitemporales son una poderosa herramienta que los SIG y los sensores remotos ofrecen para la determinación de comportamientos espacio temporales de cualquier fenómeno ambiental con componente geográfica. Este tipo de análisis permite determinar cuantitativamente la evolución de las dinámicas espaciales para fines de proyección temporal de las mismas, lo cual se convierte en una herramienta fundamental de planificación ambiental y de ordenamiento territorial.
2. La metodología presentada en este trabajo apunta a la utilización de un enfoque numérico que permita la proyección de variables ambientales con componente geográfica, mediante el uso de herramientas estadísticas.
3. La colonización del bosque es un fenómeno que debe estudiarse de forma detallada y geográficamente referenciada con el fin de entender mejor su dinámica.
4. Tanto la separación de los fragmentos de colonización en grupos de acuerdo con su tamaño, como la creación de cuadrantes o subescenas del área de estudio, son técnicas fundamentales en el análisis del comportamiento estadístico del fenómeno. Estas técnicas son una aproximación práctica a la aplicación de la teoría de campos aleatorios, base de la geoestadística.
5. En San Vicente del Chucurí (Santander, Colombia), es evidente que con el tiempo los grupos grandes de colonización (1 y 2) disminuyen drásticamente en cantidad ya que a medida que

la colonización avanza los bosques grandes se van fragmentando y desintegrando y por lo tanto cada vez quedan menos áreas grandes por colonizar. Todo lo contrario ocurre con los grupos pequeños, que obedeciendo a esta fragmentación van aumentando con el tiempo.

6. De acuerdo a lo que se demostró en la prueba Chi cuadrado, estos grupos pequeños obedecen espacialmente ( en los cuadrantes ) a una distribución normal.
7. El avance cuantitativo de la colonización del bosque tiene un comportamiento marcadamente exponencial tal como puede observarse en la curva de proyección de las áreas bosques. Es importante tener esto en cuenta para no suponer tasas lineales a la hora de proyectar la colonización y las cantidades de bosque remanente.
8. Si las tendencias de colonización continúan puede afirmarse claramente que el bosque de San Vicente del Chucurí habrá desaparecido totalmente para el año 2025. Esta proyección supone la preservación en el tiempo de algunas condiciones, entre ellas, que la población del municipio se mantenga relativamente constante. Un aumento significativo de dicha población, muy seguramente implicaría una aceleración del proceso colonizador.
9. En el estudio de la colonización del bosque, la determinación de las tasas de colonización, su proyección en el tiempo y su intento de localización geográfica futura puede servir de base en el estudio de fragmentación de ecosistemas y en la planificación del uso de recursos naturales.
10. Las imágenes futuras arrojadas por este tipo de modelos y metodologías de proyección, son una aproximación al comportamiento futuro del fenómeno de estudio, pues preservan características estadísticas históricas. Si bien el mapa preciso de bosques para el año de proyección es imposible de prever, lo que se intenta es que preserve algunas características históricas del proceso de colonización.
11. Como complemento a esta metodología de proyección puede incluirse el estudio de patrones geográficos de colonización del bosque con respecto a los principales ejes de colonización como vías y drenajes para obtener conclusiones al respecto, así como el contraste de las proyecciones aquí realizadas con los datos reales de la fecha de proyección (2005), a efectos de corroborar la representatividad estadística de la metodología
12. Para un tratamiento más riguroso del fenómeno de colonización del bosque puede hacerse uso de la Dinámica de Sistemas como complemento y apoyo en la proyección de las variables socioeconómicas que intervienen en él.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- Angel, E. 2000. Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones Ambientales. Universidad Nacional de Colombia.
- Castaño C. M. 2002. Los SIG como herramienta de proyección de variables ambientales: Colonización del bosque. Trabajo de grado. Especialización en Gestión Ambiental. Universidad de Antioquia.
- Castaño, C. M. y Paz, S. 1997 Los Sistemas de Información Geográfica como una herramienta de Planificación Ambiental. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid.
- Etter, A. y Andrade, A. 1987. Seguimiento de la Colonización en la Amazonía Colombiana, el caso de San José del Guaviare (1973-1986). CIAF, IGAC, Bogotá. II SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE SENSORES REMOTOS. Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER).
- IGAC. 1983. Mapa de bosques. Bogotá.

- Ir. G. Sicco Smit. The Destructive Human Influence on Tropical Rain Forest Monitored on Remote Sensing Imagery (A Case Study of the Region "Río Caguan – Río Guayas" Colombia). ITC, the Netherlands. II SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE SENSORES REMOTOS. Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota (SELPER).
- Little, P. E. 1992. Ecología Política del Cuyabeno. Edición Abya-Yala. Quito.
- Molano A. 1987. Selva Adentro: Una historia oral de la colonización del Guaviare.
- Robert C. F. 1998. Remote Sensing for Landscape Ecology. University of Cincinnati, Ohio.
- Sawanda. M. 2002. Instructions to Use the Random Point-in-Polygon Generation Program (VBA Macro). University of Ottawa.
- Spot Image Corporation. 1999. Imágenes de satélite, una guía objetiva.
- Parra, R., Marulanda, S. y Escobar, J. F. 1997. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Sistemas de Información Geográfica, Base de la Gestión Ambiental. Departamento de Ciencias Forestales.
- Villegas, C.I. y Zambrano, A.M. 1996. La Dinámica de Sistemas como una herramienta de Planeación Ambiental. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia.

