

# Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica

**William Fonseca G<sup>1</sup>;**  
**Henry Chaves K<sup>2</sup>; Federico Alice, G<sup>3</sup>;**  
**José María Rey Benayas<sup>4</sup>**

En el área estudiada existen 251.472 ha sin cobertura boscosa y con potencial para la restauración forestal. Se propone la restauración a través de la reforestación, pues esta actividad es bien aceptada en la región porque existe conocimiento y experiencia en el establecimiento y manejo de plantaciones, los crecimientos son aceptables, hay industria procesadora de la madera y las rotaciones son cortas.



Foto: Archivo Colegio de Ingenieros Agrónomos y Forestales, Costa Rica.

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica, Heredia, Costa Rica. wfonseca@una.ac.cr. Apto 86-300.  
<sup>2</sup> Instituto de Políticas para la Sostenibilidad, Heredia, Costa Rica  
<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica, Heredia, Costa Rica  
<sup>4</sup> Departamento de Ecología, Universidad de Alcalá, España.

## Resumen

Este trabajo buscó calcular el potencial de restauración forestal y definir áreas a restaurar en una zona de mucho dinamismo de uso del suelo en la región Caribe de Costa Rica. Se clasificó el uso del suelo y se analizaron los cambios a partir de imágenes Landsat TM durante los periodos 1986-1996 y 1996-2006. Se creó un modelo del potencial de restauración forestal basándose en las variables presencia ó ausencia de bosque y de espacios naturales protegidos, y riesgo de inundaciones. El bosque natural mantuvo la superficie inicial. Las plantaciones forestales con especies nativas fueron una opción importante para recuperar sitios deforestados durante la década del 86-96, pero no en el periodo 1996-2006. Los pastos arbolados y plantaciones forestales cedieron terreno a las actividades agrícolas y ganaderas. El potencial de restauración forestal se estimó en 251.472 ha; de estas, 42.594 ha y 3.328 ha, fueron clasificadas como de prioridad crítica y máxima, respectivamente. El método utilizado en este trabajo puede aplicarse a otros casos de estudio en la construcción de estrategias más amplias de mitigación y adaptación al cambio climático.

**Palabras claves:** Landsat TM; uso del suelo; sensores remotos; clasificación supervisada.

## Summary

### **Land cover dynamics and priority areas for forest restoration in the Caribbean region of Costa Rica.**

This work was intended to calculate the forestry restoration potential and to determine priority areas to be restored within a dynamic land use area in the Costa Rican Caribbean Region. A land use classification was developed and land use changes analyzed using Landsat TM satellite images during the periods of 1986-1996 and 1996-2006. A forestry restoration potential model was created distinguishing between critical, maximum, intermediate and low priority areas. The model was based on variables such as presence/absence of forest cover and protected areas, and flooding risks. Natural forests maintained its initial surface throughout the analyzed period. Forest plantations with native species were important to restore deforested sites during the decade of 1986-1996, but not during 1996-2006. Shaded pastures and forest plantations decreased while agriculture and open pasture areas increased. The forestry restoration potential was estimated in 251.472 ha: 42,594 ha and 3,328 ha were classified as critical and maximum priority, respectively. Methods used in this work could be further developed for the establishment of regional strategies to address mitigation and adaptation to climate change.

**Keywords:** Landsat TM, land use, remote sensing, supervised classification.

## Introducción

Las alteraciones en la cobertura del suelo son uno de los componentes más importantes del cambio global que afectan a los ecosistemas terrestres y causan impactos en el clima, en el ciclo del agua y de los nutrientes y en la biodiversidad. El estudio de estos cambios constituye un objetivo relevante de investigación para el desarrollo de estrategias de desarrollo sostenible pues, generalmente, los cambios

detectados tienen que ver con la degradación de la cubierta vegetal natural. Este hecho debe estimular a investigadores, técnicos y decisores a proponer y ejecutar alternativas realistas de uso del territorio que mitiguen la reducción de los servicios ecosistémicos proporcionados por los ecosistemas degradados. La restauración forestal es una alternativa privilegiada por la disminución de la superficie de los bosques en el mundo y por tener una incidencia

significativa en servicios ecosistémicos, como la captura de carbono asociada al calentamiento global.

El bosque tropical húmedo ha sido objeto de una atención especial desde hace décadas por las elevadas tasas de deforestación que experimenta y los elevados niveles de biodiversidad que contiene. En la actualidad, el bosque tropical húmedo ocupa el 6-7% de la superficie de tierras del globo (PNUD et ál. 2000). En Costa Rica, el avance de la

frontera agropecuaria y la extracción de madera han reducido la superficie original de bosque tropical húmedo a unas 822.604 ha (Quesada 2007). Por múltiples razones, estos bosques merecen atención prioritaria; entre ellas, son reguladores del cambio climático y la conservación de la biodiversidad (Pielke 2005, Bonan 2008) además, su restauración provee el entorno para implementar proyectos forestales de desarrollo limpio y mercados voluntarios de carbono (Salinas y Hernández 2008, Merger 2008, Basu 2009); satisfacen la demanda creciente de madera (Arce y Barrantes 2006); garantizan fuentes de empleo en el mundo rural (Mideplan 2008c); mitigan las posibilidades de inundaciones que causan cuantiosas pérdidas anuales (Costa Rica 2007) y reducen la contaminación ambiental provocada por las grandes extensiones de cultivos agrícolas (Mideplan 2008c). Estas razones motivaron un estudio en el Caribe costarricense, cuyos objetivos principales fueron calcular el potencial de restauración forestal, definir posibles áreas prioritarias para la restauración forestal y determinar las tasas de cambio de los diferentes tipos de cobertura durante los últimos veinte años. La información generada con este estudio será de utilidad en la formulación de estrategias de gestión, pues se ha logrado identificar a nivel de espacio y tiempo los patrones del paisaje que pueden afectar los procesos de formulación de políticas, programas de conservación y de restauración.

#### El área de estudio

El trabajo se desarrolló en la región Caribe de Costa Rica, en un área de aproximadamente 500.000 ha. Esta región posee zonas aptas para proyectos de restauración forestal, pues hay grandes extensiones de terrenos subutilizados o con usos inapropiados que provocan grandes pérdidas al país (Costa Rica 2007); además, registra los índices más altos

de pobreza (Mideplan 2008bc). El área seleccionada corresponde a la zona de vida bosque muy húmedo tropical (Holdridge 1967). La altitud varía entre 50 y 350 msnm; predomina el clima húmedo a muy húmedo, caliente a muy caliente (Herrera 1985, Mena sf). La precipitación media anual varía entre 3420 y 6840 mm y la temperatura media anual entre 25 y 27°C (Mena sf, IMN 2006). Los suelos son ultisoles e inceptisoles (ITCR 2004) y el 54,7% del área es considerada de uso exclusivo para la protección de flora y fauna, captación de agua y belleza escénica (Mideplan 2008a). La región está catalogada como zona rural socialmente rezagada (Mideplan 2008b), a pesar de la cantidad de recursos forestales que alberga.

#### Clasificación de la cobertura del suelo

Se analizaron imágenes Landsat TM con una resolución espacial de 28,5 x 28,5 m, las cuales fueron tomadas en los meses febrero de 1986, marzo de 1996 y marzo de 2006 y corresponden al “*path 15*” y “*row 53*”. Debido a las condiciones geográficas del área de estudio, su disposición en una vertiente de origen aluvial y la poca diferencia en elevación, no se aplicaron correcciones ortométricas. Se definió un polígono a partir de la línea de 0 msnm para cortar las imágenes con el objetivo de eliminar la influencia de masas de agua oceánicas y problemas de bruma sobre las mismas. Los archivos de referencia poligonales con la definición del área de estudio fueron importados desde Arcview para generar la base de análisis. Con el programa Idrisi Andes se hizo una clasificación supervisada de las imágenes satelitales. Los mapas de uso y cobertura del suelo en los años analizados se exportaron desde Arcview a Idrisi como un archivo *raster* binario. Se consideraron las siguientes clases de cobertura del suelo: 1) nubes y sombras de nubes, 2) bosques (primarios

y secundarios), 3) pastos arbolados, 4) pastos, 5) plantaciones forestales, 6) suelo desnudo, áreas urbanas y cuerpos de agua, 7) cultivos agrícolas.

Para la selección y observación de sitios se consideraron los siguientes criterios: un mínimo de 40 sitios por cada clase de cobertura del suelo; la heterogeneidad de cada clase de cobertura, el sitio más pequeño debía ser de un tamaño equivalente a 3 x 3 píxeles; se evitó siempre el efecto del borde entre dos clases de cobertura. Se utilizaron 280 sitios de entrenamiento rasterizados; los atributos se asignaron por medio de una tabla de datos y los comandos ‘*edit*’ y ‘*assign*’, empleando la plataforma creada. Una vez rasterizados se procedió a generar las firmas o firmas espectrales de los sitios. El valor de muestreo mínimo de píxeles por clase fue del 10%, usando los programas Erdas, Idrisi (Andes) y Esri (Arcview 3.3). El mapa de uso y cobertura del suelo resultante se exportó a Arcview en formato *arc-raster* binario para su presentación final. Los análisis de cambio multitemporal también se hicieron en Idrisi con el comando ‘*crossstab*’, lo que permitió generar la clasificación y tabulación de datos para los periodos analizados (1986, 1996, 2006) y el cálculo del índice de Kappa.

#### Precisión de la clasificación

En el campo, se realizó una comprobación de las clases obtenidas mediante visitas a los sitios de entrenamiento y otros puntos de verificación (280 en total). Para cada sitio, se comparó la clase de cobertura del suelo observada en el campo con la asignada en la imagen; esto permitió construir una matriz de confusión para calcular las siguientes medidas de precisión: la exactitud global del conjunto de clases, los errores de omisión y de comisión, el índice de Kappa (Lu et ál. 2004, Shao y Wu 2008) y los errores de muestreo de cada clase de cobertura del suelo.

## Priorización de áreas para la restauración forestal

Sobre el mapa de cobertura del suelo del 2006, se superpusieron otras capas de información para determinar la prioridad de restauración forestal de los diferentes sitios. Para ello se creó un modelo con las siguientes variables: 1) presencia o ausencia de bosque, 2) riesgo de inundación, 3) presencia o ausencia de espacios naturales protegidos. El conjunto de características de un pixel particular determinó su ubicación en una de las cinco siguientes categorías de prioridad: a) *crítica*: áreas sin bosque localizadas fuera de espacios naturales protegidos y en zonas con riesgo de inundación; b) *máxima*: áreas sin bosque localizadas dentro de espacios naturales protegidos y en zonas con riesgo de inundación; c) *intermedia*: áreas sin bosque localizadas fuera de espacios naturales protegidos y fuera de áreas con riesgo de inundación; d) *baja*: áreas sin bosque localizadas dentro de espacios naturales protegidos y fuera de áreas de inundación, e) *nula*: áreas con bosque.

### Resultados y discusión

#### Cambios en la cobertura del suelo durante el periodo 1986-2006

El Cuadro 1 y la Fig. 1 muestran los cambios de cobertura del suelo ocurridos durante el periodo en estudio. Las clases de cobertura que consistentemente experimentaron un aumento a lo largo de los 20 años fueron los pastos y los cultivos agrícolas; los pastos arbolados sufrieron una reducción progresiva. Las demás clases de cobertura no mostraron tendencias consistentes de aumento o disminución de superficie. Estos resultados indican una intensificación de los usos del suelo, tal como lo han demostrado otros estudios en zonas tropicales (Sierra 2000, Trejo y Dirzo 2000, Cayuela et ál. 2006, Márquez 2008) y templadas del mundo (Echeverría et ál. 2006, Henríquez et ál. 2006). Lo contrario

**Cuadro 1.** Superficie (absoluta y relativa) de cada clase de cobertura del suelo en las tres fechas analizadas

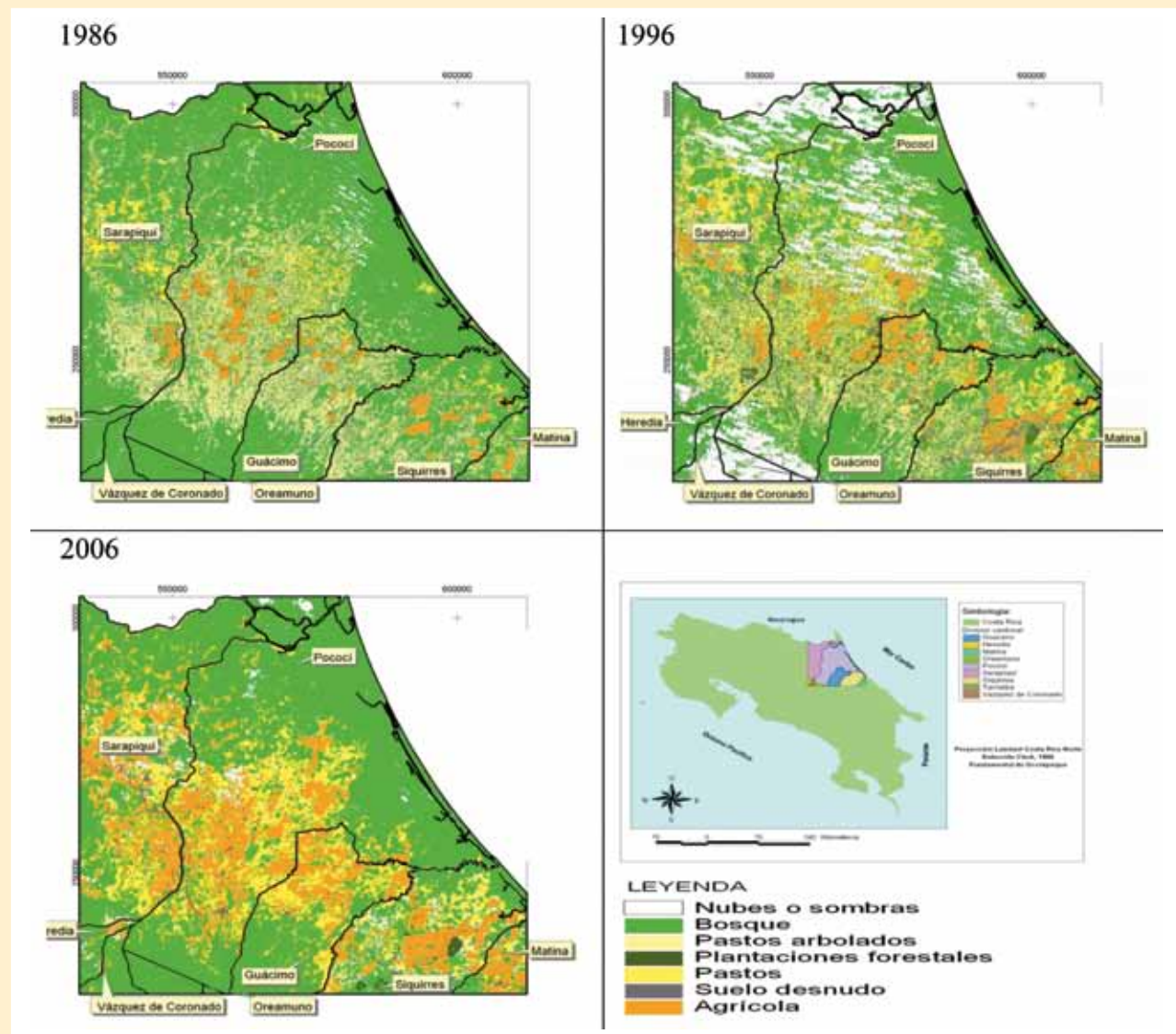
Clase de cobertura	Febrero 1986		Marzo 1996		Marzo 2006	
	Hectáreas	%	Hectáreas	%	Hectáreas	%
Nubes o sombras	15.760,01	3,2	96.067,08	19,49	13.171,69	2,67
Bosque	240.250,55	48,73	123.324,16	25,02	240.360,74	48,76
Pasto arbolado	122.430,52	24,83	64.538,30	13,09	9.779,19	1,98
Plantaciones forestales	36.431,44	7,39	54.264,31	11,01	1.970,27	0,40
Pastos	47.957,27	9,73	74.492,99	15,11	98.002,61	19,88
Suelo desnudo, urbano y agua	10.248,81	2,08	26.266,54	5,33	9.481,64	1,92
Agrícola	19.912,88	4,04	54.038,10	10,96	120.225,34	24,39

sucedió en el sur de Rumanía después del colapso del socialismo, en donde la tasa de abandono de cultivos agrícolas alcanzó un 21,1%, mientras la cubierta forestal y fragmentación de bosques han permanecido estables (Kuemmerle et ál. 2009).

La superficie dedicada a pastos se duplicó en los 20 años estudiados, mientras que los pastos arbolados se redujeron hasta casi desaparecer. Los cambios en estas dos clases de cobertura del suelo probablemente se debieron al auge maderero durante el periodo de análisis. Este periodo coincide con el momento en que tomó impulso el desarrollo de la zona; en consecuencia, el aprovechamiento de árboles aislados cobró fuerza como resultado de la escasez de madera y de las medidas restrictivas para el aprovechamiento del bosque natural impuestas por el gobierno central (Asamblea Legislativa 1996, Arce y Barrantes 2006). Por otra parte, el área dedicada a cultivos agrícolas también registró cambios muy significativos (Cuadro 1). Ello se debió al auge de cultivos como el banano y la piña (Baltodano 2008, Mideplan 2008c, Grau y Aide 2008) y otros cultivos no tradicionales como las plantas ornamentales. Las facilidades para la exportación, por la cercanía al principal puerto de exportación vía marítima, ayudaron al incremento de los cultivos agrícolas. El auge de la agricultura obedece a dos modelos de desarrollo a nivel latinoamericano. El primero se basó en la

diversificación económica y sustitución de importaciones que estimuló la ocupación de tierras forestales. El segundo modelo, impulsado a partir de 1980, se basó en las políticas de ajuste estructural que provocaron un fuerte cambio agrario al conectarse este sector con los mercados internacionales (Pacheco 2006), como consecuencia del incremento en la demanda por alimentos. Este modelo ha causado un incremento acelerado de la deforestación y una mayor presión sobre los bosques (Grau y Aide 2008).

En 1986, la cobertura del suelo con mayor superficie correspondió al bosque, seguida por los pastos arbolados. Las otras clases representaban superficies relativas por debajo del 10%. En 1996, el bosque se había reducido en un 50%, aunque todavía representaba la mayor superficie relativa, pero para el 2006 el bosque había recuperado la extensión inicial, y el uso agrícola ocupaba el segundo lugar en extensión (Cuadro 1). La pérdida de superficie de los bosques en 1996 respecto a 1986, presentó una tasa de deforestación de aproximadamente 6% anual, mucho más alta que la reportada a nivel regional para el mismo periodo (0,42%, según Minae - Fonafifo 1998). A pesar de que es probable que esa incongruencia tenga que ver con un sesgo en la clasificación de las imágenes satelitales debido a la presencia de nubes y sombras de nubes en la imagen de 1996, este resultado también refleja la necesidad de estudiar el fenómeno



**Figura 1.** Clasificación y cartografía de cada clase de cobertura del suelo en las tres fechas analizadas

del cambio de uso del suelo a escala local. Es evidente que se debe tomar en consideración que las diferentes circunstancias locales tienen un efecto directo en los patrones de uso del suelo y que los valores regionales no siempre reflejan estas diferencias.

El área de bosques, entonces, aumentó su extensión durante el segundo periodo analizado debido a los diferentes programas de incentivos y de pago por servicios ambientales implementados en años recientes (Arias 2004, Arce y

Barrantes 2006) y a la prohibición de la tala de bosques para cambio de uso del suelo impuesta por la Ley n° 7575 (Asamblea Legislativa 1996). Este hecho contrasta con lo que sucede en otras zonas del mundo, donde los procesos de reducción de los bosques son constantes (Bocco et ál. 2001, Echeverría et ál. 2006, Etter et ál. 2006, Muschong 2006, Díaz et ál. 2007, Britos y Barchuk 2008, Márquez 2008).

Las plantaciones forestales tuvieron un incremento significativo en

la década 86-96, época en que se implementó el sistema de incentivos del Estado para la reforestación mediante distintos programas concatenados en el tiempo (la deducción del impuesto sobre la renta hasta el año 1986, los certificados de abono forestal y la aplicación de exenciones fiscales para reforestar con recursos propios hasta 1996) (Arias 2004, Arce y Barrantes 2006). Varias circunstancias explican el descenso de la superficie dedicada a plantaciones forestales en el decenio

siguiente (1996-2006). Muchas de las áreas reforestadas se talaron porque alcanzaron su turno de corta; además, se estancó la reforestación debido a recortes presupuestarios en los programas nacionales para esta actividad. Se dio también un cambio completo en la concepción del sistema de incentivos forestales: del subsidio a la actividad forestal se pasó al pago por los servicios ambientales que proporcionan los bosques. Este cambio conlleva más gastos administrativos y legales y la desaparición de otros beneficios creados por ley, lo cual desincentivó la inversión extranjera (Arias 2004, Arce y Barrantes 2006). Para el año 2003, la reforestación se había reducido en un 60% en la zona norte de Costa Rica respecto al periodo 1997-2002; en consecuencia, había mucha tierra disponible para actividades agropecuarias que generan un flujo de caja más constante (Fonafifo 2007). A nivel nacional, el área plantada con árboles se redujo de 9000 ha/año que había a

mediados de la década de 1990 a 3000 ha/año en el 2002-2003, a pesar de que el consumo de madera de plantaciones va en aumento (Arce y Barrantes 2006). Paralelamente, productos agrícolas como la piña y plantas ornamentales -con mejores precios internacionales - entraron a competir por el uso de la tierra. Información más detallada sobre las ganancias y pérdidas en área por clase de cobertura, así como la trayectoria de estos cambios pueden observarse en los Cuadros 2 y 3.

#### Precisión de la clasificación

Debe tenerse presente que en las clasificaciones realizadas, el área real de cada clase de cobertura puede estar sobre o subestimada, debido a la dificultad de diferenciar, en la imagen satelital, entre diferentes grados de cobertura para una misma clase. Las diferencias espectrales entre un bosque primario intervenido y un bosque secundario o un pasto arbolado denso son muy sutiles (Pedroni (2001); a la

vez, un pasto arbolado poco denso puede confundirse con una plantación forestal de edad media o avanzada. Un cultivo agrícola como el banano tiene mucha semejanza con una plantación forestal joven. Otros factores como la topografía, la alta diversidad ecológica y la fragmentación avanzada del bosque son factores que complican los patrones espectrales y reducen la posibilidad de discriminar entre clases de cobertura (Pedroni 2001).

El índice de Kappa de las imágenes utilizadas varió entre el 38 y 39%, lo que indica que la clasificación es al menos un 38% mejor que la esperada por el simple azar. La exactitud global varió entre 43 y 52,2%. En la clasificación de 1986-1996, 1996-2006 y 1986-2006, los valores más altos en errores de omisión corresponden a las coberturas de nubes y sombras de nubes, y a suelo desnudo, agrícola y plantaciones forestales (entre 92,1 y 98,8%). Es evidente, entonces, que estas clases se subestimaron en la clasificación. Estas mismas clases,

**Cuadro 2.** Área por clase de cobertura del suelo y tasas de cambio para el periodo 1986-1996 en el Caribe de Costa Rica

Cobertura	Área total 86 (ha)	Área conservada (86-96) (ha)	Ingresos 86-96 (ha)	Área total 96 (ha)	Cambios de cobertura de 1986 a 1996*						
					Nubes y sombras	Bosque	Pasto arbolado	Plantación forestal	Pastos	Suelo desnudo, urbano y agua	Agrícola
Nubes y sombras (%)	15760,01 (100)	5222,44 (33,14)	90844,64 (576,43)	96067,08 (609,56)	--	2700,81 (17,14)	1340,37 (8,50)	1052,76 (6,68)	2513,26 (15,95)	1663,73 (10,56)	1266,62 (8,04)
Bosque (%)	240250,55 (100)	99662,43 (41,48)	23661,74 (9,85)	123324,16 (51,33)	61609,32 (25,64)	--	14804,1 (6,16)	20765,41 (8,64)	13449,72 (5,60)	9086,48 (3,78)	20873,12 (8,69)
Pasto arbolado (%)	122430,52 (100)	33847,84 (27,65)	30690,46 (25,07)	64538,30 (52,71)	13178,19 (10,76)	12248,97 (10,00)	--	20778,17 (16,97)	27494,5 (22,46)	6376,57 (5,21)	8506,29 (6,95)
Plantación forestal (%)	36431,44 (100)	5429,24 (14,90)	48835,07 (134,05)	54264,31 (148,95)	3997,33 (10,97)	2504,98 (6,88)	6604,89 (18,13)	--	10649,98 (29,23)	2810,71 (7,72)	4434,32 (12,17)
Pastos (%)	47957,27 (100)	16005,55 (33,37)	58487,44 (121,96)	74492,99 (155,33)	8121,12 (16,93)	4316,95 (9,00)	5975,89 (12,46)	4022,18 (8,39)	--	3528,66 (7,36)	5986,93 (12,48)
Suelo desnudo, urbano y agua (%)	10248,81 (100)	2078,79 (20,28)	24187,75 (236,01)	26266,54 (256,29)	2580,27 (25,18)	682,21 (6,66)	1111,73 (10,85)	924,42 (9,02)	2018,60 (19,70)	--	852,78 (8,32)
Agrícola (%)	19912,88 (100)	12118,04 (60,86)	41920,06 (210,52)	54038,10 (271,37)	1358,41 (6,82)	1207,82 (6,07)	853,51 (4,29)	1292,13 (6,49)	2361,37 (11,86)	721,60 (3,62)	--

\*El número indica la cantidad perdida por la clase de la fila y ganada por la clase de la columna.

**Cuadro 3.** Área por clase de cobertura del suelo y tasas de cambio para el periodo 1996-2006 en el Caribe de Costa Rica

Cobertura	Área total 96 (ha)	Área conservada (96-06) (ha)	Ingresos 96-06 (ha)	Área total 2006	Cambios de cobertura de 1996 a 2006*						
					Nubes y sombras	Bosque	Pasto arbolado	Plantación forestal	Pastos	Suelo desnudo, urbano y agua	Agrícola
Nubes y sombras (%)	96067,08 (100)	4793,32 (4,99)	8378,37 (8,72)	13171,69 (13,71)	--	(68,54)	(0,20)	(0,04)	(13,85)	(2,18)	(10,19)
Bosque (%)	123324,16 (100)	97989,99 (79,46)	142370,75 (115,44)	240360,74 (194,90)	2414,82 (1,96)	--	(0,66)	(0,47)	(6,57)	(0,58)	(10,30)
Pasto arbolado (%)	64538,3 (100)	3787,03 (5,87)	5992,16 (9,28)	9779,19 (15,15)	947,17 (1,47)	16231,69 (25,15)	--	(0,52)	(35,94)	(1,39)	(29,66)
Plantación forestal (%)	54264,31 (100)	764,98 (1,41)	1205,29 (2,22)	1970,27 (3,63)	861,8 (1,59)	22609,96 (41,67)	1416,16 (2,61)	--	(22,49)	(1,20)	(29,04)
Pastos (%)	74492,99 (100)	31992,19 (42,95)	66010,42 (88,61)	98002,61 (131,56)	2329,45 (3,13)	12351,56 (16,58)	2540,15 (3,41)	68,23 (0,09)	--	1811,97 (2,43)	23399,44 (31,41)
Suelo desnudo, urbano y agua (%)	26266,54 (100)	2644,67 (10,07)	6836,97 (26,03)	9481,64 (36,10)	941,72 (3,59)	8453,41 (32,18)	565,49 (2,15)	104,29 (0,40)	5627,84 (21,43)	--	7929,12 (30,19)
Agrícola (%)	54038,1 (100)	31498,44 (58,29)	88726,90 (164,19)	120225,34 (222,48)	883,41 (1,63)	16875,59 (31,23)	462,58 (0,86)	67,9 (0,13)	3574,87 (6,62)	675,31 (1,25)	--

\* El número indica la cantidad perdida por la clase de la fila y ganada por la clase de la columna.

más la categoría de pastos arbolados, presentan errores de comisión que van desde 79,8 al 99,5%; o sea que estas clases se sobrestimaron en la clasificación. Los usos del suelo con clases de cobertura más arboladas presentan cifras altas tanto para los errores de comisión como para los de omisión.

Los índices Kappa y errores obtenidos en este trabajo son inferiores a los de otros autores. Segura y Trincado (2003) reportaron un kappa de 0,45 con una exactitud en la clasificación global de 64% y de 77% para la clasificación por clases de cobertura. Pedroni (2001) reporta kappas entre 0,69 y 0,91, con mayor precisión en las clases espectralmente más similares. Brown (2003) logró un kappa máximo de 0,27; Medina (2001) de 0,74 y 0,78 con una exactitud global de 91,3%; Britos y Barchuk (2008), entre 0,85 y 0,94 con una exactitud de 63,6 y 75,9%; Berlanga et ál. (2005) logró una exactitud de 89% con un kappa de 88%, aunque también

cita kappas de 56 y 66% y Callejas (2003) obtuvo una exactitud del 84%. Los errores de muestreo para las diferentes clases de cobertura resultaron inferiores al 10% en todos los casos, lo que demuestra una buena precisión. Estas cifras son similares a las obtenidas en la clasificación de uso del suelo en Guatemala (errores menores del 8,96%, MAGA 2006).

#### Áreas prioritarias de restauración forestal

En el área estudiada existen 251.472 ha sin cobertura boscosa y con potencial para la restauración forestal. De ellas, 42.594 ha se catalogan como de prioridad crítica para la restauración forestal, 3.328 ha de prioridad máxima, 182.524 ha de prioridad intermedia y 23.279 ha de prioridad baja. Del área sin cobertura boscosa 20.836 ha (5,6%) están catalogadas como espacios naturales protegidos y el 16% presenta riesgo de inundación (Fig. 2). Las áreas con prioridad crítica y máxi-

ma incluyen todos aquellos sitios con muy poca elevación sobre el nivel del mar y con topografía plana (menos de un 5% de pendiente). En estas zonas, las principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería. Generalmente, se trata de sitios a orillas de los ríos y frecuentemente inundados durante la época de invierno, lo que pone en peligro vidas humanas, causa pérdidas económicas por la destrucción de cultivos e infraestructura y erosión. Por ejemplo, en los municipios de Sarapiquí, Pococí, Siquires y Guácimo, los daños provocados por las inundaciones del 29 de junio al 8 de julio del 2007 tuvieron un costo de reposición de carreteras, puentes, alcantarillado y otras obras menores de unos US\$12.518.856 (Costa Rica 2007). Un proyecto de restauración forestal en estas áreas, además de minimizar los riesgos y pérdidas sociales y económicas, favorecería la conectividad a escala de paisaje entre los distintos parches de bosques, mejoraría la calidad del

hábitat y la producción de servicios ambientales, y brindaría mayores oportunidades a la protección y conservación de la flora y la fauna local.

Para determinar el esfuerzo que las tareas de restauración forestal significarían para los gobiernos locales, se determinó la superficie de cada categoría de prioridad por cantón. Los cantones con mayor área desprovista de cobertura forestal son Pococí (92.502 ha), Sarapiquí (64.401 ha), Siquirres (38.954 ha) y Guácimo (33.235 ha). El mayor esfuerzo para restaurar al menos las categorías de prioridad crítica y máxima corresponde a los municipios de Sarapiquí, Pococí y Siquirres, con 14.272, 12.732 y 11.724 ha, respectivamente.

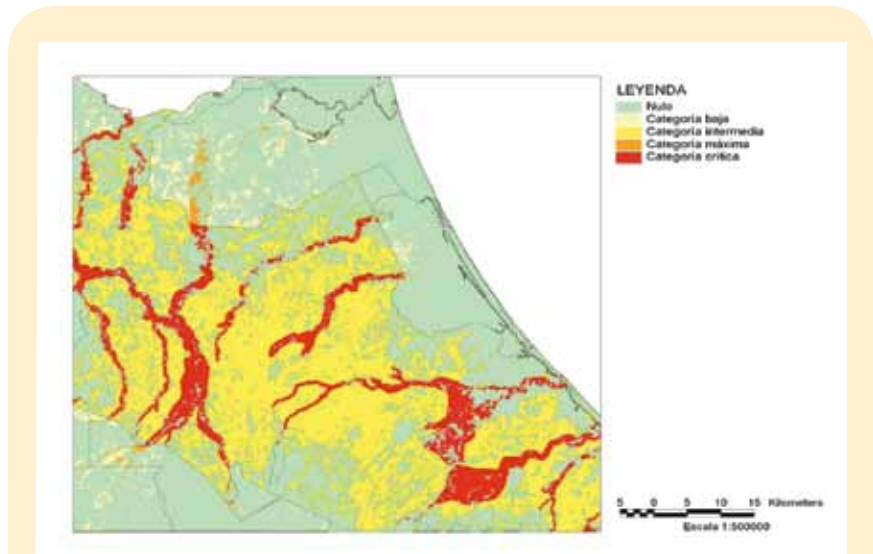
### Conclusiones y recomendaciones

En un futuro cercano es importante reclasificar las áreas catalogadas como prioritarias para la restauración con el criterio de capacidad de uso, ya que esto ayudaría a delimitar los sitios de restauración.

Se propone que los gobiernos locales promuevan la restauración forestal a través de la reforestación. Esta actividad es bien aceptada en la

región porque existe conocimiento y experiencia en el establecimiento y manejo de plantaciones, el crecimiento de las especies es aceptable, ya hay industria procesadora de madera de plantaciones en la zona y las rotaciones cortas favorecen el retorno de la inversión en menor tiempo.

Este enfoque de definición de áreas según su potencial para la restauración podría eventualmente desarrollarse como una metodología para proyectos forestales de fijación de carbono, la cual permitiría enfrentar los aspectos metodológicos que han impedido el éxito de estos proyectos.



**Figura 2.** Áreas identificadas para restauración forestal categorizadas en cuatro órdenes de prioridad: crítica (rojo), máxima (naranja), intermedia (amarillo) y baja (crema). Las zonas en celeste están ocupadas por bosques.

### Literatura citada

- Arce, H; Barrantes, A. 2006. La madera en Costa Rica: situación actual y perspectivas. San José, Costa Rica, Fonafifo-ONF. 23 p.
- Arias, G. 2004. Análisis del impacto económico y social de las plantaciones forestales en Costa Rica. San José, Costa Rica. s.n.t. 25 p.
- Asamblea Legislativa. 1996. Ley Forestal No. 7575. La Gaceta No. 72, 16 de abril de 1996. San José, Costa Rica.
- Baltodano, J. 2008. Bosques, coberturas y uso forestal (en línea). In Décimo cuarto informe del Estado de la Nación. San José, Costa Rica, Mideplan. 38 p. Consultado 3 feb. 2009. Disponible en <http://www.estadonacion.or.cr/>
- Basu, P. 2009. A green investment. If growing forests in India can generate lucrative carbon credits, then why isn't everyone planting trees? *Nature* 457(8):144-146.
- Berlanga, C; Ruiz, A; Covarrubias, H; Ventura, A. 2005 Cambios de los patrones de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, México (en línea). 10 p. Consultado 15 ene. 2009. Disponible en [http://www.google.es/search?hl=es&rlz=1B3GGGL\\_esCR280CR283&q=clasificaci%C3%B3n+de+la+cobertura+del+suelo&start=230&sa=N](http://www.google.es/search?hl=es&rlz=1B3GGGL_esCR280CR283&q=clasificaci%C3%B3n+de+la+cobertura+del+suelo&start=230&sa=N)
- Bocco, G; Mendoza, M; Masera, O. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Boletín del Instituto de Geografía* No. 44:18-38. UNAM.
- Bonan, GB. 2008. Forest and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320(5882):1444-1449.
- Britos, AH; Barchuk, AH. 2008. Cambios en la cobertura y en el uso de la tierra en dos sitios del Chaco Árido del noroeste de Córdoba, Argentina. *Agriscientia* 25(2):97-110.
- Brown, S. 2003. Finalización de Líneas Base para Proyectos de Deforestación Evitada. Reporte elaborado para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Winrock International. Disponible en: <http://zunia.org/uploads/media/knowledge/Deforestation%20baselines-SP.pdf>
- Callejas, A. 2003. Clasificación de la cobertura del suelo en la Sierra El Fraile y San Miguel, utilizando percepción remota y sistemas de información geográfica. Tesis Maestro en Ciencias. Monterrey, MX, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. 88 p.
- Cayuela, L; Rey Benayas, JM; Echeverría, C. 2006. Clearance and fragmentation of tropical montane forests in the highlands of Chiapas, Mexico (1975-2000). *Forest Ecology and Management* 226(1-3):208-218.



- Costa Rica (Ministerio de la Presidencia). 2007. Plan general de la emergencia "inundaciones y deslizamientos asociados a sistemas de baja presión en zona norte y vertiente Caribe del 30 junio al 9 de julio". San José, Costa Rica. Decreto Ejecutivo N° 33859-MP. 11 p.
- Díaz, JM; Aller, D; Martín, A; Barcia, B; Pereira, S. 2007. Dos perspectivas sobre la cartografía de coberturas y usos del suelo en Galicia. *Revista Gallega de Economía* 16(1):1-23.
- Echeverría, C; Coomesa, D; Salas, J; Rey-Benayas, JM; Lara, A; Newton, A. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation* 130:481-494.
- Etter, A; McAlpine, C; Wilson, K; Phinn, S; Possingham, H. 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114(2-4):369-386.
- Fonafifo (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). 2007. Absorción de CO2 a través de actividades forestales en la zona norte de Costa Rica. San José, Costa Rica. 8 p.
- Grau, R; Aide, M. 2008. Globalization and land-use transitions in Latin America. *Ecology and Society* 13(2): art. 16.
- Henríquez, C; Azócar, G; Aguayo, M. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* N° 36:61-74.
- Herrera, W. 1985. Clima de Costa Rica. In Gómez, LD. (ed.). *Vegetación y clima de Costa Rica*. San José, Costa Rica, UNED. V. 2. 118 p.
- Holdridge, L. 1967. *Life zone ecology*. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2006. Información meteorológica (en línea). Consultado el 23 ago. 2006. Disponible en <http://www.imn.ac.cr>
- ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2004. Atlas digital de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica.
- Kuemmerle, T; Muller, D; Griffiths, P; Rusu, M. 2009. Land use change in Southern Romania after the collapse of socialism. *Regional Environmental Change* 9(1):1-12.
- Lu, D; Mausel, P; Brondizio, E; Moran, E. 2004. Change detection techniques. *International Journal Remote Sensing* 25(12):2365-2407.
- MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, GU). 2006. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra de la República de Guatemala año 2003. Escala 1:50.000. Memoria técnica y discusión de resultados. 214 p.
- Márquez, A. 2008. Cambio de uso de suelo y el desarrollo turístico en Bahía de Banderas, Nayarit. *Ciencia UANL* 11(2):161-167.
- Medina, J. 2001. Evaluación de metodologías de detección de cambios del uso del suelo a través del análisis digital multitemporal de imágenes satelitales Landsat TM en la IX Región, Chile. Tesis Ingeniero Forestal. Temuco, Chile, Universidad Católica. 89 p.
- Mena, M. sf. Clima de Costa Rica; vertiente del Caribe. Instituto Meteorológico Nacional (en línea). Consultado 03 ene. 2007. Disponible en [www.imn.ac.cr/educacion/climacr/vertient\\_caribe.html](http://www.imn.ac.cr/educacion/climacr/vertient_caribe.html).
- Merger, E. 2008. Forestry carbon standards 2008 - A comparison of the leading standards in the voluntary carbon market and the state of climate forestation projects. Disponible en <http://www.carbonpositive.net/>
- Mideplan (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica). 2008a. Capacidad de uso del suelo por región (en línea). Consultado 03 ene. 2008. Disponible en <http://www.mideplan.go.cr/sides/ambiental/21-1.htm>
- Mideplan (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica). 2008b. Nivel educativo de la población (en línea). Consultado 03 ene. 2008. Disponible en <http://www.mideplan.go.cr/sides/04-01.htm>
- Mideplan (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica). 2008c. Décimo cuarto informe del Estado de la Nación (en línea). San José, Costa Rica. p. irr. Consultado 03 feb. 2009. Disponible en <http://www.estadonacion.or.cr/>
- Minae (Ministerio de Ambiente y Energía); Fonafifo (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). 1998. *Costa Rica: hacia la sostenibilidad de los recursos naturales*. San José, Costa Rica.
- Muschong, D. 2006. Cambios en el uso del suelo en dos cuencas de la ecoregión Andino-Patagónica, Neuquén, Argentina (en línea). Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Consultado 12 mar. 2009. Disponible en [http://www.presi.unlp.edu.ar/secyt/cyt\\_html/ebec07/pdf/muschong.pdf](http://www.presi.unlp.edu.ar/secyt/cyt_html/ebec07/pdf/muschong.pdf)
- Pacheco, P. 2006. Agricultural expansion and deforestation in lowland Bolivia: the import substitution versus the structural adjustment model. *Land Use Policy* 23(3):205-225.
- Pedroni, L. 2001. Discriminación de diferentes tipos de bosque tropical mediante imágenes de satélite y datos auxiliares. *Revista Forestal Centroamericana* 34:12-18.
- Pielke, RA. 2005. Land use and climate change. *Science* 310(5734):1625-1626.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo); PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente); CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe); BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2000. *Conservación y aprovechamiento sustentable de los bosques tropicales húmedos de América Latina y el Caribe* (en línea). [XII Reunión del Foro de Ministros de Recursos del Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. Bridgetown, Barbados. 2-7 mayo 2000]. 14 p. Consultado 10 mar. 2009. Disponible en <http://www.pnuma.org/forumofministers/12-barbados/bbd03e-bosquestropicaleshumedos.pdf>
- Quesada, R. 2007. Los bosques de Costa Rica. [IX Congreso Nacional de Ciencias: Exploraciones fuera y dentro del aula. 24 y 25 agosto 2007, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica]. 16 p.
- Salinas, Z; Hernández, P. (Eds.). 2008. *Guía para el diseño de Proyectos MDL forestales y de bioenergía*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie Técnica. Manual Técnico no. 83. 171 p.
- Segura, R; Trincado, G. 2003. Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. *Bosque* 24(2):43-52.
- Shao, G; Wu, J. 2008. On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data. *Landscape Ecology* 23(5):505-511.
- Sierra, R. 2000. Dynamics and patterns of deforestation in the western Amazon: the Napo deforestation front (1986-1996). *Applied Geography* 20(1):1-16.
- Trejo, I; Dirzo, R. 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94(2):133-142.