



**Proyecto ECOMERCADOS, FONDOS GEF – ECOMERCADOS
CONVENIO DE DONACIÓN TF 023681**

CONTRATO DE SERVICIOS DE CONSULTORÍA:

Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal De Costa Rica 2005.

I. Parte:

**Clasificación de la Cobertura Forestal con
Imágenes Landsat ETM+ 2005.**

Equipo de Trabajo:

Dr. Arturo Sánchez-Azofeifa (Coordinador, U. Alberta)
Dr. Julio C. Calvo-Alvarado (Coordinador, ITCR).
Ing. MeiMei Chong (U. Alberta)
Ing. Mauricio Castillo (ITCR)
Ing. Vladimir Jiménez (ITCR)



Mayo 2006

Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat 2005

INDICE

Resumen:.....	3
1.1. Antecedentes del estudio.....	5
1.1.1. Origen del Estudio.....	5
1.1.2. Objetivos del Estudio.....	5
1.1.3. Tareas específicas del estudio.....	6
1.2. Metodología.....	7
1.2.1. Aspectos Generales.....	7
1.2.2. Selección imágenes de satélite y problemas en el sensor Landsat ETM+.....	7
1.2.3. La Metodología NASA Pathfinder para Bosques Húmedos:.....	10
1.2.3.1. Descripción general de la metodología:.....	10
1.2.3.2. Descripción específica del proceso de clasificación:.....	13
1.2.4. Metodología para el análisis de la Región Chorotega.....	15
1.2.5. Metodología para el análisis de la Península de Osa:.....	18
1.2.6. Estimación del error de la clasificación:.....	18
1.3. Resultados.....	18
1.3.1. Resultados generales de Clasificación para Costa Rica.....	19
1.3.2. Resultados de la Clasificación por Áreas de Conservación del SINAC.....	21
1.3.3. Evaluación de Precisión de la Clasificación.....	26
1.3.4. Resultados de Clasificación para la Región Chorotega.....	26
1.4. Discusión de Resultados.....	29
1.4.1. Resultados generales de la Clasificación para Costa Rica.....	29
1.4.2. Resultados de la Clasificación por Áreas de Conservación del SINAC.....	30
1.4.3. Evaluación de Precisión de la Clasificación.....	32
1.4.4. Resultados de Clasificación para la Región Chorotega, Costa Rica.....	32
1.5. Conclusiones.....	33
1.6. Recomendaciones.....	35
1.7. Reconocimientos.....	35
1.8 Referencias.....	36

I. Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat 2005

Resumen:

El Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), a través de una donación del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento –BIRF, en su calidad de Agente Implementador del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, siglas en inglés), recibió una donación para sufragar el Proyecto Ecomercados. Dicho proyecto tiene como meta evaluar el estado de la cobertura forestal de Costa Rica para el año 2005 empleando tecnología satelital. El estudio de evaluación fue realizado en forma conjunta por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y la Universidad de Alberta (Canadá).

Con el propósito de generar resultados comparables a los estudios de cobertura forestal previamente realizados, este estudio se basó en la clasificación de imágenes satélite Landsat ETM+ del año 2005, excepto por la imagen de Limón que fue del año 2004. La metodología empleada cumple con los procedimientos aceptados internacionalmente para el monitoreo de la deforestación tropical y que se han utilizado en todos los estudios oficiales de cobertura forestal de Costa Rica. En este nuevo estudio debido a los problemas que la fenología de bosques secos presenta, una nueva metodología que fue desarrollada e implementada en la región Chorotega.

Los datos generados por este estudio permiten concluir que el país continúa experimentando un proceso de recuperación de cobertura forestal. Para el 2005 el porcentaje del territorio nacional con cobertura forestal es del 48%, sin contar con las áreas de manglares, páramos y plantaciones forestales. De toda la cobertura forestal existente apenas un 43% (1,050,015 ha) esta bajo algún grado protección¹, mientras que un 57% (1,381,147 ha) esta fuera de las distintas unidades de protección. También se debe señalar que de la cobertura forestal fuera de áreas protegidas un total de 451,500 ha han estado esta bajo conservación con el Pago de Servicios Ambientales en el periodo 1997-2005 (<http://www.fonafifo.com>); esta área equivale al 18% de la cobertura forestal nacional al 2005, o al 32% de la cobertura fuera de las área protegidas. Durante el periodo 2000-2005 la cobertura forestal aumentó en 125,000 ha como resultado de procesos de recuperación, mientras que la pérdida de cobertura fue de 34,300 ha. Esto equivale a una tasa anual de recuperación de 1.19% y una tasa anual de pérdida del 0.29%. De esta forma la recuperación es de más de 4 veces la tasa de pérdida.

¹ Las categorías de área protegidas incluidas aquí son: Parques Nacionales, Parques Internacionales, Reservas Biológicas, Reservas Absolutas, Refugios de Vida Silvestre, Humedales Nacionales, Zonas Protectoras y Reservas Forestales. Todas bajo la tutela del Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE). No se incluyen las Reservas Biológicas Privadas.

Desde un punto de vista regional 4 frentes de deforestación pudieron ser detectados, estos son: Llanura de San Carlos, Tortuguero, Cuenca Media de los ríos Tulín/Parrita y Valle de Coto Brus. En estos mismos frentes ocurren igualmente los procesos de recuperación, con lo cual la fragmentación y restauración del paisaje adquiere un carácter muy dinámico. Mientras que los procesos de deforestación han perdido en algunas partes del país su carácter frontal, los procesos de recuperación van conformándose en un frente en torno a los bloques de bosques más importantes del paisaje. Las Áreas de Conservación (AC) que enfrentan los niveles de pérdida de cobertura más preocupantes durante el período 2000-2005 son: AC-Arenal Huertar Norte (7,429 ha), AC-Tortuguero (4,890 ha), AC-Pacífico Central (5,957 ha) y AC-La Amistad Pacífico (8,931 ha). Las causas de esta pérdida obedecen a factores socioeconómicos particulares para cada región y merecen ser estudiados para su correcta interpretación, lo cual asistirá en el diseño de estrategias para reducir al mínimo estos procesos. Pero igualmente merece estudiarse los procesos de recuperación, dado que si se desea consolidar estas áreas para mejorar la conectividad del paisaje, la calidad de hábitat y la producción de servicios ambientales, se debe definir una estrategia considerando que estas áreas de recuperación son muy vulnerables a ser deforestadas de nuevo.

La región Chorotega, dominada por bosques caducifolios, ha experimentado durante las últimas décadas un proceso de recuperación de cobertura forestal único en el país. Al 2005 esta región tiene 515,000 ha de bosques, lo que equivale al 52% de toda su extensión. Del total de la cobertura de bosques un 64% se clasificaron como tardíos, un 20% como tempranos y un 16% como intermedios. Esta región es la que tiene el proceso de recuperación más agresivo, sin embargo es la región que tiene menos área bajo protección dado que sólo un 14% del total de cobertura forestal está de alguna forma protegida.

La información generada en este estudio es muy rica para realizar diferentes análisis, que podrán ser efectuados por diferentes investigadores, instituciones y organizaciones. Esto permitirá continuar con la evaluación del impacto de las políticas de conservación, forestales y del pago de servicios ambientales en la contención de la deforestación a nivel nacional. Así mismo la información generada permitirá continuar con la evaluación y planificación de corredores biológicos, áreas de protección, manejo de cuencas hidrográficas y todo tipo de estudios destinados a la gestión de proyectos de conservación y desarrollo sustentable de recursos naturales.

Debido al alto porcentaje de cobertura forestal del país, a la constante recuperación de cobertura forestal y a las limitaciones en continuar creando más áreas protegidas, es necesario diseñar una estrategia que consolide la cobertura forestal nacional. Esta estrategia debe estudiar las causas socioeconómicas que han impulsado los procesos de recuperación y deforestación, solo así se podrá diseñar una estrategia exitosa y congruente con el marco institucional, legal y financiero que tiene disponible el país.

1.1. Antecedentes del estudio.

1.1.1. Origen del Estudio.

El Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), como parte de sus funciones ha gestado la realización de los estudios de cobertura forestal de Costa Rica para los periodos 1987/1997 y 1997/2000 empleando imágenes satélite Landsat TM y ETM+. Dichos estudios se han promovido con el fin de mantener un monitoreo constante del estado de cobertura forestal del país. El uso de estos estudios ha sido amplio, variando los mismos desde su aplicación a la definición de políticas/estrategias forestales y de conservación, y así como la verificación de la efectividad de los programas de pago de Servicios Ambientales, aspecto esencial en la misión del FONAFIFO. En Julio del 2005, FONAFIFO, invitó a la Universidad de Alberta y al Instituto Tecnológico a presentar una oferta de servicios a través de la FUNDATEC (Fundación Privada del Instituto Tecnológico de Costa Rica), con el objetivo de realizar un nuevo estudio del estado de la Cobertura Forestal para los años 2004-2005. En esta ocasión el FONAFIFO cubriría los costos del nuevo estudio con una donación del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF), que es el agente implementador del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), quien sufraga parcialmente el proyecto ECOMERCADOS. En Agosto 2005, FUNDATEC, presentó su oferta técnica a FONAFIFO y después de los trámites correspondientes el contrato de servicios se oficializó en el mes de Octubre del mismo año.

1.1.2 Objetivos del Estudio.

De acuerdo con los términos de referencia y la oferta técnica hay dos objetivos principales:

- a) Detectar y clasificar la cobertura forestal de Costa Rica empleando imágenes Landsat ETM+ 2004-2005, realizando una comparación respecto a las capas de cobertura de los años 1997 y el 2000, con especial énfasis en los frentes de deforestación detectados previamente.
- b) Detectar y clasificar los bosques secundarios de la Región Chorotega y Península de Osa, empleando imágenes Landsat ETM+ 2004-2005. Para la Región Chorotega la clasificación se aplicará para tres estados sucesionales y en la Península de Osa para dos estados sucesionales.

1.1.3. Tareas específicas del estudio.

- A)** Procesamiento de Imágenes de Satélite. Clasificación e interpretación de las imágenes satélites de los años 2004-2005, para todo el territorio nacional de manera general (bosque y no bosque).
- B)** Procesamiento de Imágenes Satélite para la Región Chorotega: Para esta región, el protocolo propuesto de clasificación será basado en estudios desarrollados por la Universidad de Alberta y el Instituto Tecnológico de Costa Rica en la Península de Nicoya (Arroyo-Mora et al. 2003, Castro et al. 2003, Sánchez-Azofeifa et. al 2002, Sánchez-Azofeifa et. al 2003). Estos protocolos de interpretación de sensores remotos son considerados de carácter innovador ya que los mismos no solamente consideran aspectos de reflectancia espectral, pero también consideran variables de carácter ecológico, que una vez integradas permiten desarrollar mapas de estado sucesional en la región indicada. Para esta región se clasificará la cobertura en tres estados sucesionales: Tardío, Intermedio y Temprano.
- C)** Procesamiento de Imágenes Satélite para la Región de Osa. Para esta región se empleará comparaciones históricas del cambio de cobertura para clasificar la cobertura forestal dos categorías. Tardío/Intervenido y Secundario.
- D)** Delimitación de las áreas especiales de estudio. El estudio se concentrará en la Región Chorotega definida por el MIDEPLAN e incluida en la imagen Landsat ETM+ Código WRS2 16/53. La Península de Osa será definida en forma conjunta con el FONAFIFO y esta contenida en la imagen Landsat ETM+ Código WRS2 14/54 Península de Osa.
- E)** La escala final de Mapeo para los estudios será 1:200,000 con el fin de que sea compatible con los estudios realizados anteriormente y a los convenios internacionales. Esta escala permite una unidad mínima de mapeo de 3.0 ha, que es bastante precisa para los propósitos de FONAFIFO.
- F)** Preparación de base de datos de áreas de plantaciones y café. Dado que se ha detectado en estudios anteriores errores de clasificación debido a la presencia de plantaciones forestales y café (con o sin sombra) en este estudio se realizará un trabajo especial en levantar una base de datos espacial sobre las áreas de plantaciones forestales, plantaciones de frutales y de café con y sin sombra.
- G)** Entrenamiento y llave de ERDAS-Imagine. La Universidad de Alberta entrenará a dos técnicos de FONAFIFO en aplicación de sensores remotos, así mismo entregará

bajo convenio una llave ERDAS-Image al FONAFIFO en calidad de préstamo para realizar los estudios de validación del mapa de cobertura forestal que el FONAFIFO considere pertinente.

1.2. Metodología.

1.2.1. Aspectos Generales.

La implementación del monitoreo de la cobertura forestal de Costa Rica es parte de un seguimiento sostenido de los investigadores de este estudio para FONAFIFO que se comenzo desde 1997. Este estudio sigue la misma metodología de los estudios previos (CIEDES-CCT-CI. 1998, U. Alberta-CCT. 2002) con el fin de asegurar la compatibilidad de resultados anteriores. El estudio aplicó una metodología definida por el proyecto de la NASA denominado: NASA Pathfinder (Skole and Tucker, 1993). El proyecto NASA Pathfinder es una iniciativa de carácter internacional orientada a estandarizar estudios espaciales de deforestación en zonas tropicales (Brasil, el Sureste Asiático y África Central). Este enfoque asegura que los resultados de este estudio son producto de una metodología internacionalmente aceptada para el monitoreo de la deforestación de bosques tropicales.

Debido a los problemas detectados en estudios anteriores en el bosque seco tropical (Pfaff et al. 2000, Sánchez-Azofeifa et al. 2001), la metodología seguida ha sido dividida en dos componentes tomando en cuenta el tipo de bosque presente: a) la metodología de NASA Pathfinder para el bosque húmedo del país y b) una metodología especialmente desarrollada para la Región Chorotega, dominada por bosque seco tropical o bosques húmedos caducifolios por el efecto de una fuerte estación seca (Kalacska 2004b, Arroyo 2005).

1.2.2. Selección imágenes de satélite y problemas en el sensor Landsat ETM+.

Un total de 5 imágenes de satélite fueron seleccionadas por medio de los archivos del United States Geological Survey (USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov>). El Cuadro 1.1 presenta la fecha y la cobertura de nubes presente en las imágenes seleccionadas. Una limitación importante en este tipo de estudios es el problema en el sensor Landsat ETM+,

que produce un conjunto de bandas negras que se generan en forma aleatoria a la largo de la imagen. Este problema se debe al mal funcionamiento de los espejos en el sensor ETM+. El daño en los espejos crea básicamente bandas que incrementan su anchura conforme se distancian del centro de la imagen. En otras palabras las bandas no se presentan en el área central de la misma, pero las mismas se incrementan en forma significativa hacia los bordes de las imágenes. Este es un problema importante que se ha denominado "SLC-Off" y que afecta todas las imágenes de satélite adquiridas por el ETM+ a partir del 14 de Julio del 2003. El problema del SLC-Off no es sistemático y la presencia de la banda no se da siempre en el mismo lugar sino que cambia de imagen a imagen.

Cuadro 1.1.

Imágenes utilizadas en el Estudio y corregidas por el efecto de SLC-Off

Path/Row	Código	Fecha	Porcentage de Nubes
15/53	San José	2005-Feb-02 ¹	28%
16/53	Guanacaste - Seco	2005-Feb-25 ²	3%
16/53	Guanacaste - Lluvioso	2005-Ene-24 ³	8%
14/53	Limón	2004-Feb-25 ⁴	4%
14/54	Osa	2005-Mar-15 ⁵	21%

Nota: Estas imágenes están afectadas por el problema de Landsat ETM+ conocido como "SLC-off" y las mismas fueron corregidas siguiendo los procedimientos recomendados por NASA.

1. Corregida con imagen del 2004-01-31
2. Corregida con imagen del 2005-02-09
3. Corregida con imagen del 2004-01-25
4. No corregida debido a falta de imagen sin nubes
5. No corregida debido a falta de imagen sin nubes

La Figura 1.1.A. presenta una descripción detallada del problema asociado con el "Scan Line Corrector (SLC)". Una solución parcial a este problema ha sido la desconexión del sistema de Scan Lines (modo Off), de tal manera, que todas las imágenes Landsat ETM+ adquiridas a partir del 14 de Julio del 2003 se denominan "SLC-Off". Este problema afecta a todas las imágenes de satélite utilizadas en este estudio. La solución provista por el USGS para este problema es la utilización de imágenes adquiridas en la misma época para ser empleadas en un proceso orientado a llenar los espacios de las bandas negras mostrados en las Figura 1.1.B. Este proceso de corrección se denomina "Nivel 1G con relleno de banda". Este proceso involucra el uso de dos imágenes adquiridas en dos fechas diferentes pero dentro de la misma época o año. La solución es parcial y permite rellenar parte de los problemas en el centro de la imagen, pero los mismos son persistentes en los bordes. En términos

generales esta solución parcial deja a 1/3 de la imagen aún con limitaciones. La Figuras 1.2 presenta un ejemplo de la corrección obtenida por medio del proceso 1G. En las imágenes utilizadas en este estudio, solamente las imágenes de Guanacaste, y San José recibieron la corrección parcial 1G. La imposibilidad de obtener imágenes con poca cobertura de nubes no permitió esta corrección en la imagen de Limón y Osa. En este caso las imágenes de Limón y Osa se correlacionaron lo más que se pudo con la imagen clasificada del 2000, con el fin de poder llenar los espacios vacíos producto del "SLC-Off". En el caso del las imágenes de Guanacaste y San José, se trató en lo posible de llenar estos espacios, pero aún quedaron áreas problemáticas que no se pudieron resolver y las mismas fueron clasificadas como no bosque.

Finalmente y con el fin de uniformizar el proceso de comparación con los mapas generados en el estudio del FONAFIFO de 1987/1997 1997/2000 (CIEDES-CCT-CI. 1998, U. Alberta-CCT. 2002), se procedió a crear una máscara de nubes que es consistente a lo largo de los tres años analizados. Esta máscara de nubes, permite cuantificar en forma consistente los cambios en la cobertura forestal utilizando una matriz de cambio uniforme.

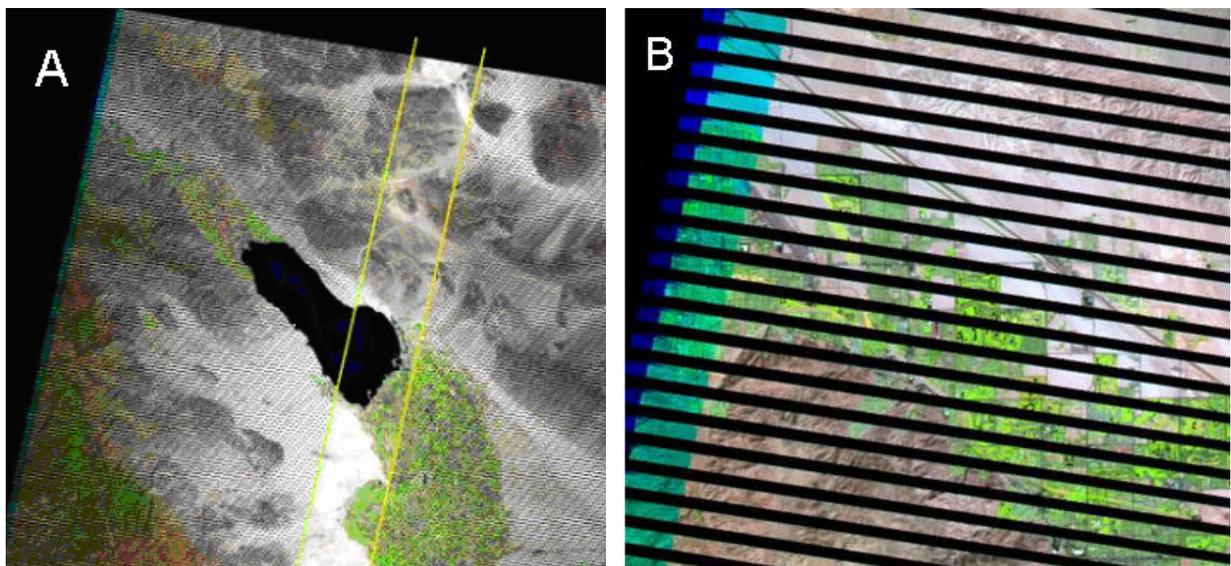


Figura 1.1: A) Ejemplo del problema SCL-Off en el sensor Landsat ETM+. Nótese el incremento del problema del centro de la imagen hacia sus bordes. B) Detalle del problema SLC-Off en una imagen adquirida por el sensor ETM+ después del 14 de Julio del 2003.

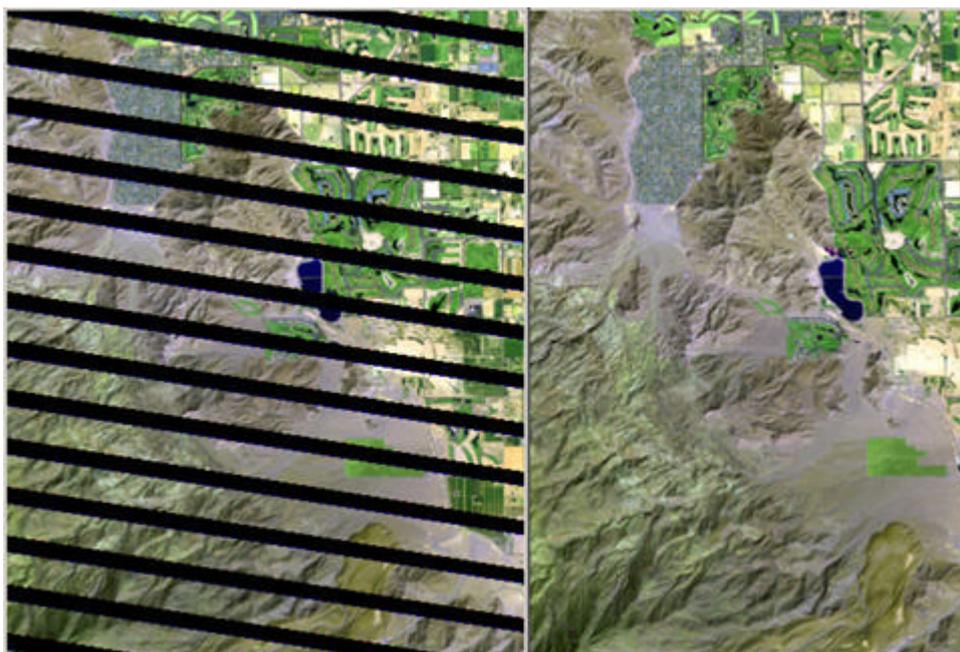


Figura 1.2: Efecto de la corrección 1G en una imagen Landsat ETM+ afectada por el SLC-Off.

1.2.3. La Metodología NASA Pathfinder para Bosques Húmedos:

1.2.3.1. Descripción general de la metodología:

El método de Clasificación designado por NASA Pathfinder como clasificación en parejas (Lilliesand, 2000) fue usado para clasificar la cobertura forestal de Costa Rica en el área de bosque lluvioso para el año 2005. Para esto se empleó el programa Leica Geosystems ERDAS Imagine 9.0 (Cuadro 1.1). Analistas entrenados interpretaron los mapas temáticos resultantes del proceso matemático aplicado a las imágenes para la separación en 50 grupos de reflectancia espectral similar. Las clases principales extraídas fueron: bosque, no bosque, manglares, nubes, sombras de nubes, aguas continentales y urbanas. Para casos en los cuales se presentaron confusiones de clases, éstas fueron aisladas y extraídas de los datos originales y re-procesadas mediante un proceso definido como "clasificación jerárquica". Este proceso permite una separabilidad aumentada de las clases que se confunden; mejorando de esta manera la clasificación final.

La clasificación jerárquica o hyper-agrupamiento (Hyperclustering en inglés) permite que

clases desconocidas o mezcladas se puedan extraer para reducir la "confusión" espectral. De esta manera es posible la distinción de clases específicas dentro de otras más grandes. Cualquier dato de referencia como agricultura o plantaciones forestales o aquellos usados como referencia en este proyecto proveerán clases de cobertura que pueden ser identificados y de esta manera excluidos del análisis. Reduciendo el tamaño de los datos de entrada, por medio de la eliminación porciones de la imagen de satélite donde se encuentran los datos de referencia conocidos, es posible que secciones de los valores del histograma sean omitidos; permitiendo de esta manera que los restantes valores en el histograma sean reacomodados. Este proceso se repite interactivamente durante la clasificación no supervisada. La técnica anterior reduce la confusión y aumenta la capacidad de llevar a cabo una mejor identificación visual de las clases de cobertura vegetal. El proceso de identificación visual es la parte más difícil y lenta del proceso de clasificación supervisada.

Debido a la vegetación densa de Costa Rica, la diferencia entre bosque y no bosque es a veces de fácil identificación. Sin embargo, cuando se trata con las regiones de bosque seco la diferencia no es siempre visible. Durante la estación seca las áreas que contienen bosques secos aparecerán como si no tuvieran cobertura foliar. Con el fin de resolver este problema, varias imágenes con distintos niveles de fenología son utilizadas. Si no existen imágenes de época seca y lluviosa para un área; el analista debe confiar en el conocimiento de expertos y todos los datos de campo disponibles.

La cobertura de nubes es otro problema en la región noreste de Guanacaste. A pesar de esto, se ha establecido un proceso para rellenar las zonas ocultadas por las nubes o la neblina, ya que se cuenta con un juego de imágenes suplementario para esta imagen. Debido a la variabilidad de la cobertura de nubes a través del año, se pudieron utilizar múltiples juegos de imágenes para llenar los espacios ocultos por las nubes. De igual manera, la información obtenida del mapa de la región creado en el 2000, fue utilizada para rellenar los datos ocultos por las nubes en el mapa del 2005. Modificaciones manuales se requirieron para proveer una transición suave entre la clasificación original y los datos suplementarios. En este caso las modificaciones fueron realizadas por el analista, basado en la interpretación de los datos circundantes e información suplementaria.

Utilizando la misma técnica fueron rellenadas las áreas con valores de "no data". Debido a que la órbita del satélite se desvía ligeramente con el tiempo y que dependiendo del período del año la desviación no es constante, el área cubierta por las imágenes varía ligeramente.

Debe notarse que en el 2005 el área de la imagen no incluye una pequeña porción de la frontera norte del país (Ver círculos rojos en Figura 1.2). De igual manera una pequeña porción del área de estudio en el centro-sur, tampoco estuvo disponible (Figura 1.2). Sin embargo después de compilar 4 escenas individuales, estas regiones fueron "rellenadas" utilizando los datos del Mapa del año 2000, ajustándolos al mapa final.

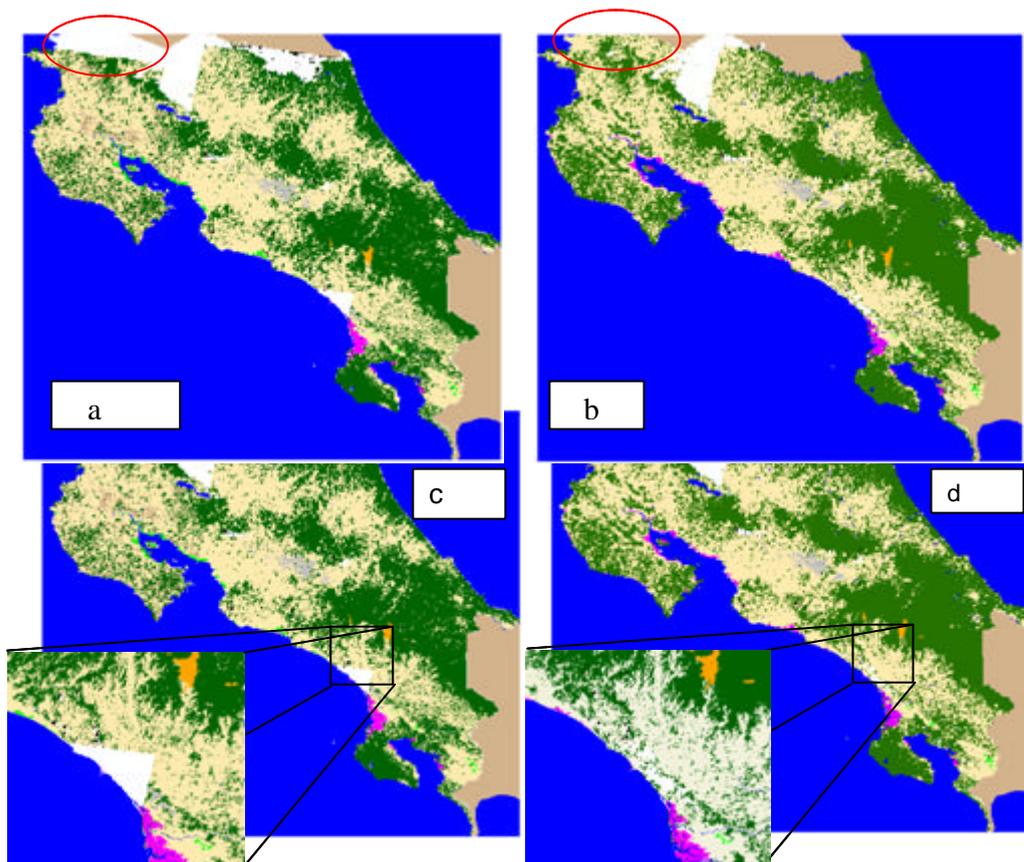


Figura 1.2: Efecto de corrección de nubes. La figura (a) muestra la corrección antes y la (b) el resultado final. Segmento faltante (c) y (d) reposición de segmento.

Una vez realizada la clasificación de toda el área de estudio, se realizaron algunos procesos de control de calidad en los datos antes de obtener el producto final. Las uniones entre las cuatro imágenes satelitales fueron manualmente modificadas para proveer una cobertura sin uniones del producto. Un procesamiento de *unidad mínima de mapeo (umm)* fue aplicado para eliminar el ruido y el efecto de "salpicado" en el mapa, además de obtener un producto estéticamente aceptable. Con la aplicación de un *umm* de 3ha los datos son

analizados mediante un *Filtro de Mayoría 3 x 3* para disminuir el tiempo de procesamiento. El filtrado no compromete la *umm* ya que todas las áreas menores a 3.0 ha son disueltas e integradas a la clase adyacente de mayor área. Luego, los datos son exportados de formato *raster a vector* utilizando ERDAS Imagine 9.0. Finalmente, utilizando ArcInfo Workstation, se calculó el área para los polígonos resultantes y todas las áreas menores a 3ha fueron seleccionadas y disueltas. El resultado final es el mapa de cobertura vegetal.

1.2.3.2. Descripción específica del proceso de clasificación :

La metodología NASA Pathfinder para bosques húmedos ha sido ampliamente explicada por Skole y Tucket (1993) y Sánchez-Azofeifa (2001). Esta metodología está basada en una interpretación semi-automática de imágenes del satélite Landsat Mapeador Temático (TM por sus siglas en inglés) y consiste en siete fases:

Fase No. 1: Limpieza de nubes y aguas continentales. Nubes, sombra de nubes y aguas continentales (lagos, reservorios y ríos) son extraídas de la imagen utilizando una clasificación sin-supervisar. Estas clases son utilizadas para crear una máscara la cual se le aplica a la imagen con el fin de simplificar la clasificación. Esta máscara es agregada al mapa final una vez que todos los controles de calidad han sido establecidos.

Fase No. 2: Georeferenciación de las imágenes. Todas las imágenes adquiridas en este proyecto fueron georeferenciadas a las imágenes utilizadas en el estudio del año 1997. Estas imágenes son consideradas las imágenes "master" para cualquier estudio de deforestación en Costa Rica dado el alto nivel de precisión y detalle que las mismas tienen. El procedimiento anterior asegura que no se dan problemas de desplazamiento vertical o lateral que pueden, eventualmente, confundirse con problemas en la clasificación. Las imágenes de comparación del estudio del año 2000 fueron también geo-referenciadas (imagen a imagen) a las imágenes de 1997. Lo anterior asegura una consistencia para cualquier comparación entre mapas.

Todas las imágenes del 2004 fueron re-muestreadas a una resolución de 28.5 metros utilizando un polinomio de segundo grado y un procesamiento de remuestreo denominado "vecino más cercano". Las imágenes fueron aceptadas solo si el error global de georeferenciación (RMSE) fue menor a 28.5 metros. El proceso fue realizado por personal

del FONAFIFO durante una visita de entrenamiento a la Universidad de Alberta. La Cuadro 1.2. muestra las estadísticas correspondientes al proceso de georeferenciación.

Cuadro 1.2.

Errores de georeferenciación de las imagenes utilizadas en los estudios de cobertura forestal de Costa Rica.

Path/Row	Código	No. de Puntos Utilizados	Error Global de Georeferenciación en m
15/53	San José	52	11.6
16/53	Guanacaste - Seco	51	10.1
16/53	Guanacaste - Lluvioso	38	6.9
14/53	Limón	50	9
14/54	Osa	41	18.3

Fase No. 3: Interpretación automática. Este proceso involucra la clasificación automática utilizando un sistema sin supervisión conocido como ISODATA. El sistema esta basado en la selección de 50 grupos con información espectral similar (dentro de una y media desviación estándar definida). Esto permite separar en forma adecuada aquellos bosques cuya cobertura de copa es superior al 80% (Sanchez-Azofeifa, 1996).

Fase No. 4: Clasificación de Cobertura Forestal-No Cobertura Forestal. Una vez que los grupos espectrales han sido seleccionados en la Fase 4, esta fase se encarga de poner títulos cada una las clases espectrales seleccionadas. Esto se realiza por medio de un proceso interactivo que involucra el despliegue simultáneo de la imagen de satélite y la clasificación en la misma pantalla. Las clases seleccionadas a este nivel son: Cobertura Forestal (ecosistemas forestales con cobertura de copa superior al 80%) y No-Cobertura Forestal (por ejemplo; tierras agrícolas, pastizales, charales, cafetales con y sin sombra).

Fase No. 5: Procesos de Control de calidad. La imagen clasificada es dividida en un total de 40 cuadrantes con el fin de facilitar el seguimiento de las áreas que se están verificando. La misma se súper impone en la pantalla del ordenador en donde se tiene una imagen desplegada con una combinación de bandas espectrales 4(Rojo), 3(Verde) y 2(Azul). Cada cuadrante es chequeado en forma independiente en busca de errores asociados con la clasificación de la misma. Aquellas áreas que se determinan con errores de clasificación son corregidas en la computadora. Este proceso se repite el número de veces que es necesario con el fin de asegurar que solamente aquellas áreas determinadas como

bosque son verdaderamente extraídas. Este proceso no es realizado por la misma persona que ha realizado la clasificación. En este proceso el control de calidad fue realizado en forma independiente de la Universidad de Alberta por personal del FONAFIFO y del ITCR con el fin de evitar sesgos no aleatorios en el proceso de generación y titulación de clases espectrales.

Fase No. 6: Integración y análisis. Una vez que todas las imágenes han pasado control de calidad y existe un nivel de consistencia en la extracción de la cobertura de bosque, las mismas son integradas en un mosaico. Las áreas de sobre-posición (cerca de un 10% entre imágenes) son minimizadas por medio de un sistema desarrollado por la Universidad de Alberta que permite solamente que un píxel exista en la supervisión, este algoritmo permite evitar errores asociados con la fenología o bien con la presencia de anomalías de carácter temporal que pueden existir en la imagen de satélite. Antes de finalizar la capa de áreas reforestadas, plantadas de café y frutales levantada por el ITCR, se emplea como una máscara para remover aquellas áreas que hayan sido erróneamente clasificadas como bosque (Ver segundo informe de este estudio). Una vez que el mosaico es creado se procede al análisis final de la cobertura forestal de 2005.

1. 2.4. Metodología para el análisis de la Región Chorotega.

El análisis de la cobertura forestal de la Región Chorotega requiere de un proceso especial que es diferente al que se utiliza en el resto del país. El estudio involucra el uso de imágenes que son multi-temporales a dos escalas: 1) Escala de variación inter-anual: época seca y época lluviosa y 2) Imágenes procesadas en 1986, 1997 y el 2000 con el fin de poder definir en forma más precisa los diferentes estados de sucesión natural presentes en esta región.

Este estudio involucra en primer lugar la separación del área de estudio basado en la división de las Zonas de Vida de Holdridge. La región de estudio utilizada se resalta en la Figura 1.3. El área de estudio involucra tanto las Zonas de Vida: Bosque Seco Tropical como las de Bosque Muy Húmedo Premontano y Húmedo Tropical presentes en la Península de Nicoya, que igualmente muestran una estacionalidad bien definida (pérdida de hojas) durante la época seca.

El procedimiento involucra tres fases: 1) Clasificación de las imágenes de Guanacaste adquiridas en la época seca y lluviosa del 2004-2005. Esto permite, por medio de un análisis diferenciado, obtener una clasificación del bosque caducifolio y siempre-verde presente en esta región. Este análisis toma ventaja de estudios previos conducidos en el Parque Nacional Santa Rosa que indican que es posible detectar bosques en tres estados sucesionales: tempranos, intermedios y tardíos con alta precisión (mayor al 80% de cobertura de copa). En forma adicional se considerara índices de humedad, sequedad y nivel verde conocidos como Tasseled Caps, para estimar con mayor precisión el nivel de estado sucesional. Una vez generada esta base de datos, se procedió a utilizar un sistema

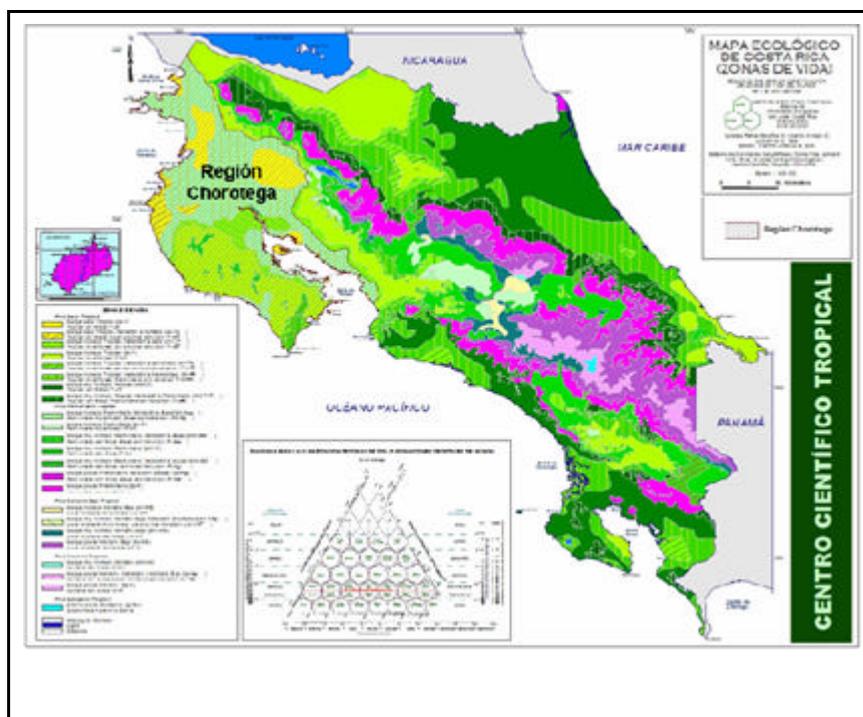


Figura 1. 3: Definición del área de estudio para la clasificación especial de la Región Chorotega.

experto de aprendizaje de máquina (Machine Learning en Ingles) para integrar las bases de datos de la región Chorotega generados en 1997 y 2000. Este sistema permite evaluar a nivel de píxel la presencia o ausencia de bosque como una función del tiempo y su estado de sucesión. Este sistema, también usado con redes neuronales en el pasado en la cuenca

del amazonas, permite generar mapas detallados de crecimiento secundario a partir de la base de datos temporales. En este caso se procedió a entrenar el algoritmo con una sección del Parque Nacional Santa Rosa (Kalascka et al. 2004b). En este entrenamiento, el procedimiento permite detectar la trayectoria de cada píxel de la siguiente forma:

$$\text{Edad Potencial del Bosque Píxel}_i = f (P_{i-t_1}) + f (P_{i-t_2})$$

En donde la edad del bosque del píxel en el año 2000 es una función no sólo de la presencia del bosque en el año 2000 pero también el año 1997 o 1986. La función de edad potencial es una función determinística no probabilística y esta basada en la opción booleana de sí hay bosque presente en el año t_1 o t_2 . Bajo el supuesto actual, un bosque de 5 años de edad es uno en el cual ambas funciones son 0 tanto en el año t_1 (2000) como t_2 (1997). A este bosque se le asigna un estado sucesional temprano. En el caso de un bosque de estado intermedio. La función determinística es 1 en el año t_1 (2000) y 0 en el año t_2 (1997). En caso de un bosque de sucesión tardía, ambas funciones son 1 tanto en t_1 (2000) como en t_2 (1997 o 1986).

Las clasificaciones finales de los bosques en tres estados sucesionales no están, por lo tanto, ajustadas a las edades de los bosques dado que puede ser que un bosque este presente en el año 1999 pero no en el año 1997, sino que esta ajustadas por estadio de sucesión y su edad potencial. La base de datos final por tanto refleja el estado sucesional de la cobertura caracterizado por la composición florística, altura del dosel, densidad de copa y otros aspectos que están más afectados por factores de sitio y antropológicos, que por la edad, como se ha demostrado por los estudios realizados por los investigadores en esta región (Arroyo-Mora. et. al. 2003, Castro et al. 2003, Kalascka et. al. 2004b), pero en todo caso se asigna una edad potencial dado que en general estados de sucesión temprana se asocian con edades de 0-5 años, intermedia 5-15 años y tardía mas de 15 años. Es importante indicar que después de los 15 años es imposible decir nada acerca del estado de sucesión o edad del bosque con el sensor ETM+ dado que se da una saturación del área foliar y con la misma una saturación de la reflectancia en las bandas 3 y 4 del sensor lo que afecta por lo tanto la separación de los mismos.

Con respecto a la clase Bosque Tardío, se debe indicar que este no es sinónimo de bosque primario, dado que no es factible con la detección remota identificar si el bosque ha sido o

no aprovechado o intervenido (Kalacska et al. 2004b). La clase Bosque Tardío representa a un bosque con características similares a los bosques maduros originales de estas regiones.

1.2.5. Metodología para el análisis de la Península de Osa:

Esta región, ocupada por el bosque muy húmedo tropical, tiene limitaciones en cuanto a las posibilidades de detectar bosques con los mismos niveles de sucesión natural obtenidos en la región Chorotega (Punto 2.3). La falta de imágenes sin cobertura de nubes no permitió el estudio de bosque secundario.

1.2.6. Estimación del error de la clasificación:

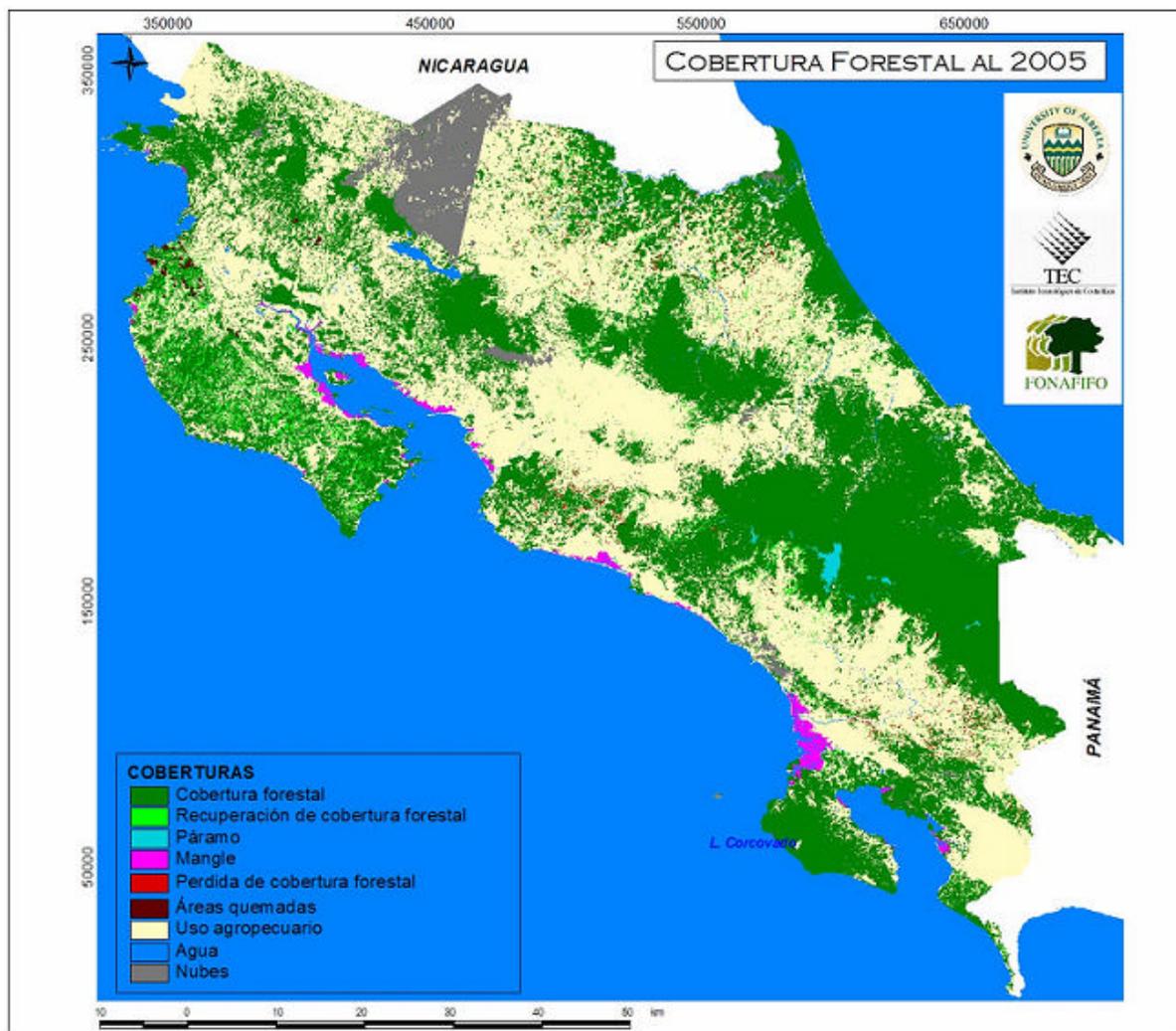
Los estudios previos de deforestación y cobertura forestal de Costa Rica se vieron afectados por la presencia de plantaciones forestales y de café que se confunden con la respuesta espectral de los bosques primarios. Este error de clasificación es más pronunciado en áreas en las cuales se tiene café con sombra o plantaciones forestales con parcelas de distintas edades. Con el fin de evitar este problema se crearon dos bases de datos: 1) Cobertura de café proveída por el ICAFE y 2) Cobertura de plantaciones forestales y frutales, compilada por el ITCR de diferentes fuentes (ITCR y U. Alberta, 2006). Estas coberturas son aplicadas a las imágenes de satélite una vez calibradas con el fin de cambiar la titulación de aquellos píxeles que fueron clasificados como bosques pero que en realidad son plantaciones de café o plantaciones forestales.

En forma adicional se utiliza una base de datos de cobertura/no cobertura de bosque compuesta por 2255 puntos de control provisto por el FONAFIFO y el ITCR. Esto excedió el número de puntos utilizados tanto en el año 1997 como en el año 2000 en el cual se utilizaron un total de 800 puntos de control. Los puntos de control fueron corroborados en la imagen y analizados utilizando una matriz de contingencia. Varios puntos de control, en total 380 puntos fueron eliminados del análisis dado que los mismos cayeron en áreas conflictivas asociadas con el problema de SLC-Off y por tanto no fueron considerados en el análisis de error, dando por lo tanto un total de 1875 puntos de control para la verificación. Los mismos puntos fueron evaluados para obtener la precisión total del mapa y la precisión total de la clasificación del bosque utilizando una matriz de contingencia.

1.3. Resultados.

1.3.1. Resultados generales de Clasificación para Costa Rica.

Como se indicó en el Cuadro 1.1, la clasificación realizada en este estudio corresponde básicamente al año 2005, solo la imagen de Limón es del año 2004. Por eso en adelante se refiere los resultados como la Cobertura Forestal del 2005. El Mapa 1.1. es una representación gráfica de la clasificación realizada para el año 2005.



Mapa 1.1. Cobertura Forestal Costa Rica año 2005.

En términos de cobertura forestal, los resultados obtenidos a partir del análisis de las imágenes de satélite indican que el país tiene una cobertura forestal estimada en el 48% (2,431,366 ha, Cuadro 1.3). Según el Cuadro 1.4, durante el período 2000-2005 se detectó una pérdida de 1.5% de la cobertura forestal presente en el 2000. Esta pérdida equivalente a una tasa de deforestación del 0.29% anual. En términos de la recuperación de cobertura o crecimiento secundario fue posible detectar una recuperación del 6% del área que no estaba cubierta por cobertura forestal en el año 2000. Esto representa una tasa de recuperación forestal del 1.2% anual. Por lo tanto la tasa de recuperación de cobertura forestal es 4 veces la tasa de pérdida de cobertura en el período 2000-2005.

Cuadro 1.3.

Resultados de la clasificación de Cobertura Forestal para Costa Rica al año 2005.

Tipo de Cobertura	Área en hectáreas	Porcentaje (%) Territorio Nacional
Cobertura Forestal	2,306,326	45.5
Cobertura No Forestal	1,970,320	38.9
Recuperación de Cobertura Forestal	125,040	2.5
Pérdida de Cobertura Forestal	34,317	0.7
Manglar	42,126	0.8
Páramo	11,061	0.2
Área quemadas	7,089	0.1
Nubes	184,865	3.6

El Cuadro 1.5. presenta un los resultados de la fragmentación tanto de la cobertura forestal del 2005, como de la pérdida y la recuperación de cobertura que se presentó entre el año 2000 y 2005. Como se aprecia los fragmentos de las áreas deforestadas tienen un área en promedio de 4 ha, mientras que las áreas que se recuperan doblan esa extensión con 8 ha en promedio.

Cuadro 1.4.

Resultados de pérdida y recuperación de cobertura forestal para Costa Rica período 2000-2005.

Variable	Área en ha	Unidades
Cobertura Forestal 2000	2,340,643	ha
Pérdida de Cobertura 2000-2005	34,317	ha de bosque
Pérdida anual (5 años)	6,863	ha/yr
Pérdida total de la cobertura del 2000	1.50	%
Tasa anual de pérdida	0.29	%/year
Cobertura No bosque 2000	2,095,360	ha
Recuperación de Cobertura 2000-2005	125,040	ha del no bosque
Recuperación anual	25,008	ha/year
Recuperación Total	6.00	% del no bosque
Tasa anual recuperación	1.19	%/year

Cuadro 1.5.

Nivel de fragmentación de la cobertura forestal, pérdida y recuperación de cobertura según clasificación del 2005.

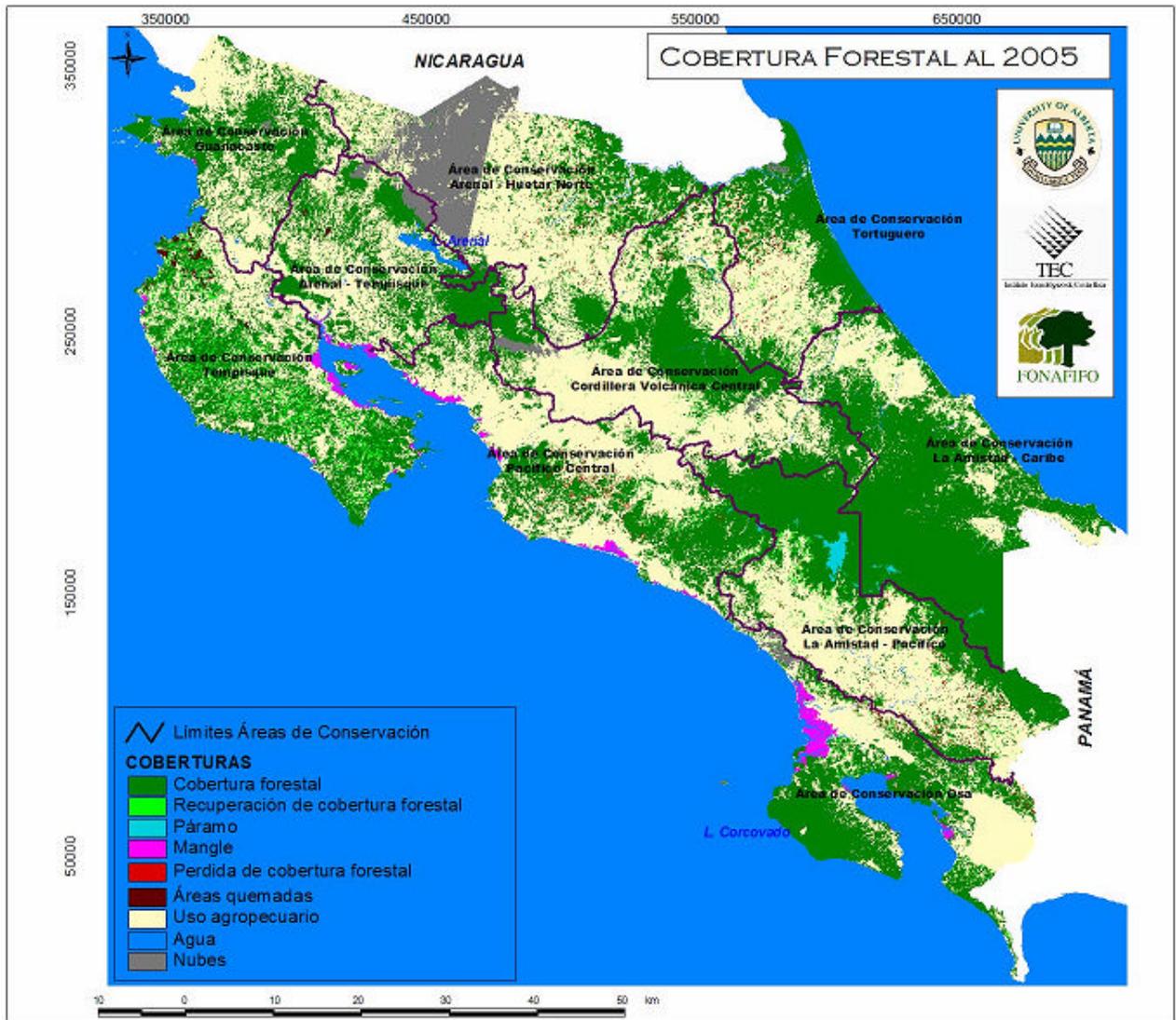
Tipo de Cobertura	Número Fragmentos	Área Promedio Fragmento (ha)	Desviación Estandard (ha)
Pérdida de Cobertura Forestal	18,736	4	2
Cobertura Forestal	15,056	7,163	153
Recuperación de Cobertura Forestal	38,792	8	3

1. 3.2. Resultados de la Clasificación por Áreas de Conservación del SINAC.

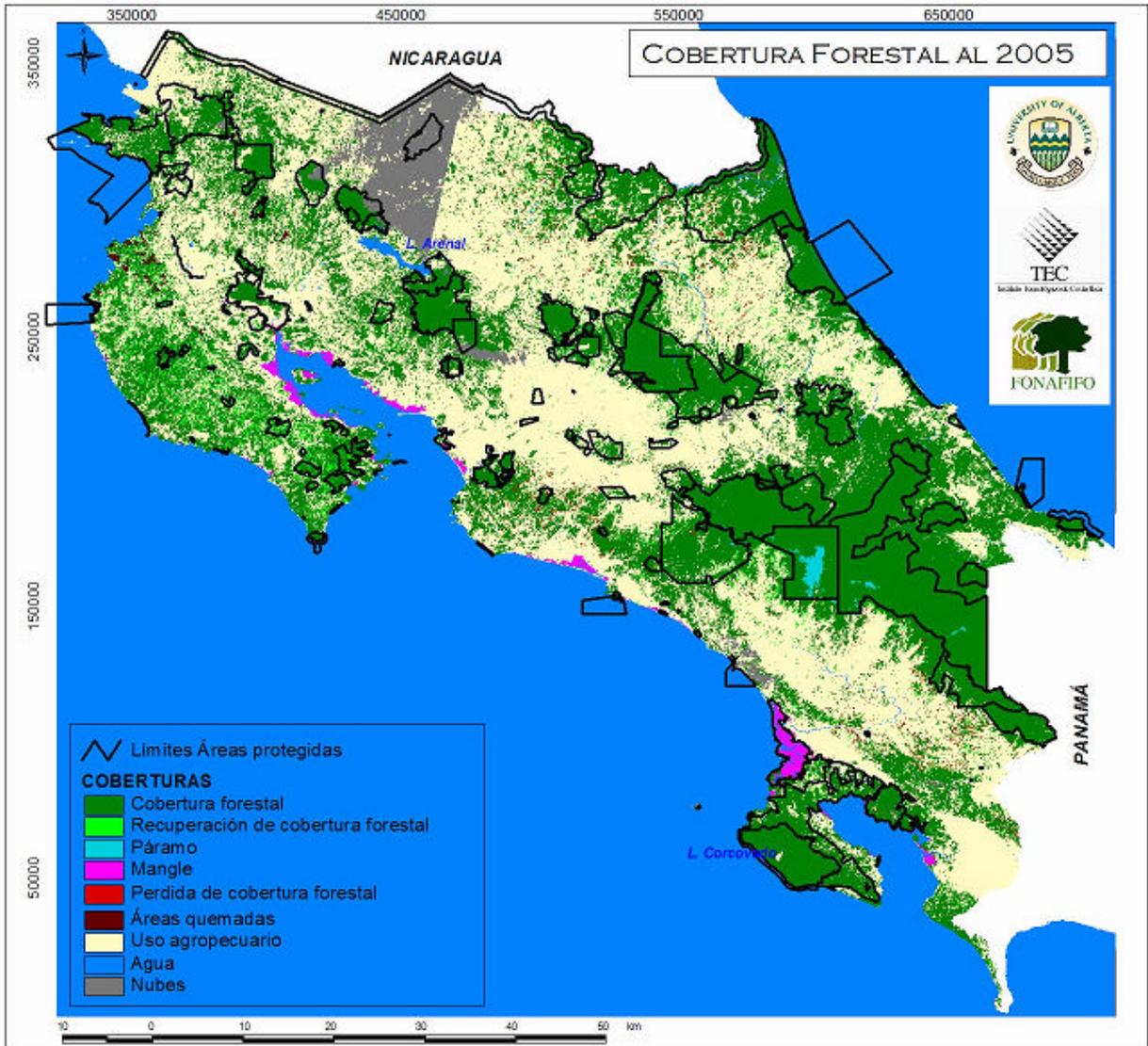
El Cuadro 1.6. resume el análisis de distribución de la cobertura forestal, pérdida y recuperación de cobertura, área quemadas, páramo, manglar y otros usos según las Áreas de Conservación del SINAC y la clasificación del 2005 (Mapa 1.2). Dado que en cada Área de Conservación un porcentaje del área esta protegido y otro no (Mapa 1.3), se realizó un análisis especial para separar el área de cobertura forestal, pérdida y recuperación de cobertura entre áreas protegidas y áreas sin protección (Cuadro 1.7).

Las unidades de protección tomadas en cuenta en el Mapa 1.3 y el Cuadro 1.7., son: Parques Nacionales, Parques Internacionales, Reservas Biológicas, Reservas Absolutas, Refugios de Vida Silvestre, Humedales Nacionales, Zonas Protectoras y Reservas Forestales.

Cada una de estas unidades están bajo el amparo del SINAC con diferentes grados de protección. También hay que indicar que las unidades o reservas privadas de protección no se toman en cuenta en este análisis.



Mapa 1.2. Cobertura Forestal Costa Rica año 2005 y Áreas de Conservación (SINAC).



Cuadro 1.6.

Distribución en hectáreas y porcentaje de la cobertura forestal, pérdida/recuperación de cobertura forestal y otros usos por Áreas de Conservación del SINAC, Costa Rica. Según Clasificación de Cobertura Forestal 2005 y 2000.

Distribución en hectáreas

Cobertura / uso suelo	ACG	ACT	ACA-T	ACAHN	ACCV	ACTO	ACOPAC	ACLA-C	ACLA-P	ACOSA
Cobertura Forestal	161526.5	254121.0	174827.3	147833.3	263183.8	149091.8	216633.0	448973.7	278642.3	211493.3
Recuperación de Cobertura Forestal	627.9	53669.0	3118.4	10580.1	12030.4	7559.2	7961.0	6850.5	16198.5	6445.0
Pérdida de Cobertura Forestal	341.3	400.3	287.6	7429.2	3669.6	4890.8	5957.6	35.1	8931.1	2374.3
Áreas Quemadas	159.03	5959.99	969.69	0	0	0	0	0	0	0
Páramo	0	0	0	0	0	0	576.9	1553.39	8926.82	3.61
Manglar	539.3	9414.1	3115.1	0.0	0.0	0.0	10559.7	0.0	0.0	18497.8
Otros Usos	183145.7	192859.1	212020.6	494454.4	363176.5	143467.3	328036.3	163333.2	313540.4	187012.9
Área Total	346339.8	516423.6	394338.7	660297.1	642060.2	305009.1	569724.5	620745.9	626239.1	425826.9

Distribución en porcentaje (%)

Cobertura / uso suelo	ACG	ACT	ACA-T	ACAHN	ACCV	ACTO	ACOPAC	ACLA-C	ACLA-P	ACOSA
Cobertura Forestal	46.64	49.21	44.33	22.39	40.99	48.88	38.02	72.33	44.49	49.67
Recuperación de Cobertura Forestal	0.18	10.39	0.79	1.60	1.87	2.48	1.40	1.10	2.59	1.51
Pérdida de Cobertura Forestal	0.10	0.08	0.07	1.13	0.57	1.60	1.05	0.01	1.43	0.56
Áreas Quemadas	0.05	1.15	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Páramo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.25	1.43	0.00
Manglar	0.16	1.82	0.79	0.00	0.00	0.00	1.85	0.00	0.00	4.34
Otros Usos	52.88	37.35	53.77	74.88	56.56	47.04	57.58	26.31	50.07	43.92

Nota:

Las Áreas de Conservación (AC) son: ACG (Guancaste), ACT (Tempisque), ACA-T (Arenal-Tempisque), ACCVC (Cordillera Volcánica Central), ACTO (Tortuguero), ACOPAC (Pacífico Central), ACLA-C (La Amistad Caribe), ACLA-P (La Amistad Pacífico), ACOSA (Osa)

Cuadro 1.7

Distribución en hectáreas de la cobertura forestal, pérdida/recuperación de cobertura forestal en Unidades de Protección y Sin Protección por Áreas de Conservación del SINAC, Costa Rica. Según Clasificación de Cobertura Forestal 2005 y 2000.

Áreas de Conservación (SINAC)	Cobertura 2005		Recuperación Cobertura		Pérdida Cobertura	
	A. Protegidas	Sin Protección	A. Protegidas	Sin Protección	A. Protegidas	Sin Protección
ACG	75408.5	86117.9	111.6	516.3	23.4	318.0
ACT	25305.8	228815.2	4304.0	49365.0	2.1	398.2
ACA-T	65605.8	109221.4	386.4	2732.0	19.6	268.0
ACAHN	70896.6	76936.7	2394.1	8186.1	1017.8	6411.4
ACVC	128791.1	134392.7	1644.6	10385.7	67.6	3602.0
ACTO	100882.1	48209.7	1521.3	6037.8	1171.7	3719.0
ACOPAC	73412.5	143220.6	2495.2	5465.8	518.4	5439.2
ACLA-C	219791.9	229181.8	289.0	6561.5	18.1	17.0
ACLA-P	165168.5	113473.8	288.6	15909.9	62.6	8868.6
ACOSA	110210.3	101283.1	1131.2	5313.8	62.3	2312.0
Área Total CR	1035473.2	1270852.8	14542.4	110294.9	2961.3	31330.1

Nota:

Las Áreas de Conservación (AC) son: ACG (Guancaste), ACT (Tempisque), ACA-T (Arenal-Tempisque), ACCVC (Cordillera Volcánica Central), ACTO (Tortuguero), ACOPAC (Pacífico Central), ACLA-C (La Amistad Caribe), ACLA-P (La Amistad Pacífico), ACOSA (Osa)

1.3.3. Evaluación de Precisión de la Clasificación.

El análisis de error del mapa final muestra una precisión del 90.1% mientras que la precisión para la clase de bosque (cobertura de copa superior al 80%) se estimó en un 92.1%. Los resultados son obtenidos a partir de la evaluación de 1875 puntos de control obtenidos en forma independiente del personal que realizó estudio. En forma adicional estima que la precisión probabilística del estudio es del 80.2% utilizando la estadística Tau. La interpretación de la misma indica que, para el número total de clases utilizadas y basado en un distribución multi-modal, cada vez que se seleccione un píxel en forma aleatoria y el mismo se denomine "bosque" el titulado del píxel será correcto un 80.2% del tiempo. Esta estadística en combinación con el error total observado en el mapa (9.9%) indican el alto grado de separación de las clases de bosque obtenido en el estudio. Los resultados son compatibles con los estudios de 1997 y el 2000 que presentan estadísticas de error similares.

1.3.4. Resultados de Clasificación para la Región Chorotega.

Según la clasificación realizada la Región Chorotega tiene aproximadamente 515,340 hectáreas de cobertura forestal. Esta cobertura se segmenta a su vez en tres tipos de bosques: sucesión tardía, sucesión temprana y sucesión intermedia (Cuadro 1.9 y Mapa 1.4).

Cuadro 1.9.

Distribución de la cobertura forestal de la Región Chorotega según Clasificación del 2005 (Mapa 1.4) en tres tipos de cobertura forestal.

Tipo de Bosque	Área (ha)	% Área
Sucesión tardía	331,808	64
Sucesión temprana	103,301	20
Sucesión intermedia	80,230	16
Total Cobertura	515,340	52

Hay que indicar que el anterior cuadro no toma en cuenta la cobertura de manglares que en total suman aproximadamente 15,000 hectáreas y corresponden a un 1.5% del área estudiada. Igualmente no se ha tomando en cuenta para el año 2005 y 2000 unas 19,500 has de plantaciones (mayoritariamente forestales) que representan un 1.9% del área.

Los cambios en la cobertura forestal de Guanacaste revelan que ha existido un aumento sostenido en la extensión de bosques entre 1986 y el 2005 (Cuadro 1.10). En 1986 Guanacaste presentaba una cobertura equivalente al 34% de su territorio. Esta región aumentó de un 41% en el 2000 y la un 52% en el año 2005. A parte del notable proceso de restauración es importante observar que el número de parches de bosques y su tamaño promedio igualmente han aumentado. Según estos datos las tasas de recuperación anual fueron del 0.5% (1986-2000) y 2.2% (2000-2005).

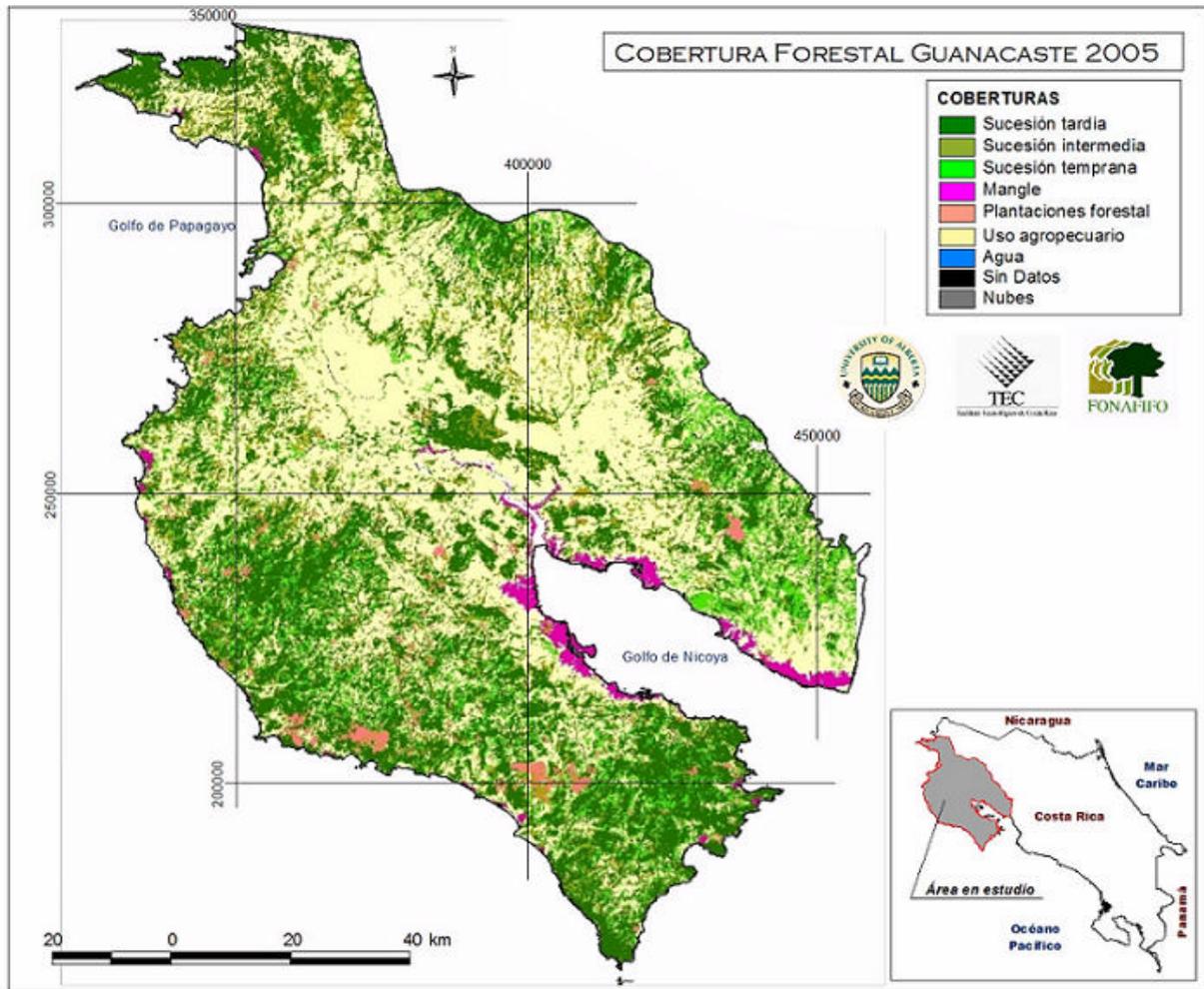
Cuadro 1.10.

Dinámica de la Cobertura Forestal de la Región Chorotega entre 1986 y el 2005, según tres estudios comparables.

Cobertura	Cobertura Forestal (ha)	% del Área	Número de Fragmentos	Área Promedio de Fragmento (ha)
Cobertura 1986 (1)	337,290	34	3,460	97
Cobertura 2000 (2)	408,119	41	4,023	101
Cobertura 2005 (3)	515,340	52	4,570	113

Referencia de los estudios:

(1) CIEDES-CCT-CI. 1998, (2) U. Alberta-CCT. 2002 (3) este estudio.



Mapa 1.4. Cobertura Forestal Región Chorotega, Costa Rica año 2005.

1.4. Discusión de Resultados.

1.4.1. Resultados generales de la Clasificación para Costa Rica.

En términos generales Costa Rica tiene un 48% de su territorio bajo cobertura forestal, esto descontando los páramos, los manglar3es y las plantaciones forestales. De los 2,431.163 hectáreas, un 43% (1,050,015 ha) están bajo algún grado de protección y 57% (1,381,147 ha) están fuera de estas unidades de protección (Cuadro 1.4 y 1.7). También se debe señalar que de la cobertura forestal fuera de áreas protegidas un total de 451,500 ha han estado esta bajo conservación con el Pago de Servicios Ambientales en el periodo 1997-2005 (<http://www.fonafifo.com>); esta área equivale al 18% de la cobertura forestal nacional al 2005, o al 32% de la cobertura fuera de las área protegidas.

Los resultados de este estudio confirman los estudios anteriores en los cuales la tasa de deforestación del país se mantiene por debajo del 0.5% anual, dado que entre 2000 y 2005 fue del 0.29% al año (Cuadro 1.4). En general la deforestación² en Costa Rica esta sucediendo en pequeños parches, muy dispersos en el paisaje y relativamente alejados de las Áreas Protegidas, es decir el proceso está perdiendo sus características de deforestación frontal. Los resultados de este estudio (Cuadro 1.5) indican que un total de 18,736 fragmentos de bosque fueron deforestados durante el período de estudio. Estos fragmentos tuvieron un área promedio de 4 ha c/u (+/- 2 ha). Por el contrario la recuperación forestal se dio en 38,792 fragmentos con un área promedio de 8 ha c/u (+/- 3 a). Lo más interesante del proceso de recuperación es que el tamaño de los parches es dos veces más grande que los de deforestación y que los mismos tienen a conglomerarse en lo largo de los grandes bloques de bosques, o sea mientras los parches de deforestación pierden carácter frontal, los de recuperación adquieren cada vez más carácter frontal.

En cuanto a los frentes de deforestación previamente detectados en el análisis del 1987-97 y 1997-2000 (CIEDES-CCT-CI. 1998, U. Alberta-CCT. 2002), solamente dos de estos frentes de deforestación fueron detectados: La Zona Norte y de Tortuguero. Estos dos frentes siguen siendo el principal contribuyente a la deforestación en el país no solamente por su extensión pero también porque los parches en estas dos regiones son de mayor tamaño y

² En este contexto se refiere al cambio de uso de la tierra de cobertura forestal a otro uso.

van minando la frontera del bosque. En estas dos regiones se puede decir que la deforestación sigue teniendo un carácter frontal.

Un nuevo frente se detectó en este estudio que previamente no se había identificado en el estudio del 1998 (CIEDES-CCT-CI. 1998), este se localiza en torno al Parque Nacional La Cangreja (o la cuenca media del Ríos Tulín y Parrita). Igualmente este frente presenta parches de mayor tamaño que el promedio y están minando los bloques de bosques de esta área. Por último en la cuenca del Río Térraba, más precisamente en el Valle de Coto Brus, se presenta un frente de deforestación pero de carácter disperso en el paisaje, aunque algunos parches si son de carácter frontal. Es importante indicar que esta deforestación puede estar dándose en parcelas de bosque secundario. Más investigación en esta región es necesaria para cuantificar el proceso en forma mas adecuada.

Los 4 frentes detectados igualmente se asociación con frentes de recuperación, lo que indica que los procesos de fragmentación y restauración de esos paisajes son muy dinámicos. Las razones de este dinamismo son diversas y específicas para cada frente. En este estudio no se llega a profundizar en esta discusión por falta de información sobre los factores socioeconómicos que controlan esa dinámica y por no ser uno de los objetivos del estudio.

Por último la Península de Osa, uno de los principales frentes de deforestación detectados en el pasado, no se pudo estudiar en esta ocasión debido a la constante cobertura de nubes encontrada en todas las imágenes disponibles, incluyendo las fotografías aéreas del proyecto NASA/CARTA 2005.

1.4.2. Resultados de la Clasificación por Áreas de Conservación del SINAC.

Los Cuadros 1.6 y 1.7 permiten comparar el estado de la cobertura forestal por Áreas de Conservación. Como se puede apreciar excepto por las Áreas de Conservación AC-Arenal Huerta Norte (24%) y AC-Pacífico Central (39.4%), todas las áreas de conservación tienen más del 40% de sus áreas con cobertura forestal, incluyendo las áreas en recuperación. Las áreas con mayor porcentaje de cobertura forestal son AC-La Amistad-Caribe (79%) y AC-Tempisque (49%). Hay que apuntar que el AC-Arenal Huertar Norte, en este estudio y

los previos, ha estado penalizado dado que tiene el mayor porcentaje de cobertura de nubes (22%) y por lo tanto las estadísticas no son tan completas para esta Área.

Con respecto a la pérdida de cobertura de las 34.291 ha que sucedieron entre el 2000 y el 2005, un 8% fue dentro de las áreas protegidas y un 92% fuera de ellas. La pérdida de cobertura se destaca por su magnitud en las Áreas de Conservación: AC-Arenal Huertar Norte (7,429 ha), AC-Tortuguero (4,890 ha), AC-Pacífico Central (5,957 ha) y AC-La Amistad Pacífico (8,931 ha). Todas estas áreas se asocian a los 4 frentes de deforestación ya comentados en esta sección. Del Cuadro 1.7 se observa que una pequeña porción de la pérdida sucede dentro de las áreas protegidas, quizás en la mayoría de los casos se deban a deslizamientos o incendios forestales. Las únicas áreas de conservación que tienen valores de pérdida de cobertura dentro de sus áreas protegidas que amerita consideración son AC-Arenal Huertar Norte y AC-Tortuguero, ambas con más de 1000 ha durante el periodo 2000-2005. Finalmente en este tema hay que afirmar que la deforestación no se presentó dentro de los Parques Nacionales, que son las unidades con mayor grado de protección del sistema, confirmado los resultados de los estudios realizados en el 1997 y 2000.

Durante el período se presentó una recuperación de cobertura de 124,837 ha, de las cuales 11% sucedió dentro de las áreas de protección y un 89% fuera de las áreas de protección. Las Áreas de Conservación de mayor importancia son: AC-Tempisque (53,669 ha), AC-La Amistad Pacífico (16,198 ha), AC-Cordillera Volcánica Central (12,030 ha) y AC-Huertar Norte (10,580 ha). Como se indicó la recuperación de cobertura es 4 veces más que la pérdida de cobertura, y sucede por lo general en las mismas zonas donde la pérdida ocurre. Hay que indicar que estos son bosques secundarios muy jóvenes, que el sensor capta por tener un follaje de copas denso cuya reflectancia lo hace clasificar como bosque.

El último aspecto que es importante comentar en este apartado es el de las quemadas o incendios forestales. Estos se han concentrado siempre en la vertiente pacífica del país por la presencia de la estación seca, sobre todo en la provincia de Guanacaste. Las quemadas suceden todos los años y algunas veces afectan parques de bosques, que por lo general se recuperan durante la estación lluviosa. En este estudio se detectó un total de 7.089 ha de quemadas, todas en la provincia de Guanacaste. De este total un 84.1% sucedió en la ACT, un 13.6% en la ACAT y un 2.2% en la ACG.

1.4.3. Resultados de Clasificación para la Región Chorotega, Costa Rica.

Los datos generados confirman las tendencias de restauración de cobertura forestal encontradas en los dos estudios previos (CIEDES-CCT-CI. 1998, U. Alberta-CCT. 2002). Esta región fue la más devastada por los procesos de deforestación entre 1950-1980 y debido a cambios en las políticas y los factores socioeconómicos que impulsaban la deforestación, hoy día ha llegado a recuperar porcentajes de cobertura equivalentes a las de otras regiones del país. En resumen un 52% de área de esta región está bajo cobertura forestal para un total de 515,340 ha. De este total un 64% de la cobertura se ha clasificado como sucesión tardía, un 20% como sucesión temprana y un 16 como sucesión intermedia.

En esta región no se ha detectado deforestación en este estudio, sólo 7,089 ha de quemadas, concentradas sobre todo en la Península de Nicoya. Por el contrario esta región es la que más restauración de cobertura forestal ha mostrado en los últimos 5 años, sobre todo en la Península de Nicoya en donde específicamente la AC-Tempisque tiene 53,669 ha de recuperación de cobertura forestal.

De las 515,340 hectáreas existentes de cobertura forestal en el año 2005, aproximadamente 35,000 ha (6.7%) están protegidas por el Pago de Servicios Ambientales en 368 Proyectos de Conservación de Bosques. Además unas 74,973 has (14.5%) de cobertura forestal están protegidas dentro de áreas de conservación (Parques Nacionales, Reservas Biológicas, etc.). Esto implica que aproximadamente 405,000 has, o el 78.8 % del total de la Región Chorotega, se encuentra sin ningún tipo de protección o estímulo para su conservación.

1.5. Conclusiones.

- a. Este estudio se basó en la clasificación de imágenes satélite Landsat TM +7 del año 2005, excepto por la imagen de Limón del año 2004. Todas las imágenes empleadas tienen un defecto por un daño que se presentó en el sensor desde el mes de Julio del 2003. Debido a esto las imágenes fueron adquiridas con un ajuste especial que reduce el defecto considerablemente. Para cada imagen se reportó el porcentaje de cobertura de nubes, fecha de adquisición y error de georeferenciación.
- b. La metodología empleada en este estudio cumple con los procedimientos aceptados internacionalmente para el monitoreo de la deforestación tropical. Para la Región Chorotega se desarrolló un protocolo especial de clasificación debido a que se trata en su mayor parte de bosques caducifolios. Este protocolo se ha visto beneficiado de proyectos de investigación realizados en Guanacaste por los investigadores de este estudio. Gracias a esto para la región de Guanacaste se ha logrado clasificar en tres tipos de bosques: tardíos, intermedios y tempranos.
- c. Los datos generados de la clasificación permiten concluir que el país continúa experimentando un proceso de recuperación de cobertura forestal. Para el 2005 el porcentaje del territorio nacional con cobertura forestal es del 48%, sin contar con las áreas de manglares, páramos y plantaciones forestales. De toda la cobertura forestal existente apenas un 43% esta bajo algún grado de protección³, mientras que un 57% (1,381.147 ha) esta fuera de las distintas unidades de protección. Durante el período 2000-2005 la cobertura forestal aumentó en 125,000 ha por recuperación, mientras que la pérdida fue de 34,300 ha. Esto equivale a una tasa anual de recuperación de 1.19% y una tasa anual de pérdida del 0.29%. De esta forma la recuperación es de más de 4 veces la tasa de pérdida.
- d. A nivel general se pueden señalar 4 frentes de deforestación de consideración, estos son: Llanura de San Carlos, Tortuguero, cuenca media de los ríos Tulín/Parrita y el Valle de Coto Brus. Los dos primeros frentes aún mantienen carácter de deforestación frontal. El segundo es un nuevo frente detectado en este estudio y es de carácter frontal y el último frente es de carácter muy disperso. En estos mismos frentes ocurre igualmente los procesos de recuperación, con lo cual la fragmentación y restauración del paisaje adquiere un carácter dinámico considerable. Mientras que los procesos de pérdida de cobertura han perdido en algunas partes del país su

³ Las categorías de área protegidas incluidas aquí son: Parques Nacionales, Parques Internacionales, Reservas Biológicas, Reservas Absolutas, Refugios de Vida Silvestre, Humedales Nacionales, Zonas Protectoras y Reservas Forestales. Todas bajo la tutela del Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE). No se incluyen las Reservas Biológicas Privadas.

carácter frontal, los procesos de recuperación van conformando un frente en torno a los bloque de bosques más importantes en el paisaje.

- e. Las Áreas de Conservación que enfrentan los niveles de pérdida de cobertura más preocupantes son: AC-Arenal Huetar Norte (7,429 ha), AC-Tortuguero (4,890 ha), AC-Pacífico Central (5,957 ha) y AC-La Amistad Pacífico (8,931 ha). Las causas de esta pérdida obedecen a factores socioeconómicos particulares para cada región y que merecen ser estudiados para su correcta interpretación, lo cual finalmente permitiría el diseño de estrategias para reducir al mínimo estos procesos. Pero igualmente merece estudiarse los procesos de recuperación, dado que si se desea consolidar estas áreas para mejorar la conectividad del paisaje, la calidad de hábitat y la producción de servicios ambientales, se deben definir una estrategia dado que estas áreas son muy vulnerables a ser deforestadas de nuevo.
- f. La región Chorotega, dominada por bosques caducifolios, ha experimentado durante las últimas décadas un proceso de recuperación de cobertura forestal único en el país. Al 2005 esta región tiene 515.000 ha de bosques, lo que equivale al 52% de toda su extensión. Del total de la cobertura de bosques un 64% se clasificaron como tardíos, un 20% como tempranos y un 16% como intermedios. Esta región es la que tiene el proceso de recuperación más agresivo pero sin embargo es la que menos tiene unidades de protección, sólo un 14% del total de cobertura forestal esta de alguna forma protegida. Igualmente en este caso se debe comprender las causas que han impulsado un proceso de recuperación tan constante, solo así se podrá desarrollar enfoques para consolidar este escenario.
- g. A pesar de que se trató por todos los medios de clasificar al menos en dos tipos de bosque la Península de Osa, el objetivo no se logró. No fue posible adquirir imágenes libres de cobertura de nubes y tan siquiera las fotografías aéreas del Proyecto CARTA se libraron de este problema.
- h. La discusión de resultados que se presenta en este informe esta ajustada a los objetivos del estudio. La información generada es muy rica para varios análisis que se podrán realizar por diferentes investigadores, instituciones y organizaciones. Las aplicaciones son innumerables y por tanto no se pretende en este informe abarcar tanto terreno.

1.6. Recomendaciones.

- a. Dadas las limitaciones del sensor Landsat es probable que éste sea el último estudio de cobertura forestal para Costa Rica empleando este sensor. Por lo tanto se recomienda evaluar otros sensores que cumplan con los mismos requerimientos y que preferiblemente brinden mejores resultados a un costo razonable. Especialmente en zonas donde se han detectado frentes de deforestación.
- b. Debido al alto porcentaje de cobertura forestal del país, a la constante recuperación de cobertura forestal y a la limitada área que se puede tener bajo protección, es necesario diseñar una estrategia que consolide este proceso. Esta estrategia debe estudiar las causas que han impulsado los procesos de recuperación y deforestación, solo así se podrá diseñar algo exitoso y congruente con el marco institucional, legal y financiero que tiene el país.
- c. Las aplicaciones que tiene la información generada por este estudio son múltiples y los beneficios que se derivan de éstas son significativos. Por lo tanto es recomendable que las bases de datos digitales de los mapas sean compartidos ampliamente con todos los actores del sector forestal y de conservación.
- d. Este estudio no solamente logró superar previas limitaciones en la clasificación del bosque seco tropical al avanzar en la clasificación de tipos de bosques. Este esfuerzo debe extenderse a los bosques húmedos y muy húmedos, en los cuales hoy día la clasificación ya resultó muy simple (bosque o no bosque) para las necesidades de los decisores y los investigadores. Consecuentemente se debe continuar con esfuerzos de investigación para lograr el objetivo a mediano plazo de al menos clasificar estos bosques en dos categorías: secundario y tardío.

1.7. Reconocimientos.

- ? Los investigadores agradecen al FONAFIFO el apoyo y confianza que han dado a los investigadores para realizar este estudio. Agradecemos a todas las organizaciones, empresas, y personas que de muchas formas han colaborado en la realización de este estudio. Muy especialmente al INBio, FUNDECOR, MINAE, Proyecto Lapa Verde/Corredor Biológico San Juan, CODEFORSA, ICAFE, y las empresas y empresarios forestales: Ecodirecta, Barca, Maderas Preciosas, Maderas Cultivadas, Earth, Panamerican Woods, Racsa, Ecocapital y Compañía Maderera del Norte.
- ? Este estudio se ha beneficiado de importantes proyectos de investigación financiados la U. Alberta, Tinker, IAI y el ITCR. Los investigadores reconocen la contribución de estos proyectos de investigación e instituciones.
- ? El apoyo brindado por el Ing. Alberto Mendez, del FONAFIFO, en la realización de este estudio fue de vital importancia.

1.8 Referencias.

- Arroyo P, Sanchez-Azofeifa A, Rivard B, Calvo-Alvarado J and D. Janzen. 2005. Dynamics in landscape structure and composition for the Chorotega region, Costa Rica from 1960 to 2000. *Agriculture, Ecosystems and Environment* Vol (106) 27-39
- Castro, K., Sanchez-Azofeifa, G.A. and B. Rivard. 2003. Monitoring secondary tropical forest using space-borne data: implications for Central America. *International Journal of Remote Sensing*. 24(9): 1853-1894.
- CIEDES-CCT-CI. 1998. Estudio de cambios de Cobertura Forestal de Costa 1987-1997. Centro Científico Tropical, CIEDES-Universidad de Costa Rica, Conservation International. Estudio Contratado por FONAFIFO. San José, Costa Rica. 50 pp.
- Kalácska, M, Sánchez-Azofeifa, G.A., Rivard. B, Calvo-Alvarado, J.C., Journet, A.R.P., Arroyo-Mora, J.P, and Ortiz-Ortiz, D. 2004a. Leaf area index measurements in a tropical moist forest: a case study from Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*. 91 (2): 134-152.
- Kalacska, M.; Sánchez-Azofeifa, G.A., Calvo, J., Rivard, B., Quesada, M., and Janzen, D. 2004b. Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management*. 200 (1-3): 227-247.
- Kalacska, M., Sánchez-Azofeifa, G.A., Quesada, M., and Calvo, J. A. 2005a. Comparison of Leaf Area Index of three tropical dry forests environments. *Biotropica*. 37(4): 486-497.

- Kalascka, M; Calvo, J. and Sánchez-Azofeifa, G.A. 2005b. Assessment of seasonal changes in species' leaf area in a tropical dry forest in different states of succession. *Tree Physiology*, 25:733-744.
- Lillesand, T & Kiefer, R. 2000. "Remote Sensing and Image Interpretation" 4th Ed. Wiley, NY. 724pp.
- Pfaff, A.S.P., S. Kerr, R.F. Hughes, S. Liu, G.A. Sanchez-Azofeifa, D. Schimel, J. Tosi and V. Watson (2000). "The Kyoto Protocol & Payments for Tropical Forest: An Interdisciplinary Method for Estimating Carbon-Offset Supply and Increasing the Feasibility of a Carbon Market under the CDM". *Ecological Economics* 35(2):203-221.
- Sanchez-Azofeifa, G.A., Skole, L.S. and Chomentowski, W. 1998. Sampling Global Deforestation Data Bases: The role of persistence. *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change*. 2 (2-3), pp. 177-189.
- Sanchez-Azofeifa, G.A., Harris, R.C. and D.L. Skole. 2001. Deforestation in Costa Rica: A quantitative analysis using remote sensing imagery. *Biotropica* 33(3): 378-384.
- Sanchez-Azofeifa, G.A., Rivard B., Calvo, J. and I. Moorthy. 2002. Dynamics of tropical deforestation around mountain national parks: remote sensing of deforestation in Costa Rica. *Mountain Research and Development* 22(4): 352-358.
- Sanchez-Azofeifa, G.A., Daily, G.C., Pfaff, S.P.A. and C. Busch. 2003. Integrity and isolation of Costa Rica's national parks and biological reserves: examining the dynamics of land cover change. *Biological Conservation*. 109: 123-135.
- Skole, D., Tucker, C., 1993. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science* 260, 1905-1910.
- U. Alberta-CCT. 2002. Estudio de cambios de Cobertura Forestal de Costa Rica 1997-2000. Alberta University, Edmonton, Centro Científico Tropical y FONAFIFO. San José, Costa Rica. 30 pp.