

Volumen 1

# Cartografía base

para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014

A stylized illustration of a forest landscape. The background is a light green gradient. In the foreground, there are several trees with rounded canopies in shades of green and yellow. A prominent tree in the center has a reddish-brown trunk. The overall style is flat and graphic.

2015

Dentro del marco del Inventario Forestal Nacional, y como parte de las actividades del Programa Regional de Reducción de Emisiones de la Degradación y Deforestación de Bosques en Centroamérica y República Dominicana (REDD/CCAD-GIZ), se ha elaborado una serie de publicaciones para la ejecución del Inventario Forestal Nacional y las acciones de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de la estrategia REDD. Esta publicación, denominada “Base cartográfica para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014” es parte de dicho esfuerzo.

634.920.972.86

C8375m Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

Cartografía base para el inventario forestal nacional de Costa Rica 2013-2014: volumen 1 / Preparado por Dr. Edgar Ortiz Malavassi-consultor-; SINAC, Programa REDD-CCAD-GIZ-FONAFIFO. -- San José, Costa Rica: SINAC, 2015.

52 p. : il. : col. ; 28 cm.

Programa REDD-CCAD-GIZ  
ISBN: 978-9977-50-120-8

1. INVENTARIO FORESTAL 2. COSTA RICA 3. LEGISLACION AMBIENTAL. 4. SISTEMA NACIONAL DE AREAS DE CONSERVACION. 5. PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE 6. GESTION AMBIENTAL. I. Ortiz Malavassi, Edgar Ortiz II. FONAFIFO III. Título.

#### Responsable técnico Programa REDD/CCAD/GIZ

Abner Jiménez

Especialista Sectorial

Programa REDD para América Central y República Dominicana

<http://www.reddccadgiz.org>

#### Citar como

Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) – Programa REDD-CCAD-GIZ. 2015. Cartografía base para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2013-2014. Preparado por Ortiz, E. et al. como consultor para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica, dentro del marco del Programa REDD/CCAD/GIZ. San José, Costa Rica. 52 p.

#### Responsables técnicos nacionales

Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC)

Gilbert Canet Brenes – Director del Inventario Forestal Nacional (IFN)

María Isabel Chavarría E. – Coordinadora técnica IFN

Mauricio Castillo Núñez – Especialista en teledetección

Carlos Varela Jiménez

#### Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (Fonafifo)

Alberto Méndez

María Elena Herrera

Guisella Quirós

Javier Fernández - Consultor

#### Contribuciones

El desarrollo metodológico y técnico de este trabajo fue responsabilidad del Dr. Edgar Ortiz Malavassi, consultor, con el apoyo de: Ing. Alejandra Méndez B., Ing. Arianne Gómez G., Ing. Daniel Villavicencio, Ing. Marcos Solano e Ing. Marilyn Ortega. La supervisión técnica por parte del SINAC estuvo a cargo del Ing. Mauricio Castillo Núñez.

#### Edición de estilo

Elizabeth Mora Lobo



# Contenido

Presentación .....	5
Antecedentes .....	6
Objetivos .....	7
Definición de bosque adoptada .....	8
Propuesta de estratos para el IFN y MRV-REDD .....	9
Estratos biogeográficos .....	9
Validación de la propuesta de estratos por regiones biogeográficas .....	11
Validación con datos puntuales .....	11
Comprobación visual de límites de estratos a partir de imágenes RapidEye (532-RGB) .....	12
Tipos de bosque definidos en Costa Rica .....	14
Formaciones vegetales que se consideran en el IFN y MRV-REDD .....	14
Otras categorías de formaciones vegetales .....	20
Materiales y métodos .....	24
Imágenes satelitales RapidEye .....	24
Mosaicos de imágenes RapidEye para Costa Rica .....	25
Estrategia metodológica .....	26
Corrección atmosférica .....	27
Segmentación de las imágenes RapidEye .....	28
Clasificación no supervisada de la asociación de polígonos de segmentación .....	28
Validación de la exactitud .....	30
Construcción de la malla de puntos .....	30
Control de calidad .....	32
Validación independiente de campo .....	33
Validación de los puntos mediante visitas de campo .....	35
Validación de los puntos mediante interpretación de ortofotografías BID-Catastro .....	35
Mapa de pastos arbolados .....	38
Resultados .....	38
Validación de la cartografía con respecto a la malla de puntos .....	38
Validación de la cartografía con respecto a la validación de campo .....	40
Bibliografía .....	43
Anexos .....	44
Anexo 1. Pre-procesamiento de imágenes RapidEye .....	44
Anexo 2. Formulario para la validación independiente de la cartografía .....	48
Anexo 3. Metodología de clasificación de imágenes RapidEye .....	50





## Presentación

El Inventario Forestal Nacional de Costa Rica (IFN) es una iniciativa del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), con el apoyo técnico y financiero del Programa regional de reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques en Centroamérica y República Dominicana (REDD/CCAD/GIZ). En primera instancia, esta iniciativa obedece a una necesidad institucional de la Administración Forestal del Estado: conocer las existencias forestales del país, su ubicación, extensión, estado, composición florística y biodiversidad forestal, con el fin de contar con un insumo fundamental para la planificación y el ordenamiento de las tierras forestales del país. Sin embargo, en sí mismo, el IFN busca ser una herramienta para la aplicación y toma de decisiones acordes con las políticas del sector forestal costarricense.

Otro de los propósitos fundamentales del inventario es servir de base para el Sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de la estrategia REDD propuesta por el país.

Este primer inventario forestal de Costa Rica 2013-2014 se ha diseñado en forma tal que permita generar información en cantidad y calidad para que distintos usuarios gubernamentales y no gubernamentales que forman parte del sector forestal puedan proponer acciones informadas para el manejo y conservación de los recursos forestales del país.

El proceso del inventario ha cumplido con las diversas etapas que se requieren para conseguir un producto de alta calidad; entre ellas, la definición de los objetivos, la creación de la base cartográfica para el diseño del IFN, el diseño del muestreo, la definición de variables a medir, la planificación e implementación de la campaña de campo y, finalmente, el procesamiento, análisis e interpretación de los resultados.

La ejecución del IFN ha sido responsabilidad de un Comité Director, compuesto por funcionarios de la AFE (SINAC y Fonafifo), con la participación de asesores invitados. La función primordial del Comité Director fue orientar las actividades para que se cumplieran los objetivos establecidos para el IFN y el mecanismo MRV de REDD.

Presentamos a la comunidad costarricense este primer volumen de una serie de publicaciones resultado del IFN. La **Base cartográfica para el Inventario Forestal Nacional de Costa Rica, 2013- 2014** incluye el primer mapa de tipos de bosque que se ha elaborado para el país, el cual se obtuvo a partir de imágenes de alta resolución, y que constituye la base de la estratificación de tipos de bosques utilizada durante el inventario forestal.

Gilbert Canet Brenes  
Director del IFN – Costa Rica  
SINAC- MINAE



## Antecedentes

La Ley Forestal 7575 (1996) le otorga a la Administración Forestal del Estado (AFE) la responsabilidad de “Realizar el inventario y la evaluación de los recursos forestales del país, de su aprovechamiento e industrialización”. Para cumplir con este mandato, y ante la necesidad de contar con un sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) para el desarrollo de la Estrategias REDD propuesta por el país, la AFE ha decidido realizar durante los años 2013- 2014, el Inventario Forestal Nacional (IFN), el cual genera información básica para el manejo de los recursos forestales del país; además, en respuesta al mecanismo MRV de la estrategia REDD, tal herramienta debe poder repetirse en el tiempo para estimar y reportar los cambios en la cobertura forestal y en acumulación de carbono.

A través de consultas técnicas a diferentes entes y expertos, la AFE ha determinado que existe compatibilidad entre las necesidades y la calidad de información requerida por el IFN y el MRV-REDD y que, asimismo, la información generada por el IFN puede servir para probar otros sistemas de estimación de las existencias de carbono en diferentes ecosistemas boscosos. En este documento se presenta la propuesta de estratificación de los bosques para la realización del IFN de Costa Rica y para el sistema de monitoreo, reporte y verificación de la estrategia REDD.

Para que haya congruencia entre los objetivos del IFN y el MRV-REDD, para los diferentes eventos de monitoreo se han definido técnicas de estimación de área de bosques similares a las usadas para establecer la línea base de existencias de carbono (en t de CO<sub>2</sub>).

Uno de los aspectos esenciales del diseño del IFN -y por tanto del MRV-REDD- es la estratificación de la cobertura forestal. Esta estratificación tiene como objetivo dividir el área total de bosques a muestrear en estratos homogéneos, para así disminuir los errores de estimación de las existencias madera y carbono en los diferentes eventos de monitoreo.

Costa Rica es un país con condiciones muy diversas de geología, clima y suelos. Con apenas 51.100 km<sup>2</sup> de superficie terrestre, se estima que posee más de medio millón de especies; o sea, aproximadamente el 3,6 % de las especies esperadas para el planeta. Sin duda, esto constituye un gran reto técnico para la identificación de los estratos de muestreo para un sistema de inventario forestal continuo que permita estimar las existencias de recursos maderables y de carbono (en t CO<sub>2</sub>). Es, entonces, fundamental partir de objetivos claramente definidos para el inventario y el mecanismo MRV, para garantizar que la estratificación de la cobertura forestal u otros usos cumpla los propósitos esperados.



## Objetivos

Los objetivos propuestos para el IFN fueron los siguientes (SINAC-Fonafifo 2011b):

### Objetivo general

Determinar las existencias, características y el estado de los recursos forestales del país como base para orientar el ordenamiento de las tierras forestales en la toma de decisiones para su manejo y administración.

### Objetivos específicos

1. Determinar el área de cobertura forestal del país por tipos de bosque.
2. Determinar las existencias y el estado productivo por tipos de bosque, tal como dendrometría, especies, abundancia, biomasa y carbono almacenado.
3. Servir de base para la determinación de tasas de recuperación, deforestación y degradación de los bosques.
4. Generar información para el sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) para la Estrategia Nacional REDD-Costa Rica.
5. Generar información para orientar el ordenamiento de tierras forestales y atender los compromisos del país en el ámbito nacional e internacional.

### Objetivos de estratificación

Cuando en la población existe mucha variación entre unidades de muestreo, el error de muestreo en un muestreo simple aleatorio o sistemático será, necesariamente, alto. Este es el caso de la estimación de existencias de madera y de carbono en Costa Rica debido a la gran variación entre ecosistemas forestales. En estas circunstancias, es necesario subdividir la población en subpoblaciones, y agrupar en estratos las unidades con condiciones similares, de forma que las unidades de muestreo dentro de los estratos sean lo más homogéneas posible, y que los estratos sean heterogéneos entre sí (Ortiz 2013).

El propósito de la estratificación es agrupar las unidades de muestreo en estratos homogéneos con respecto a la variable o variables que se van a medir, o bien, con respecto a variables correlacionadas. Por ejemplo, si la variable a evaluar es 'biomasa en peso seco por hectárea', se pueden crear estratos a partir del tamaño de los árboles, calidad de sitio o número de árboles por hectárea. Aun si no se cuenta con información detallada de las características de la población, es recomendable subdividir las grandes extensiones de bosque en bloques o estratos. Esta estrategia facilita la localización de las unidades de muestreo en el campo y permite una distribución más regular de la muestra en toda la población (Ortiz 2013).

Husch et al. (1982) señala que el muestreo estratificado tiene una desventaja: para hacer estimaciones de medias y desviaciones, es necesario conocer el tamaño de cada estrato, por lo que se debe hacer un muestreo en cada estrato. Como principal ventaja se señala que para un determinado tamaño de muestra "n", el muestreo estratificado siempre va a generar estimados más precisos de los parámetros poblacionales, que los que se generan con un muestreo simple aleatorio con igual tamaño de muestra (Ortiz 2013).



## Definición de bosque adoptada

Uno de los aspectos relevantes para iniciar la estratificación del uso y cobertura de un territorio es la definición de bosque que el país adopte para establecer las bases del monitoreo de los cambios en las reservas de carbono en los diferentes estratos.

Para efectos del diseño del IFN y el MRV-REDD, se adoptó la definición de bosque propuesta por Costa Rica para los proyectos de desarrollo limpio del MDL (SINAC-Fonafifo 2011a):

Bosque es una área de tierra con un tamaño mínimo de 1,0 hectárea, con una cobertura de dosel (o el equivalente en densidad) de más de 30%, con árboles con un potencial para alcanzar una altura mínima de 5 metros a su madurez in situ. Un bosque puede consistir de formaciones cerradas donde los árboles de varios estratos y sotobosque cubren una alta proporción del terreno, o de bosque abierto. Rodales naturales jóvenes y todas las plantaciones que no hayan alcanzado todavía una cobertura de dosel del 30%, o una altura de 5 metros son considerados bosques.

Sin embargo, se hace notar que la frase: “o el equivalente en densidad”, es confuso en español, ya que no se sabe si se refiere a un número de árboles o a una área basal, por lo que se recomendó que para los propósitos del IFN y el MRV-REDD, se modificará de la forma siguiente:

Bosque es un área de tierra con un tamaño mínimo de 1,0 hectárea, con una cobertura de dosel (copa) de más de 30%, con árboles con un potencial para alcanzar una altura mínima de 5 metros a su madurez in situ. Un bosque puede consistir de formaciones cerradas donde los árboles de varios estratos y sotobosque cubren una alta proporción del terreno, o de formaciones abiertas con cobertura del dosel (copa) de más de 30%. Rodales naturales jóvenes, y todas las plantaciones que no hayan alcanzado todavía una cobertura de dosel del 30%, o una altura de 5 metros son considerados bosques.

Para las condiciones climáticas de Costa Rica, reflejadas en las diferentes zonas de vida, la definición anterior reconoce como bosques las siguientes formaciones vegetales:

- Bosque maduro
- Bosque bajo manejo forestal
- Bosque natural secundario
- Plantación forestal
- Sistema agroforestal
- Bosque intervenido
- Manglar
- Humedal dominado por palmas

Desde luego, tales formaciones deben, además, cumplir con los parámetros de área mínima, cobertura de dosel y altura. No se incluyen como bosque ni los páramos, ni los pastizales naturales, ni las plantaciones de palma africana.



## Propuesta de estratos para el IFN y MRV-REDD

La propuesta de estratificación para el IFN y el MRV-REDD incluye dos niveles de estratificación. En el primero se identifican zonas biogeográficas (ecorregiones), mientras que en el segundo nivel se identifican tipos de bosques dentro de cada ecorregión (Figura 1).

### Estratos biogeográficos

Para identificar los estratos para el IFN se consideró la biogeografía de Costa Rica. Esta se define por la variación espacial en elevación (en msnm), con la consecuente disminución en temperatura media anual y en el régimen de lluvias. Esta variable define franjas o pisos altitudinales, tanto en la vertiente Pacífica como en la vertiente Atlántica, con tipos de bosques diferenciables por composición florística y estructura (altura y área basal) y, por lo tanto, variaciones en las existencias de biomasa y en las tasas de crecimiento. En algunos casos, estas características pueden identificarse con límites absolutos o discontinuidades, como en la línea divisoria de las dos vertientes en la provincia de Guanacaste, las zonas subalpinas con más de 3100 o 3200 msnm y la denominada “línea del café” (1700 a 1800 msnm) (Figuras 2, 3 y 4).

El 61,8% del territorio costarricense posee temperaturas superiores a 24°C (condiciones muy calientes); el 23,8% corresponde a pisos montanos (tierras frescas a frías) y solo el 0,3% del territorio posee condiciones térmicas de muy frías a heladas que corresponden al bioma de páramo (Fallas 2011). La división del país en pisos térmicos considera la configuración natural del relieve. El criterio y la terminología utilizada para crear y designar los pisos térmicos son similares a los utilizados tanto por Holdridge (1978) en su sistema de zonas de vida, como por Kappelle y Brown (2001) y Silva (2002) para designar los pisos térmicos y altitudinales en Costa Rica y Venezuela.

El segundo factor que define las características de estructura, composición florística y dinámica sucesional de los bosques en Costa Rica es el número de meses secos, más marcados a elevaciones bajas (menos de 1000 msnm). Fallas y Valverde (2009) definen como mes seco aquel en el que la precipitación es igual o inferior a 75 mm -ese valor corresponde aproximadamente a 0,8-1,2 de la evapotranspiración potencial mensual (60-90 mm/mes)-.

Entonces, a partir de estos dos factores (elevación y meses secos), la propuesta es definir estratos para el IFN y el MRV-REDD. Dado que existe una capa geográfica (en coordenadas CRTM05) para ambos criterios, es posible mapear ambos estratos y superponerlos sobre las imágenes de RapidEye disponibles para el IFN, así como sobre los mapas de cobertura forestal de 1997 y/o 2005. De esta manera, es posible usar estas biogeorregiones para planificar el IFN o el MRV mediante un muestreo estratificado. Para definir los estratos, inicialmente se delimitarán cuatro pisos altitudinales y luego se identificarán -dentro del piso térmico de 0 a 1000 msnm- cinco patrones de distribución de lluvias por medio de la variable número de meses secos.

Los pisos altitudinales se identificaron a partir de una capa de elevaciones sobre el nivel del mar disponible en el Atlas Digital de Costa Rica (ITCR 2008). Para identificar los patrones de precipitación se usó una capa de unidades bióticas (Herrera y Gómez 1993). Los cuatro pisos altitudinales seleccionados y sus características se presentan en el Cuadro 1; las clases de meses secos se presentan en el Cuadro 2. Con el procedimiento propuesto se genera formación de siete estratos (Cuadro 3, Figura 1), uno de los cuales corresponde al bioma de páramo, el cual no califica como bosque ni para el IFN ni para el MRV-REDD.



**Cuadro 1.** Límites de altura de los cuatro pisos altitudinales seleccionados para la formación de estratos para el IFN y el MRV-REDD en Costa Rica

Piso altitudinal	Ámbito de altura (msnm)	Observaciones
1	0 a 1000	Los 1000 msnm corresponden aproximadamente a la cota de altura en donde se reduce la presencia de especies de árboles de hojas bipinnadas, en Costa Rica; es el límite para la transición de bosque tropical a bosque premontano.
2	1000 a 1700	En Costa Rica, 1700 es conocida como la 'línea del café' o 'de escarcha', ya que a partir de esta altura disminuye la presencia de plantaciones de café para dar paso a pasturas y lecherías; hay una mayor abundancia de árboles del género <i>Quercus</i> .
3	1700 a 3100	Los 3100 msnm son la cota de altura a partir de la cual desaparecen los bosques para dar paso a los páramos, en Costa Rica
4	3100 a 3840	En estas elevaciones desaparece el bosque; hay páramos de vegetación arbustiva y pastos, pero estas formaciones no califican como bosque en Costa Rica.

Fuente: Herrera y Gómez (1993).

**Cuadro 2.** Número de meses secos seleccionados para la formación de estratos para el IFN y el MRV-REDD en Costa Rica

Meses secos	Ubicación
0	Vertiente Caribe, llanuras de Tortuguero, península de Osa, valles de Diquís y Coto Colorado
1 a 2	Franja en zona montañosa hacia la divisoria topográfica de cada vertiente (Atlántica y Pacífica)
3 a 4	Pacífico Central, zona de piedemonte, punta Burica
5 a 6	Parte de península de Nicoya, valle de El General, parte del Valle Central

Fuente: Basado en datos del mapa de unidades bióticas (Herrera y Gómez 1993).

**Cuadro 3.** Propuesta de estratos biogeográficos para la ejecución del IFN y el MRV-REDD en Costa Rica

Nombre	Estrato	Piso altitudinal	Meses secos	Área (ha)	Área (%)
Bosque tropical siempre verde	Menos de 1000 msnm, sin estación seca	Basal	0	1 127 935	22,1
Bosque tropical semiperenne	Menos de 1000 msnm, con 1-2 meses secos	Basal	1 a 2	750 186	14,7
Bosque tropical semideciduo	Menos de 1000 msnm, con 3-4 meses secos	Basal	3 a 4	894 586	17,5
Bosque tropical deciduo	Menos de 1000 msnm, con 5-6 meses secos	Basal	5 a 6	1 190 807	23,3
Bosque premontano	Entre 1000 y 1700 msnm	Premontano	NA	676 713	13,3
Bosque montano de roble y alnus	Entre 1700 y 3100 msnm	Montano bajo y montano	NA	443 648	8,7
Páramo	Más de 3100 msnm	Subalpino	NA	18 676	0,4

Fuente: Ortiz (2013), a partir de datos de Herrera y Gómez (1993) y datos digitales de relieve (ITCR 2008).



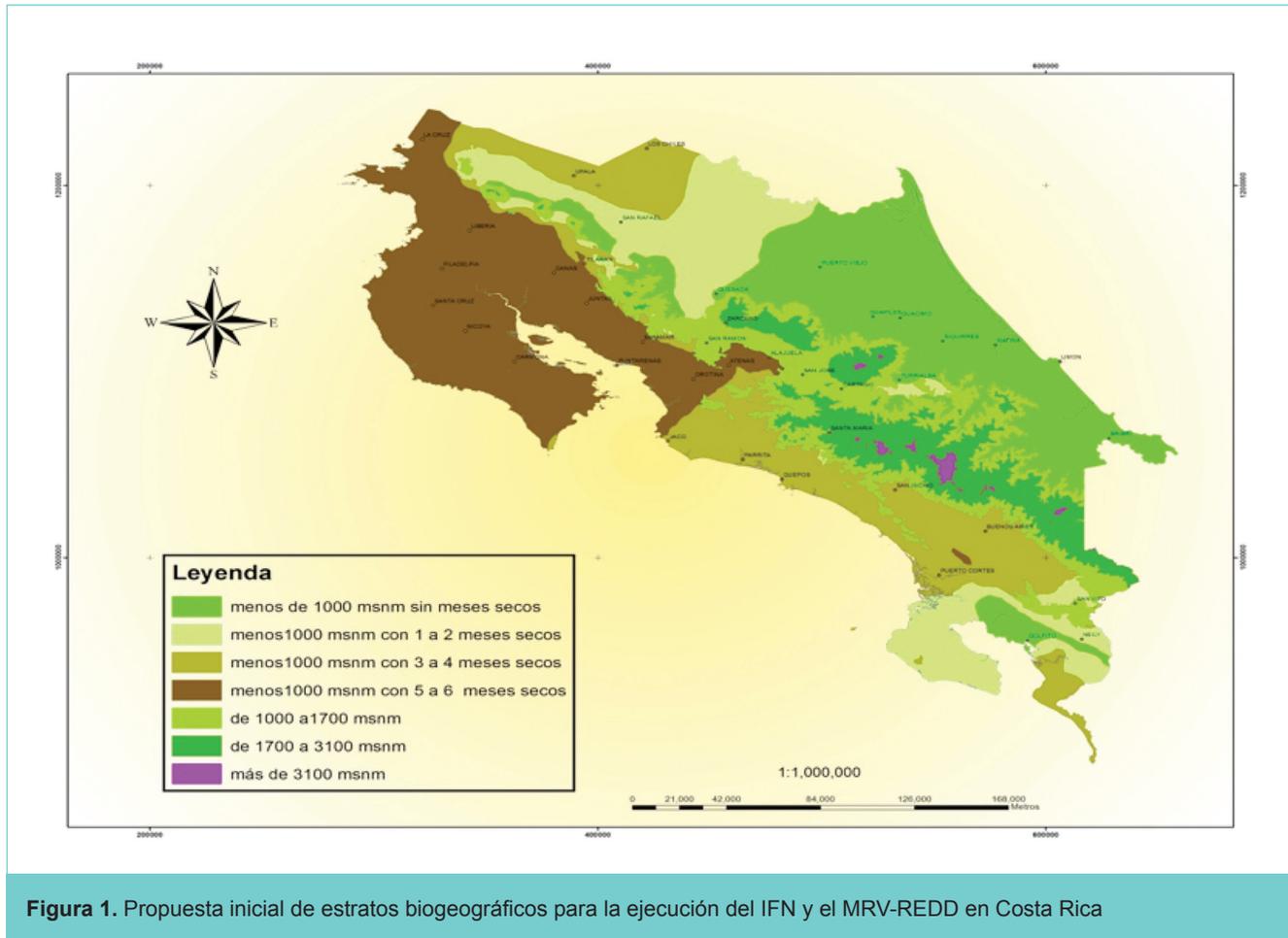


Figura 1. Propuesta inicial de estratos biogeográficos para la ejecución del IFN y el MRV-REDD en Costa Rica

### Validación de la propuesta de estratos por regiones biogeográficas

Una vez identificados los estratos se procedió a comprobar su validez mediante dos pruebas: a) estimación de la variabilidad en área basal (en m<sup>2</sup>/ha) mediante datos puntuales recopilados por Ulate (2011); b) comprobación visual de los límites de los estratos en el mosaico de imágenes en falso color de RapidEye (532-RGB) suministradas por el Comité Director del IFN.

#### Validación con datos puntuales

La validación de la propuesta del estrato mediante los datos de Ulate (2011) se presenta en el Cuadro 4. Los resultados muestran que, con esta estratificación, los coeficientes de variación del área basal se mantienen dentro de un rango entre 19 y 36% para todas regiones en donde se debe realizar el IFN. La mayor variación corresponde al estrato de bosque tropical siempreverde (menos de 1000 msnm, sin estación seca), el cual es el que cubre la mayor área (Cuadro 5). Los datos sugieren que existen únicamente tres estratos con respecto a la variable área basal: áreas de menos de 1000 msnm sin estación seca, áreas de menos de 1000 msnm con más de un mes de estación seca y áreas de más de 1000 msnm. Esta información coincide con la descripción de la biogeografía hecha por Ewel (1980) para Costa Rica; sin embargo, debido a que no existen suficientes

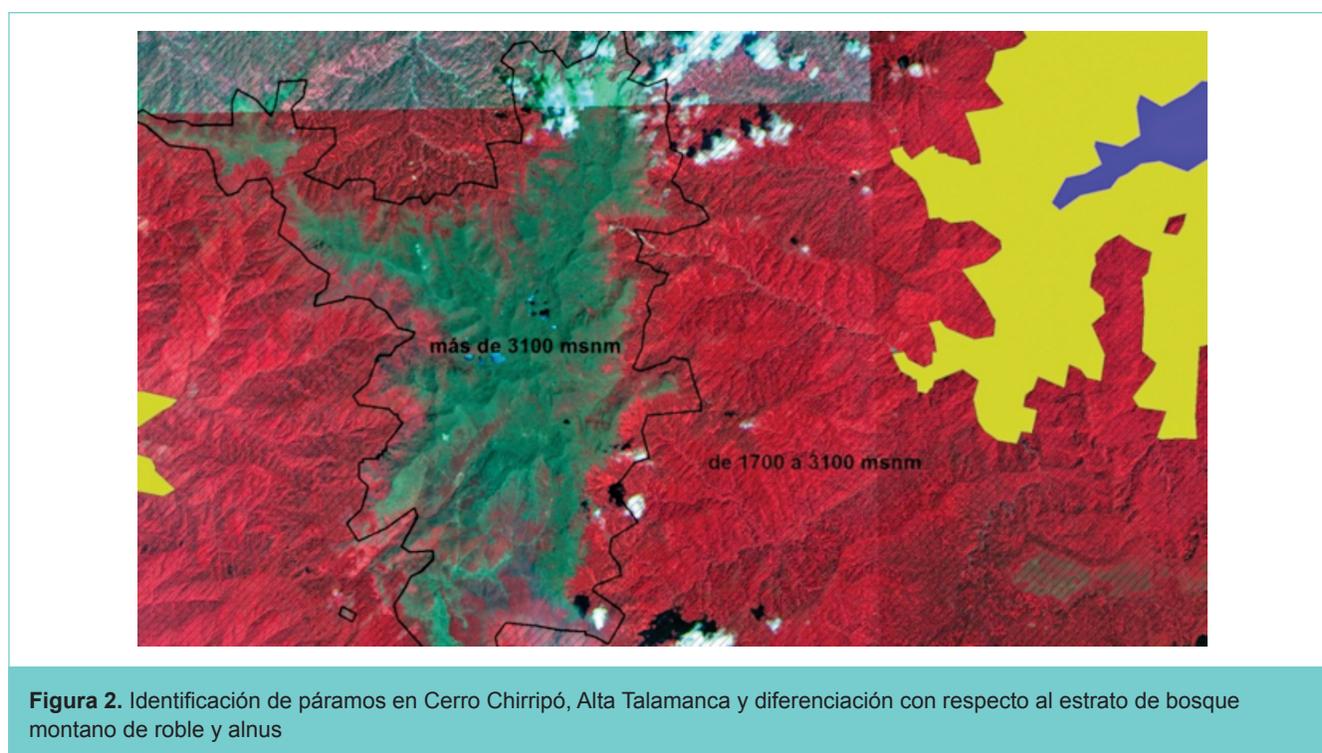


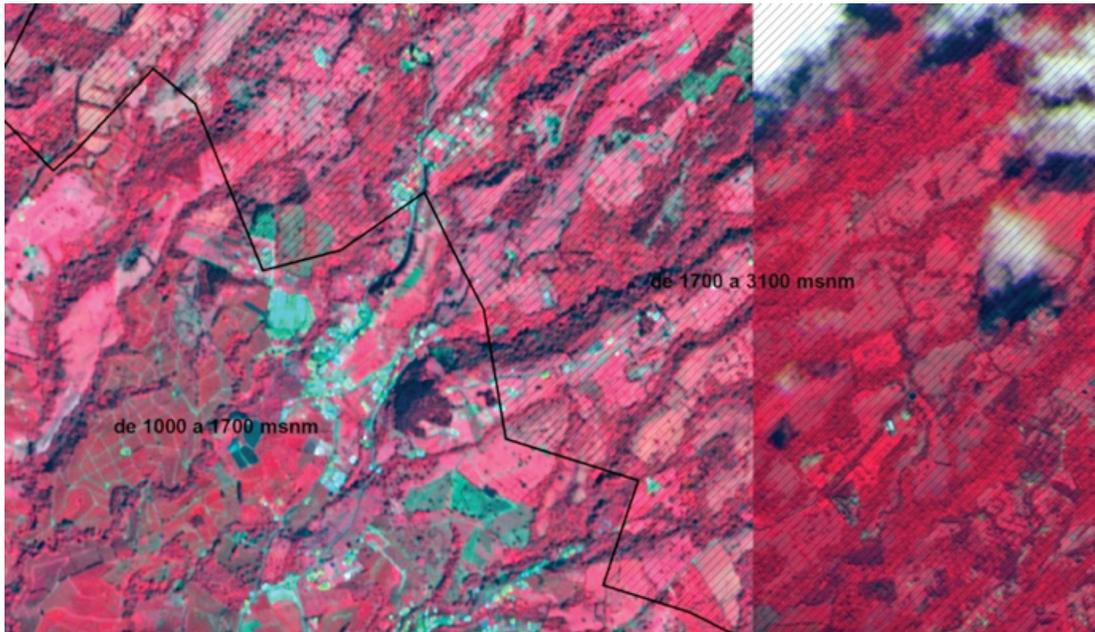
datos para todos los estratos, no es posible demostrarlo estadísticamente; por ello, es preferible mantener los estratos preliminares propuestos, aunque siempre queda la posibilidad de reducir el número de estratos mediante una post-estratificación. A partir de los datos del Cuadro 4, es posible estimar, en forma preliminar y con un 95% de confiabilidad, un error de muestreo promedio del 14,5% en la estimación del área basal del bosque maduro.

**Cuadro 4.** Validación de la propuesta de estratos a partir de datos de área basal de bosque maduro recopilados por Ulate (2011)

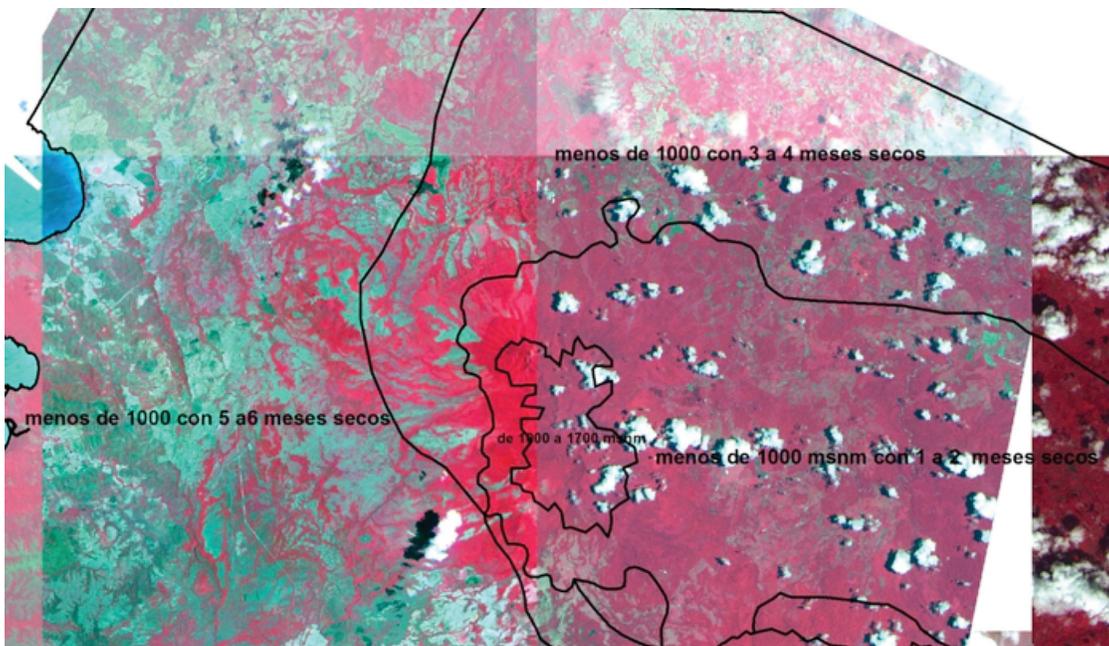
Nombre	Estrato	Área basal promedio (m <sup>2</sup> /ha)	CV%	No. Observ.
Bosque tropical siempreverde	Menos de 1000 msnm, sin estación seca	35,7	36,6	20
Bosque tropical semiperenne	Menos de 1000 msnm, con 1-2 meses secos	32,7	34,8	27
Bosque tropical semidecduo	Menos de 1000 msnm, con 3-4 meses secos	45,2	31,9	3
Bosque tropical decduo	Menos de 1000 msnm, con 5-6 meses secos	32,5	36,6	15
Bosque montano bajo	Entre 1000 y 1700 msnm	48,7	19,9	7
Bosque montano de roble y alnus	Entre 1700 y 3200 msnm	44,7	25,8	16
Páramo	Más de 3100 msnm	Subalpino	NA	NA

#### Comprobación visual de límites de estratos a partir de imágenes RapidEye (532-RGB)





**Figura 3.** Línea del café o de escarcha en el norte de Alajuela. A partir de 1700-1800 msnm, el cultivo del café se reduce para dar paso a pastos para ganadería de engorde o producción de leche y otros cultivos de altura.



**Figura 4.** Meses secos en la provincia de Guanacaste. Diferencias en la vegetación de la vertiente Atlántica y Pacífica durante la época seca en el norte de la provincia de Guanacaste



## Tipos de bosque definidos en Costa Rica

Los tipos de bosque dentro de cada ecorregión se identificaron según la definición de bosque adoptada por el país para el MRV-REDD. A partir de esta definición, se definieron varias formaciones vegetales que, para ser consideradas en el IFN y MRV-REDD, deben cumplir con los criterios de tamaño del segmento, cobertura de copas, altura total y rastreabilidad por medio de las imágenes de satélite disponibles y/o información auxiliar existente.

### Formaciones vegetales que se consideran en el IFN y MRV-REDD

En los recuadros siguientes se ofrece información sobre las formaciones boscosas encontradas en el territorio nacional de Costa Rica y consideradas en el IFN y MRV-REDD.

#### Recuadro 1. Bosque maduro

Definición	Observaciones
Este bosque es producto de un proceso de sucesión que se ha mantenido ininterrumpido durante 75-100 o más años; compuesto por especies nativas de árboles; no presenta huellas evidentes de actividad humana; sus procesos ecológicos no han sido alterados de forma apreciable.	Se identifica fácilmente en las imágenes satelitales y fotografías aéreas por su textura irregular. En Costa Rica se encuentra en áreas montañosas y parques nacionales u otras áreas silvestres protegidas.



Aspecto de la clase bosque maduro: (a) imagen satelital de un bosque maduro en la cordillera de Talamanca; (b) fotografía aérea de un bosque maduro en la misma región; (c) fotografía de un bosque maduro en los territorios indígenas de la cordillera de Talamanca.

Créditos: a. Imágenes RapidEye 2012. b y c. SINAC - fotos del Inventario Forestal Nacional



**Recuadro 2. Bosque secundario**

Definición	Observaciones
<p>Tierra con vegetación leñosa de carácter sucesional secundario que se desarrolló una vez que la vegetación original fue eliminada por actividades humanas y/o fenómenos naturales. Tiene una superficie mínima de 0,5 ha y una densidad no menor a 500 árboles por hectárea de todas las especies, con diámetro mínimo a la altura del pecho de 5 cm. Se incluyen también las tierras de bosque secundario inmediatamente después de aprovechadas bajo el sistema de cortas de regeneración. (Decreto Ejecutivo no. 27388- MINAE, La Gaceta no. 212 del 2 nov. 1998).</p>	<p>La identificación de los diferentes estadios de bosque secundario es difícil e inexacta, aun en imágenes satelitales y fotos aéreas de alta resolución, ya que se pueden confundir con sistemas agroforestales (café con sombra, cacao bajo bosque). Para su clasificación es necesario realizar trabajo de campo y utilizar imágenes multitemporales y multiespectrales de alta resolución. Se identifican en las imágenes satelitales y fotografías aéreas por su textura homogénea.</p>



Aspecto de la clase bosque secundario: (a) imagen satelital de un bosque secundario en la Zona Sur de Costa Rica; (b) interior de un bosque secundario del Valle Central; (c) interior de un bosque secundario en la región Pacífico Central.

Créditos: SINAC - Inventario Forestal Nacional



### Recuadro 3. Bosque deciduo\*

Definición	Observaciones
Formación vegetal en la que la mayoría de los árboles pierden sus hojas simultáneamente en la época seca de cada año. Hay especies siempreverdes en el sotobosque; por ejemplo, pequeños árboles de los géneros <i>Eugenia</i> y <i>Clusia</i> , así como varias especies suculentas.	En Costa Rica se ubica en la provincia de Guanacaste y en áreas aisladas en la zona sur cantón de Buenos Aires. Corresponde a un tipo de vegetación descrita como asociación edáfica localizada en cimas de lomas, laderas, suelos poco profundos, o arenosos, con déficit hídrico por más de dos meses al año.

\* En el producto final, esta categoría fue agrupada junto con “bosque secundario” debido a que, en el campo, se verificó que la mayoría de bosques deciduos eran de crecimiento secundario (Alvarado 2014).



Aspecto del bosque deciduo: (a) imagen satelital de un bosque deciduo en el norte de Guanacaste; (b) ortofotografía de la misma región; (c) y (d) fotografías del interior de un bosque deciduo en el Pacífico Norte de Costa Rica.

Créditos: SINAC - Inventario Forestal Nacional



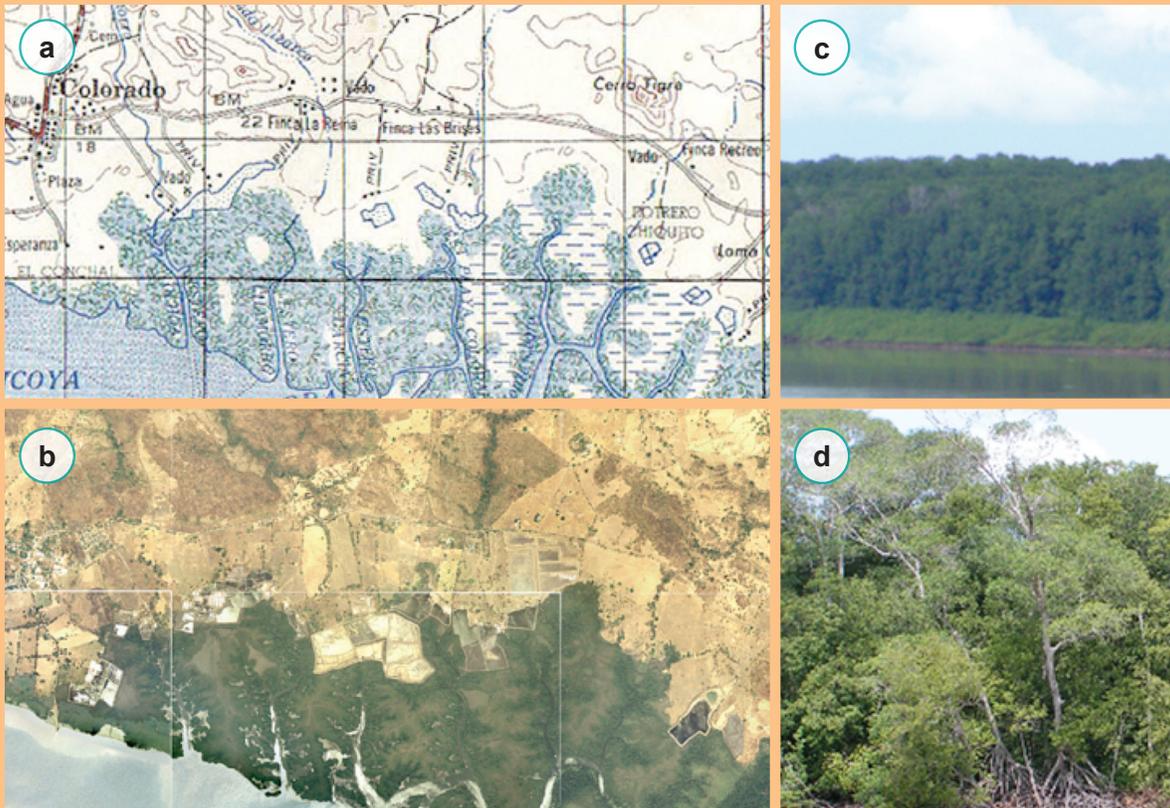
**Recuadro 4. Manglar**

**Definición**

Biotopo tropical o subtropical localizado en la zona intermareal. Los árboles en esta agrupación poseen adaptaciones que les permite sobrevivir en terrenos anegados con intrusiones de agua salobre o salada. Formación leñosa, densa, frecuentemente arbustiva o arborescente de 2 a 25 m de altura compuesta de una o varias especies fanerógamas. Algunas especies desarrollan raíces zancas y neumatóforos que cumplen la función de sostén en el fondo lodoso y de respiración radical, pues el sustrato es muy pobre en oxígeno; estas estructuras le dan al manglar su particular fisionomía.

**Rodal de mangle** (definición utilizada para el IFN)

Agrupación de árboles de una o más especies de mangle con o sin otras especies arbóreas asociadas, con un área mínima de 1,0 hectárea, con una cobertura de dosel (copa) de más de 30%, con árboles con potencial para alcanzar una altura mínima de 5 metros a la madurez in situ y con características de masa más o menos homogéneas en términos de edad, composición de especies y condición.



Ubicación del manglar en (a) hojas cartográficas 1:50 000; (b) ortofotografías aéreas 1:25 000; (c) y (d) componente arbóreo del manglar.

Créditos: Créditos: SINAC - Inventario Forestal Nacional



### Recuadro 5. Yolillal (bosque de palmas)

#### Definición

Formación de vegetación dominada por la palma yolillo (*Raphia taedigera* Mart.) que se desarrolla en áreas anegadas, con aguas de inundación durante algunos meses del año. El nivel de las aguas puede bajar pero no totalmente. El yolillal es un ecosistema de suelos anegados que se encuentra en los alrededores de la laguna de Corcovado, península de Osa, al norte y al oeste de Caño Negro y, principalmente, en la zona costera del Caribe (Fallas 2013).



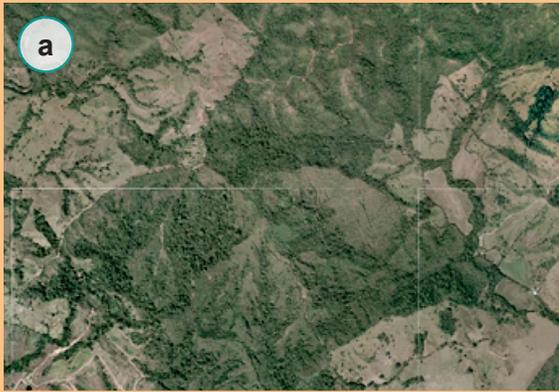
Aspecto del yolillal: (a) Textura de un bosque dominado por yolillo en isla Calero, Caribe Norte; (b) palmera de yolillo en potrero; (c) interior de bosque dominado por yolillo; (d) dosel superior de bosque dominado por yolillo en el Caribe Norte.

Créditos: Créditos: SINAC - Inventario Forestal Nacional



**Recuadro 6.** Plantación forestal

Definición	Observaciones
<p>Superficie arbolada producida en forma artificial mediante plantación o siembra. En general, los árboles pertenecen a una misma especie, tienen los mismos años de vida y presentan una distribución espacial homogénea.</p> <p>Según la Ley Forestal no. 7575 (1996), una plantación forestal es un terreno de una o más hectáreas cultivado con una o más especies forestales, cuyo objetivo principal, aunque no necesariamente el único, es la producción de madera.</p>	<p>Se identifican en las imágenes satelitales y fotografías aéreas por su textura homogénea.</p>



Aspecto de las plantaciones forestales: (a) fotografías aéreas de una plantación forestal en la región de Parrita, Pacífico Central; (b) plantación de melina en la Zona Norte; (c) la misma plantación desde un satélite de alta resolución espacial

Créditos: Foto del IFN 2014 e imágenes satelitales RapidEye 2012



## Otras categorías de formaciones vegetales

### Recuadro 7. Páramo

Definición	Observaciones
<p>Área de vegetación natural que se ubica en las partes altas, por encima de 3100 metros de elevación. Comunidades vegetales de baja altura y, generalmente, en sitios húmedos y fríos. La vegetación dominante es de bambú enano del género <i>Chusquea</i> sp. entremezclado con plantas leñosas de familias como Ericaceae, Hypericaceae, Rosaceae y Asteraceae.</p>	<p>Se identifica en las imágenes de las zonas a más de 3100 metros de altura, en el volcán Irazú y cordillera de Talamanca. En imágenes de falso color tomadas en la época seca presentan un color grisáceo-azulado.</p>

### Recuadro 8. Pasto con árboles

**Definición**

La mayoría de los árboles presentes en los terrenos dedicados a la ganadería son remanentes del bosque original talado para crear el potrero; no obstante, algunos son el resultado de programas de establecimiento de árboles forestales en sistemas agroforestales (SAF). En la actualidad, los pastizales arbolados son importantes pues proveen un alto porcentaje de la madera que consume el país. Con frecuencia se revierte el proceso de sucesión mediante la tala de los árboles para utilizarlos como leña o postes, o simplemente para evitar que se inicie el proceso de sucesión natural y el pastizal se convierta en un charral.

El Artículo 3 de la Ley Forestal No. 7575 (13 de marzo de 1996) define el SAF como una *“forma de usar la tierra que implica la combinación de especies forestales en tiempo y espacio con especies agronómicas, en procura de la sostenibilidad del sistema”*.



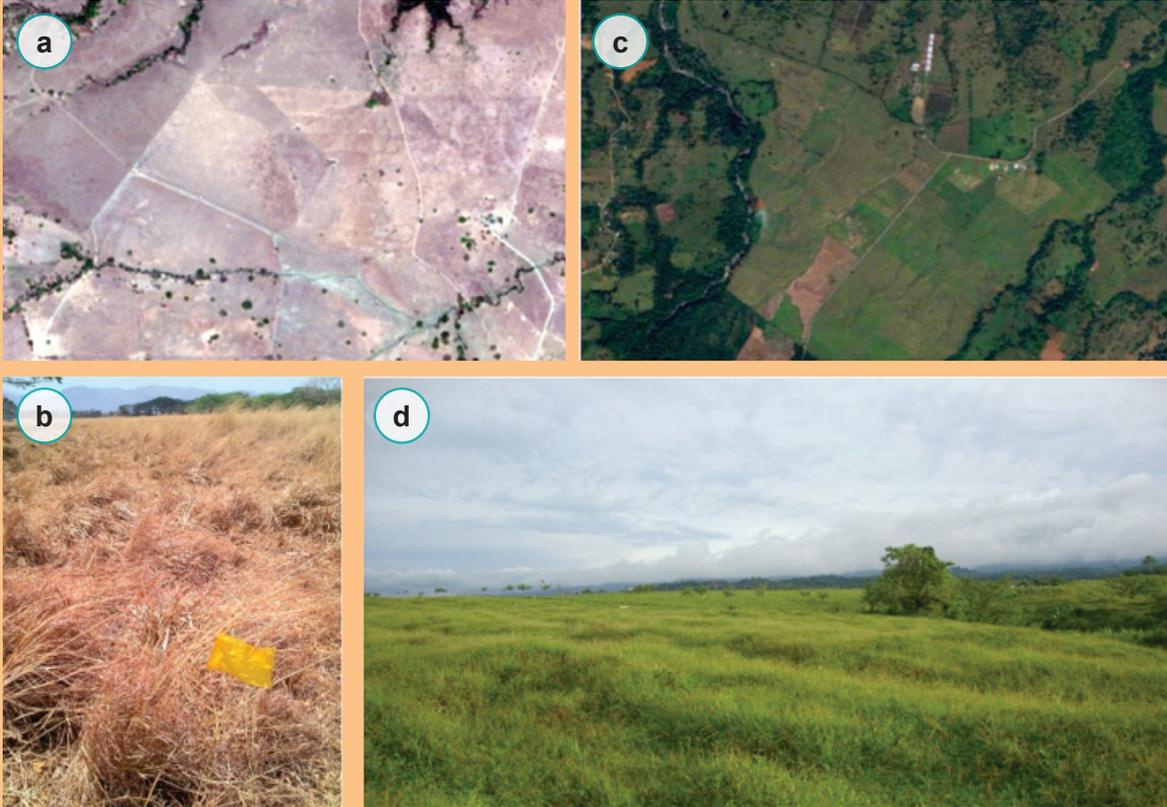
Aspecto de la clase pastos arbolados: (a) imagen de satélite de alta resolución (Zona Norte); (b) pastos arbolados en la región de Esparza, Pacífico Central; (c) pastos arbolados en la cuenca alta del río Chiquito, cordillera de Tilarán, Pacífico Norte.

Créditos: Fotos del IFN y Google Earth.



**Recuadro 9. Pasto sin árboles**

Áreas cubiertas por pastos herbáceos, carentes de cobertura forestal o con una cobertura menor al 10%.



Aspecto de la clase pastos sin árboles: (a) imagen satelital de un pastizal sin árboles en el norte de Guanacaste; (b) fotografía de un pastizal sin árboles en la misma región; (c) imagen satelital de un pastizal sin árboles en la zona de Guácimo, Caribe Central; (d) fotografía aérea del mismo pastizal sin árboles.

Créditos: Fotos del SINAC 2014 e imágenes RapidEye 2012

En el Cuadro 5 se presentan los niveles de agrupamiento de las categorías identificadas para el Inventario Forestal Nacional. En el Cuadro 6 se enlistan los estratos del IFN identificados mediante imágenes satelitales RapidEye y las equivalencias en el campo. La columna “Interpretación de imágenes”, en el cuadro, corresponde a las clases de uso-cobertura delineadas en la cartografía preparada por medio de las imágenes de RapidEye (Ortiz 2013); la columna “Muestreo de campo” indica las clases a muestrear como parte del IFN.



**Cuadro 5.** Niveles de agrupamiento de las categorías identificadas para el IFN-Costa Rica

Gran clase	Clase en IFN	Código clase del IFN	Subclases*
Bosque	Bosque maduro	1	Bosque maduro
	Bosque deciduo	2	Bosque deciduo
	Bosque secundario	3	Bosque secundario
	Manglar	4	Manglar
	SAF cultivos mixtos	5	Cultivos mixtos con árboles
	Plantación forestal	6	Plantación forestal según especie, si es posible identificar
	Bosque palmas	7	Bosque de palmas
No bosque	Pastos	8	Pastos
	Páramo	9	Páramo
	No forestal	10	Banano Palma Piña Naranja Plátano Caña Melón Arroz Mango Café Ornamentales Etc.
			Humedal con agua o pastos
			Agua limpia o agua con sedimentos
			Suelo desnudo
			Arena
			Infraestructura
	Nubes	11	Nubes o nubes ralas
	Sombra de nubes	12	Sombra de nubes

\*Las subclases se generaron como una ayuda en el proceso de clasificación; sin embargo no forman parte del producto final porque no fueron validadas.



**Cuadro 6.** Estratos del IFN-Costa Rica identificados mediante imágenes satelitales RapidEye y equivalencias en el campo

Interpretación de imágenes	Muestreo de campo
Bosque maduro	Bosque maduro
Bosque deciduo	Bosque deciduo
Bosque secundario Bosque menos de 7 años: aparece en el 2012, pero no en el 2005 Bosque menos de 15 años pero más de 7 años: aparece en el 2012 y en 2005 pero no en el 1997 Bosque de más de 15 años: aparece en el 2012, 2005, 1997	Bosque secundario
Bosque de palmas	Bosque de palmas
Manglar	Manglar
Plantación forestal	Plantación forestal
Pasto con árboles	Pasto con árboles
Páramo (+3200 msnm)	Esta clase no se muestreará en el IFN
No forestal (agricultura, humedal, agua, suelo desnudo, arena, infraestructura)	Esta clase no se muestreará en el IFN
Pasto sin árboles	Esta clase no se muestreará en el IFN



# Materiales y métodos

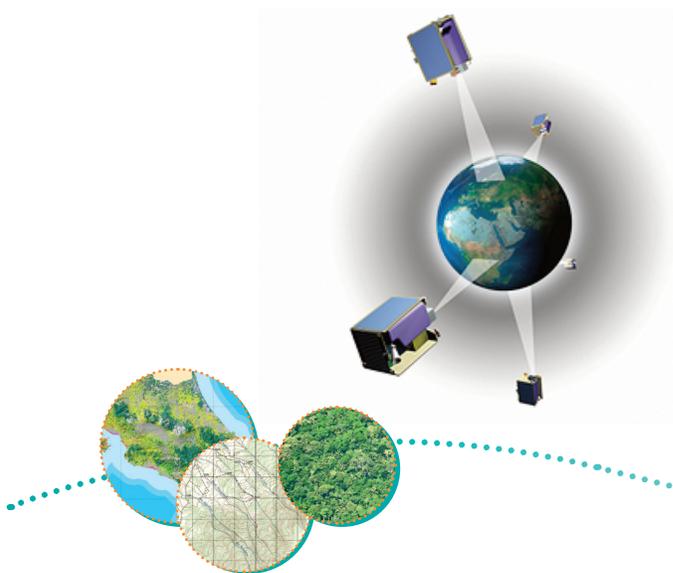
## Imágenes satelitales RapidEye

Para definir las clases de tipos de bosque se utilizaron imágenes del satélite RapidEye, operado por la corporación BlackBridge (<http://blackbridge.com/rapideye/about/satellites.htm>). Los satélites RapidEye son, en realidad, un grupo (constelación) de cinco satélites configurados en una órbita sincrónica al sol a 630 km sobre la superficie terrestre. Esta configuración de satélites captura información de manera simultánea y permite un tiempo de revisita (frecuencia de captura en cualquier rincón de la superficie) de 1 a 5 días (Cuadro 7, Figura 5).

**Cuadro 7.** Características técnicas del sensor RapidEye

<b>Número de satélites</b>	5	
<b>Tiempo de vida del vehículo</b>	7 años	
<b>Altitud orbital</b>	630 km (sol-síncrono)	
<b>Tiempo de cruce por el ecuador</b>	11:00 am (hora local)	
<b>Tipo de sensor</b>	Espectral, "Push-Broom"	
<b>Bandas espectrales</b>	<b>Nombre</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>
	Azul	440 - 510
	Verde	520 - 590
	Rojo	630 - 695
	"Red Edge"	690 - 730
	<b>NIR (Near Infra Red)</b>	760 - 850
<b>Tamaño de píxel (ortorrectificado)</b>	5 m	
<b>Ancho del barrido</b>	77 km	
<b>Tiempo de revisita</b>	1 día (Nadir) 5,5 días (fuera de Nadir)	

Fuente: <http://www.satimagingcorp.com/satellite>



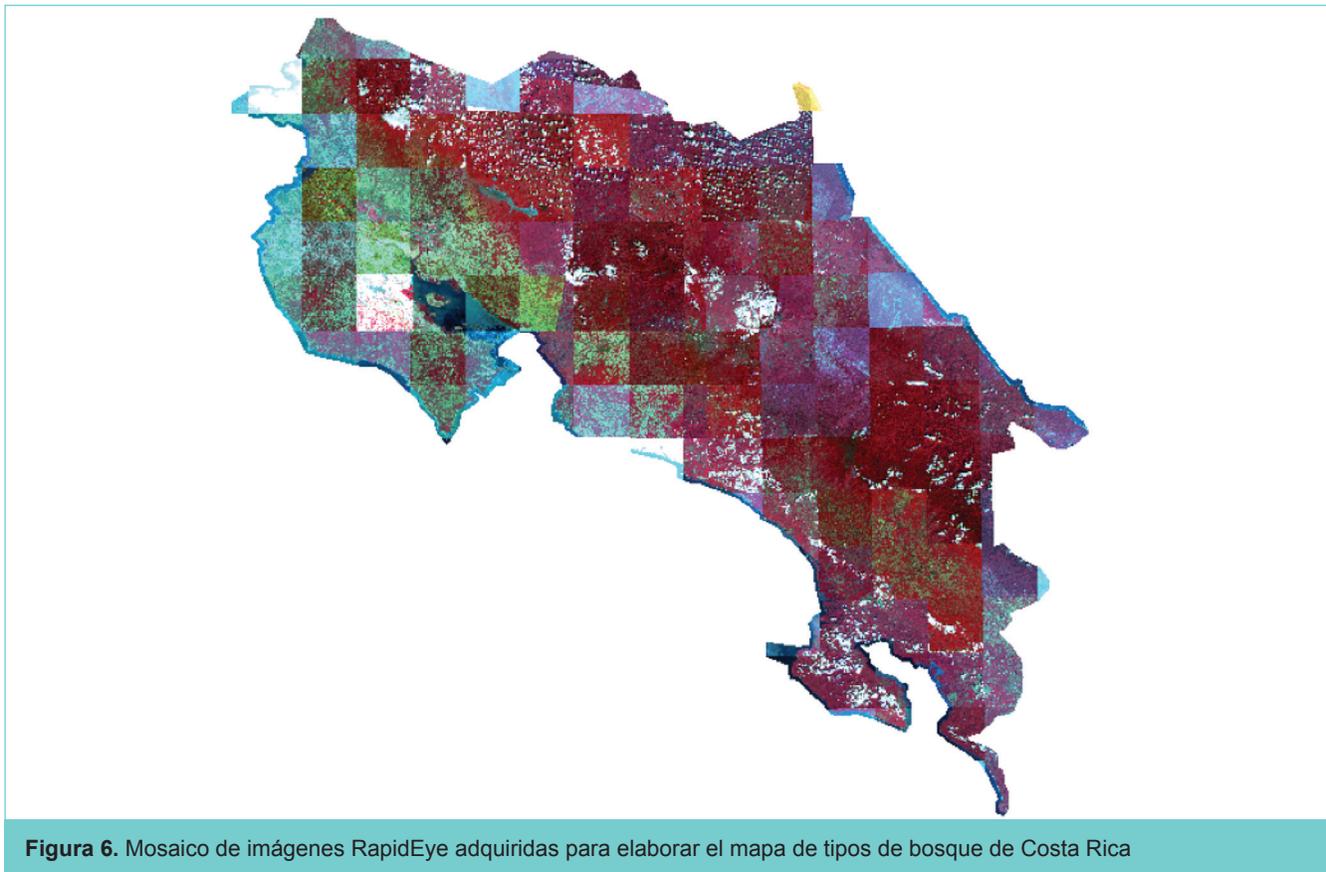
**Figura 5.** Configuración de los satélites de la constelación RapidEye  
<http://www.satimagingcorp.com/satellite>

Para el país se obtuvieron 164 escenas individuales de imágenes RapidEye, las cuales deberían contener un máximo de 10% de superficie cubierta por nubes. Las imágenes adquiridas tienen fecha de adquisición entre diciembre 2011 (11%) y enero - julio 2012 (89%). En total, el 9,7% de la superficie del país no se pudo capturar debido a la presencia de nubes y sombras de nubes. Para este proyecto, se solicitó que las imágenes tuvieran un nivel de procesamiento 3A, el cual implica ortorrectificación y correcciones radiométricas, geométricas y del sensor ([http://blackbridge.com/rapideye/upload/RE\\_Product\\_Specifications\\_ENG.pdf](http://blackbridge.com/rapideye/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf)).

### Mosaico de imágenes RapidEye para Costa Rica

En la Figura 6 se presenta el mosaico por superposición de imágenes de RapidEye 2012, con un nivel de procesamiento 3A, recibidas para elaborar la cartografía base del IFN de Costa Rica. Este mosaico permitió verificar la calidad de las imágenes recibidas, si cubrían todo el país y el porcentaje de cobertura de nubes. Mediante este mosaico se pudo comprobar que había vacíos en la cobertura de las imágenes, sin embargo, el problema se resolvió cuando el PRIAS (Programa de investigaciones aerotransportadas y sensores remotos e in situ) entregó las imágenes corregidas atmosféricamente (Anexo 1).

Un segundo problema detectado fue la existencia de imágenes muy oscuras y otras muy claras y, además, se determinó que las imágenes con más de 20% de cobertura de nubes representaban el 9,7% de la superficie del país (Anexo 1). Este problema persiste hasta la fecha, dado que no se han recibido las nuevas imágenes; el reporte de imágenes con nubes aparece en el Anexo 1.



**Figura 6.** Mosaico de imágenes RapidEye adquiridas para elaborar el mapa de tipos de bosque de Costa Rica



## Estrategia metodológica

En la Figura 7 se detallan los pasos dados para obtener el mapa de tipos de bosque de Costa Rica 2013.

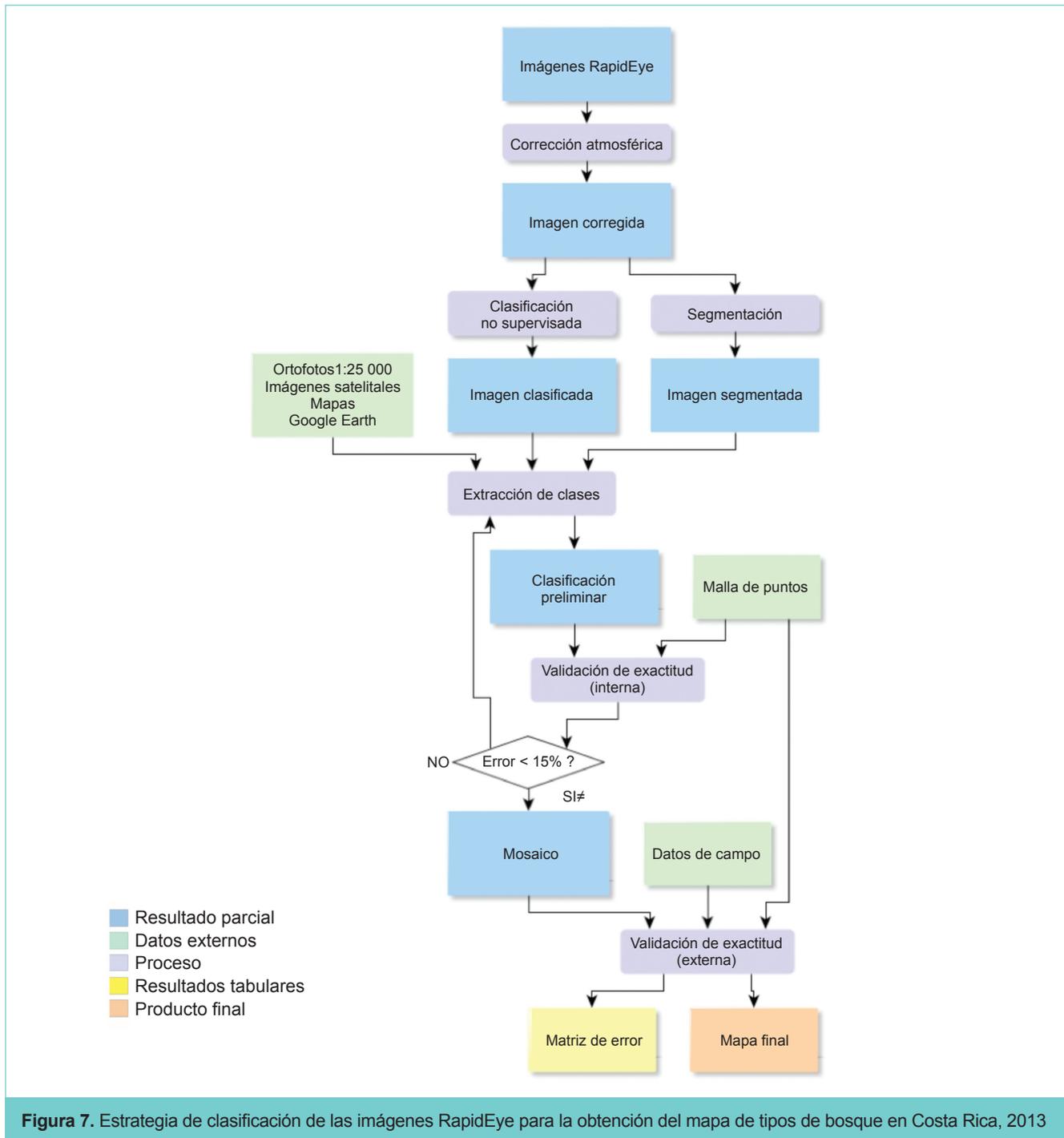


Figura 7. Estrategia de clasificación de las imágenes RapidEye para la obtención del mapa de tipos de bosque en Costa Rica, 2013

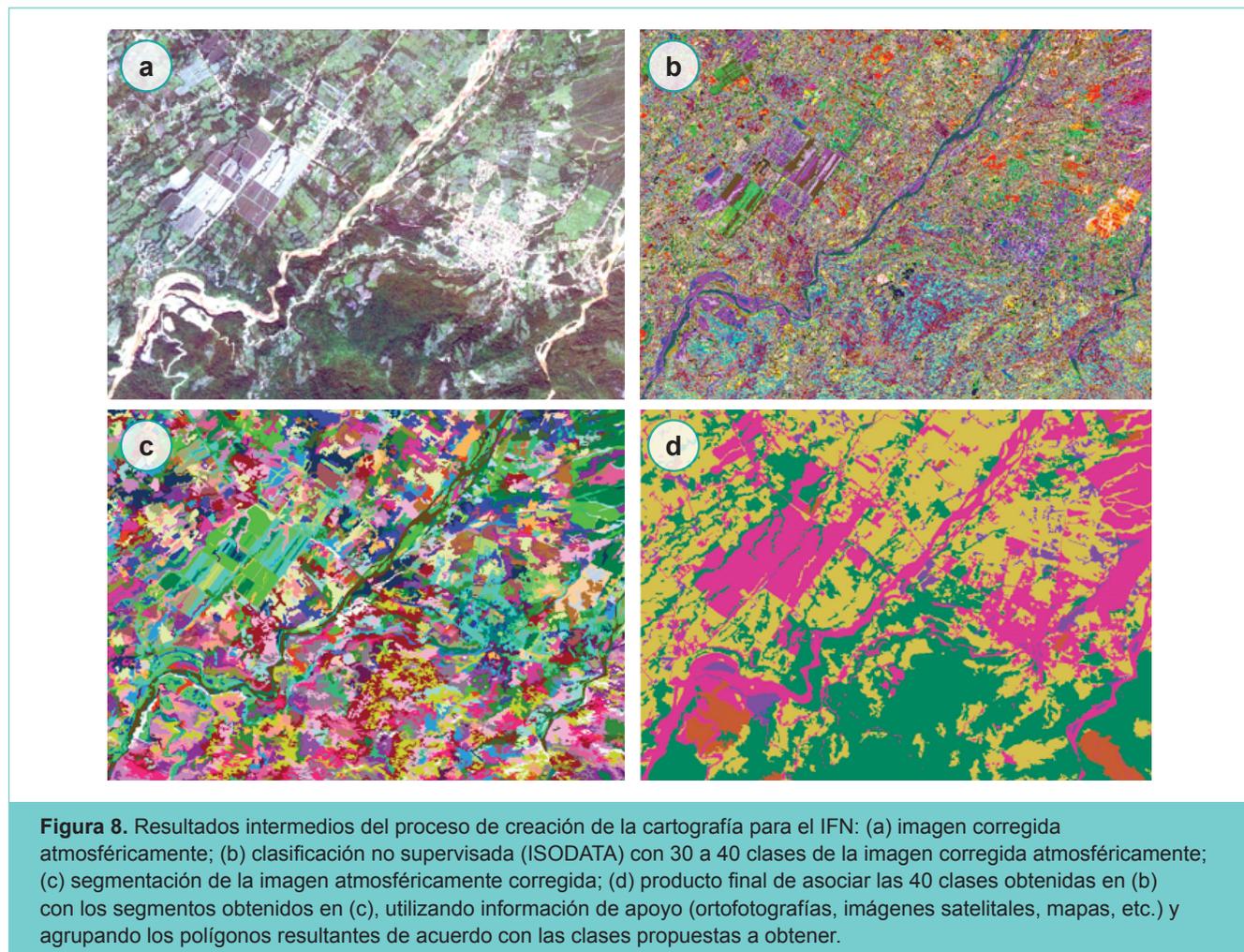


### Corrección atmosférica

Las imágenes fueron corregidas mediante el algoritmo FLAASH (*fast line of sight atmospheric analysis of spectral hypercubes*) disponible en el programa ENVI 4.7 (ITTVIS 2007). Este algoritmo utiliza el modelo MODTRAN (*moderate resolution atmospheric transmission*) (Spectral Sciences 1987) para calcular los valores atmosféricos para realizar la corrección (Figura 8). Las imágenes fueron corregidas primero a radianza exoatmosférica (*top of atmosphere radiance*); para ello se utilizaron las ecuaciones y valores contenidos en los metadatos de cada imagen. Adicionalmente, y para cargarlas en el algoritmo FLAASH, las imágenes fueron convertidas a formato BIL (*band interleaved by line*), pues el modelo FLAASH solamente acepta imágenes en este formato.

Los parámetros usados para la corrección en FLAASH fueron los siguientes: (a) modelo atmosférico tropical, (b) modelo de aerosoles urbano, marítimo o rural (dependiendo de la imagen), (c) visibilidad inicial: 40 km u 80 km dependiendo de la escena.

La salida del algoritmo FLAASH convierte los datos de los valores digitales, de entero (*integer*) a punto flotante (*floating point*). Usualmente esto implica un aumento del tamaño de la imagen (de 300 MB a más de 1 GB). Para reducir el tamaño de las imágenes se utilizó un factor de multiplicación de 10.000 para “reconvertir” los valores punto flotante a enteros, sin perder información.



## Segmentación de las imágenes RapidEye

La técnica de segmentación de imágenes (o clasificación orientada a objetos) ha sido utilizada recientemente en el campo de los sensores remotos debido a la disponibilidad de imágenes de alta resolución espacial (Scheiwe 2002). Esta técnica consiste en el agrupamiento de píxeles en regiones (o segmentos) basados en un criterio similar (por ejemplo, textura o número digital) (Neubert y Meinel 2003). Estas técnicas proveen información de un contexto diferente a la clasificación tradicional basada en la información espectral de los píxeles (Blaschke 2010). La clasificación orientada a objetos se ha usado con éxito en la identificación de ecosistemas boscosos (Wang *et al.* 2014, Carleer *et al.* 2015) y en la detección de cambios en la cobertura forestal (Desclée *et al.* 2006, Bontempos *et al.* 2008).

El proceso de segmentación aplicado a los imágenes corregidas se realizó a mediante la implementación del algoritmo de segmentación propuesto por Yang y Wright (2007), del Berkeley Computer Vision Group. Este algoritmo está disponible en (<http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/grouping/resources.html>). Este programa realiza la segmentación de las imágenes utilizando tres parámetros<sup>1</sup>:

**Umbral** (*threshold*): este parámetro determina cuán grandes pueden ser los segmentos a obtener e indica cuántas veces el algoritmo analiza la imagen para detectar los segmentos. A mayor valor de umbral, mayor es el tamaño de los segmentos producidos por el algoritmo.

**Tasa de forma** (*shaperate*): este parámetro compara la forma de los segmentos obtenidos contra la intensidad del atributo “color” (homogeneidad) en cada segmento, en donde 1 indica una alta homogeneidad del color a través de todo el polígono.

**Compatibilidad** (*compactness*): este parámetro es un control adicional al parámetro anterior, e indica qué tanto pesa la homogeneidad del color en la determinación del segmento. Este valor va de 0 a 1, en donde un valor de 0,5, por ejemplo, indica que la homogeneidad y la degradación del color se valoran igual.

Para cada escena RapidEye se usaron tres diferentes valores de umbral (50, 100 y 200) para la segmentación; para la tasa de forma y compatibilidad se dejaron los valores por defecto. Se seleccionaron los resultados que arrojaban las mejores imágenes al compararlos con la imagen original.

## Clasificación no supervisada de la asociación de polígonos de segmentación

- Para cada escena se realizó una clasificación no supervisada (ISODATA) (Jensen 2005) con las siguientes características: 25 - 30 clases, 30 iteraciones y desviación estándar de 1.
- Se exportó la clasificación resultante a un formato .img, u otro que sea legible y analizable con los comandos de *Spatial Analyst* en el Programa ArcView o ArcGis.
- Para realizar una asignación inicial de tipos de bosques a los polígonos generados en la segmentación, se sobrepuso la capa de polígonos segmentados a la clasificación no supervisada generada en el paso anterior. Mediante un proceso de búsqueda zonal, se asignó a cada polígono segmentado el código de la clase no supervisada que abarcara la mayor área dentro del polígono segmentado. Para ello, se utilizó el operador *Zonal Statistics* (disponible en la extensión *Spatial Analyst* del programa ArcGIS 10.1). Como entrada, se utilizó la segmentación, y como imagen de análisis, la clasificación no supervisada. El estadístico a asignar fue la mayoría de píxeles (*majority*) y, opcionalmente, la variedad (*variety*).
- La imagen resultante se convirtió a formato vector (*shapefile*). Para la conversión se utilizó como valor la variable “value”; para mejorar la fidelidad de la vectorización no se permitió simplificar el vector resultante.

<sup>1</sup> Para mayor información sobre estos parámetros referirse a: <http://www.imageseg.com/#!/faq/c1dui>



- e. A la tabla de atributos de la capa vectorial se agregaron tres variables: cobertura (tipo *string*), subclase (*string*) y código (*integer*).
- f. Las siguientes fuentes de información adicional se usaron como referencia: ortofotos BID-Catastro (2005); imágenes satelitales 2012 y, en caso de que fueran necesarias, imágenes de Google Earth; capas de información, como los proyectos de pago por servicios ambientales de Fonafifo, o de certificados de origen del Sinac. A continuación, se procedió a etiquetar cada polígono en alguna de las subclases establecidas en el Cuadro 3. También se tomó en cuenta el valor “*gridcode*” proveniente de la clasificación no supervisada.
- g. Finalmente, se agruparon las subclases en las clases establecidas en el Cuadro 8.

**Cuadro 8.** Agrupamiento de las categorías a identificar en la cartografía del IFN-Costa Rica

Subclases*	Código de clase	Nombre de la clase	Subclases*	Código de clase	Nombre de la clase
Bosque maduroD1 Bosque maduroD2	1	Bosque maduro	Páramo	9	Páramo
Bosque deciduoD1 Bosque deciduo D1	2	Bosque deciduo en Guanacaste y la Zona Sur	Banano Palma Piña Naranja Plátano Caña Melón Arroz Mango Café Ornamentales Etc.	10	No forestal
Bosque secundarioD1 Bosque secundarioD2	3*	Bosque secundario	Humedal		
ManglarD1 ManglarD2	4*	Manglar	Agua limpia Agua con sedimentos		
SAF-cultivos mixtos	5	Cultivos mixtos con árboles	Suelo desnudo		
Plantación forestalD1 Plantación forestalD2	6*	Plantación forestal	Arena		
Bosque palmasD1 Bosque palmasD2	7	Bosque palmas	Infraestructura		
Pasto sin árbolesD1 Pasto sin árbolesD2	8	Pastos	Nubes	11	Nubes
			Sombra de nubes	12	Sombra de nubes

\* Los sufijos Dn, corresponden a diferentes densidades aparentes en la cantidad de árboles presentes en cada una de las clases.

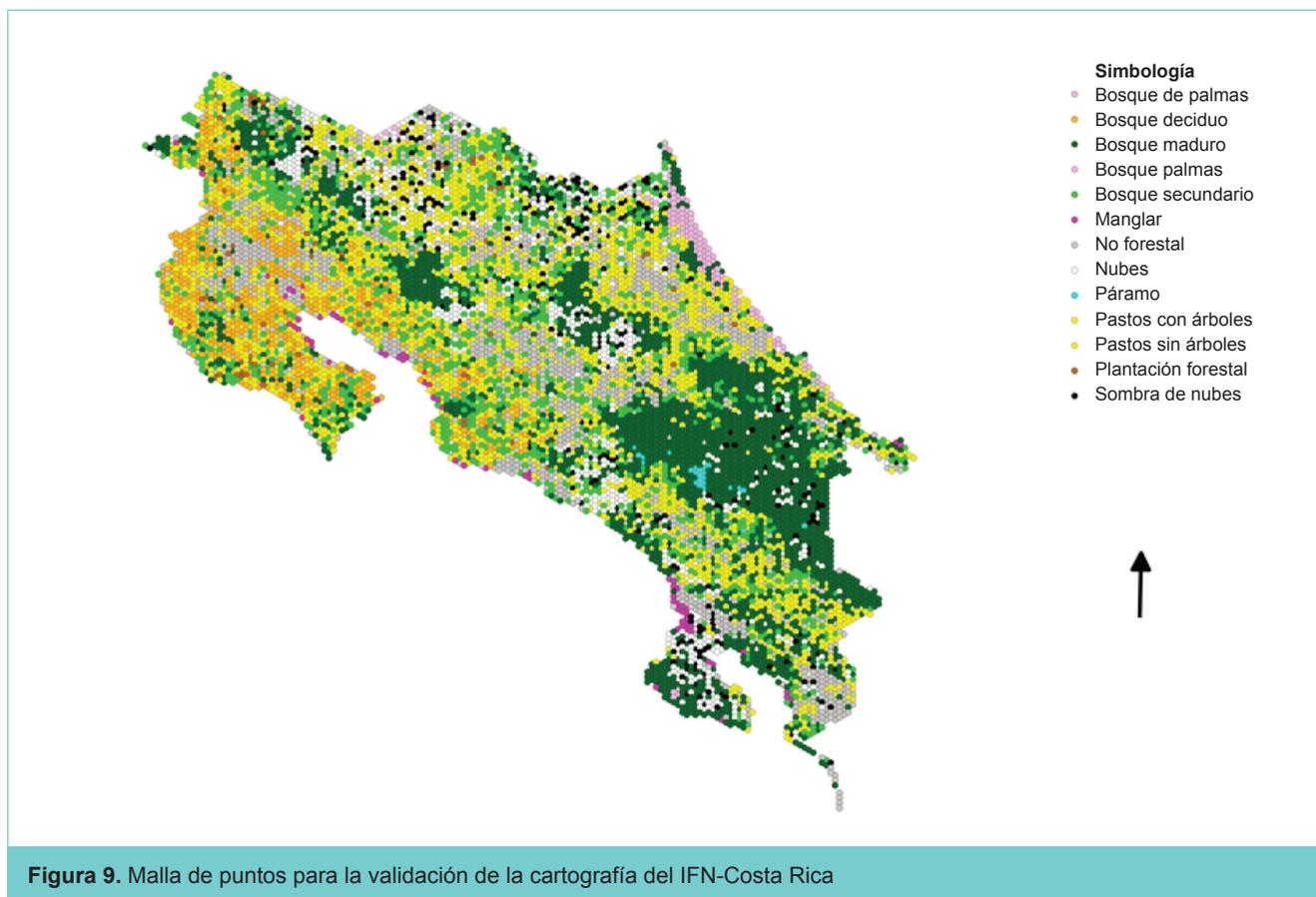


## Validación de la exactitud

### Construcción de la malla de puntos

Para la validación de las clasificaciones de las imágenes de RapidEye recibidas para la cartografía del IFN, se procedió a crear una malla de puntos sobre el área continental de territorio de Costa Rica. Esta malla de puntos fue hecha con la extensión *Habitat Analysis* disponible en el programa ArcView. Se creó una malla de 10 166 puntos (Cuadro 9) distribuidos sistemáticamente y con un patrón de distribución triangular regular de 2402,5 metros de distancia entre puntos (Figura 9).

La malla de puntos se sobrepuso sobre el mosaico de las imágenes de RapidEye descrito en la sección anterior; para cada punto se procedió a determinar la cobertura forestal existente según las categorías propuestas para el IFN (Cuadro 3). La identificación de las categorías de cobertura la realizó un especialista en sistemas de información geográfica (SIG) independiente, designado como “validador de la clasificación de la imágenes”; esta persona nunca tuvo contacto con los analistas contratados para la clasificación de las imágenes. La clasificación de la cobertura de los puntos de la malla se hizo mediante una escala de visualización en pantalla de 1:9000. Como ayudas para determinar la cobertura, el validador usó: a) las fotografías áreas disponibles en el país para el año 2005 (escala 1:5000); b) la ubicación de los puntos de la malla en Google Earth, en donde era factible. La clasificación de la cobertura realizada por el validador fue comprobada por otro analista hasta lograr una exactitud adecuada para usarse como instrumento de validación de la clasificación de las imágenes RapidEye.



Finalmente, es importante destacar que esta malla de puntos de validación fue usada no solo para hacer un estimado de áreas por tipo de bosque, sino también para identificar los puntos de muestreo para el establecimiento de parcelas de medición del IFN. Esto fue posible porque las imágenes recibidas tienen un nivel de procesamiento 3A; es decir, que habían sido ortorrectificadas.

La estimación de áreas por tipo de cobertura del IFN se hizo usando la técnica de muestro por puntos para el cálculo de áreas, descrita por Hush *et al.* (1983) y Ortiz y Louman (2002). Esta estimación complementa con la que se va a obtener mediante la clasificación de las imágenes de RapidEye, lo que ha permitido avanzar en el diseño de IFN, sin tener que esperar a que esté lista la cartografía completa del IFN.

En el Cuadro 9 se presentan los resultados de la estimación de áreas según tipo de cobertura del IFN obtenidos con la malla de puntos de validación preparada. Al hacer los cálculos por estratos propuestos para el IFN, se evidencia que la estratificación propuesta permitirá hacer una adecuada distribución de la muestra parcelas de inventario, dado que la clase bosque maduro es la que tiene mayor cobertura forestal en todos los estratos, excepto en el estrato de menos de 1000 msnm con 5 a 6 meses secos y en el estrato de páramo (más de 3100 msnm). En el Cuadro 6 se han marcado con gris claro los estratos en donde deben focalizarse las mediciones de campo del IFN para la estimación de área basal, volumen comercial, y biomasa arriba del suelo. Por otro lado, los resultados además demuestran que, en total, las imágenes utilizadas para la cartografía del IFN poseen una cobertura de nubes y sombra de nubes cercana al 10,4 %.

**Cuadro 9.** Estimación de tipos de cobertura en Costa Rica en el 2012 por medio de una malla de 10 166 puntos de muestreo siguiendo una distribución triangular regular

Tipo de cobertura	%
Bosque palmas	1,2
Bosque deciduo	6,8
Bosque maduro	25,5
Bosque secundario	14,9
Manglar	0,7
Plantación forestal	1,2
Pasto con árboles	12,5
Pasto sin árboles	11,1
Páramo	0,3
No forestal	16
Subtotal	39,3
Nubes y sombra nubes	10,4



## Control de calidad

El control de calidad de la clasificación de imágenes RapidEye se realizó mediante tres procesos independientes: el control de calidad del analista SIG, un control externo y la validación independiente de campo.

**Control de calidad del analista SIG.-** La validación o control de calidad se hizo contra los porcentajes de exactitud preestablecidos. Antes de la validación externa, el analista SIG aplicó un control interno por medio del siguiente procedimiento:

- La imagen preclasificada se sobrepone a un mosaico de ortofotos 1:5000 (proyecto BID-Catastro) y al mosaico de imágenes RapidEye.
- Cada una de las clases (una a la vez) se transparenta para observar qué tipo de cobertura está debajo de cada uno de los polígonos.
- Primero se colocan las fotos aéreas del 2005; si se notan divergencias, se comprueba si la diferencia se debe a un cambio de cobertura en el 2012. Para esto, se usa de la imagen clasificada en falso color (532-RGB).
- A continuación se toma una muestra de puntos distribuidos sistemáticamente sobre la imagen clasificada (al menos 100) y se procede a verificar si la clasificación es la correcta para cada punto.
- Como referencia, se utilizan los valores de exactitud esperados (Cuadro 10).
- Si no se cumple con los estándares del Cuadro 10, se revisa la clasificación para corregir las clases mal clasificadas. Se repite nuevamente el procedimiento de control de calidad usando una muestra de puntos diferente.

**Control externo de calidad.-** Para este control se usó la malla de puntos construida para la validación de la cartografía. Un validador que no fuera parte del grupo de analistas SIG procedió a calcular el porcentaje de errores de cada imagen preparada por los analistas. Cuando el validador estimó que no se alcanzaba el nivel de exactitud requerido, se le solicitó al analista SIG correspondiente revisar la clasificación hasta que alcanzara los niveles deseables, de acuerdo con los porcentajes de exactitud preestablecidos.

**Cuadro 10.** Niveles de exactitud esperados por clase de cobertura usada en la clasificación de imágenes de RapidEye del INF

Código de clase	Nombre de clase	Nivel mínimo de exactitud (%)
1	Bosque maduro	90
2	Bosque deciduo	80
3	Bosque secundario	80
4	Manglar	80
5	SAF	70
6	Plantación forestal	80
7	Bosque palmas	80
8	Pastos	80
9	Páramo	90
10	No forestal	95
11	Nubes	95
12	Sombra de nubes	95



### Validación independiente de campo

Esta validación fue realizada por un profesional ajeno al grupo que construyó la cartografía (Alvarado 2013), con el objetivo de asegurar la máxima independencia entre la información de validación y la utilizada para la construcción de la cartografía.

**Objetivo general.-** Realizar una validación independiente de campo del mapa tipos de bosque y estratos fuera de bosque del Inventario Forestal Nacional mediante validación de campo y fotointerpretación para obtener estadísticas que permitan determinar su exactitud.

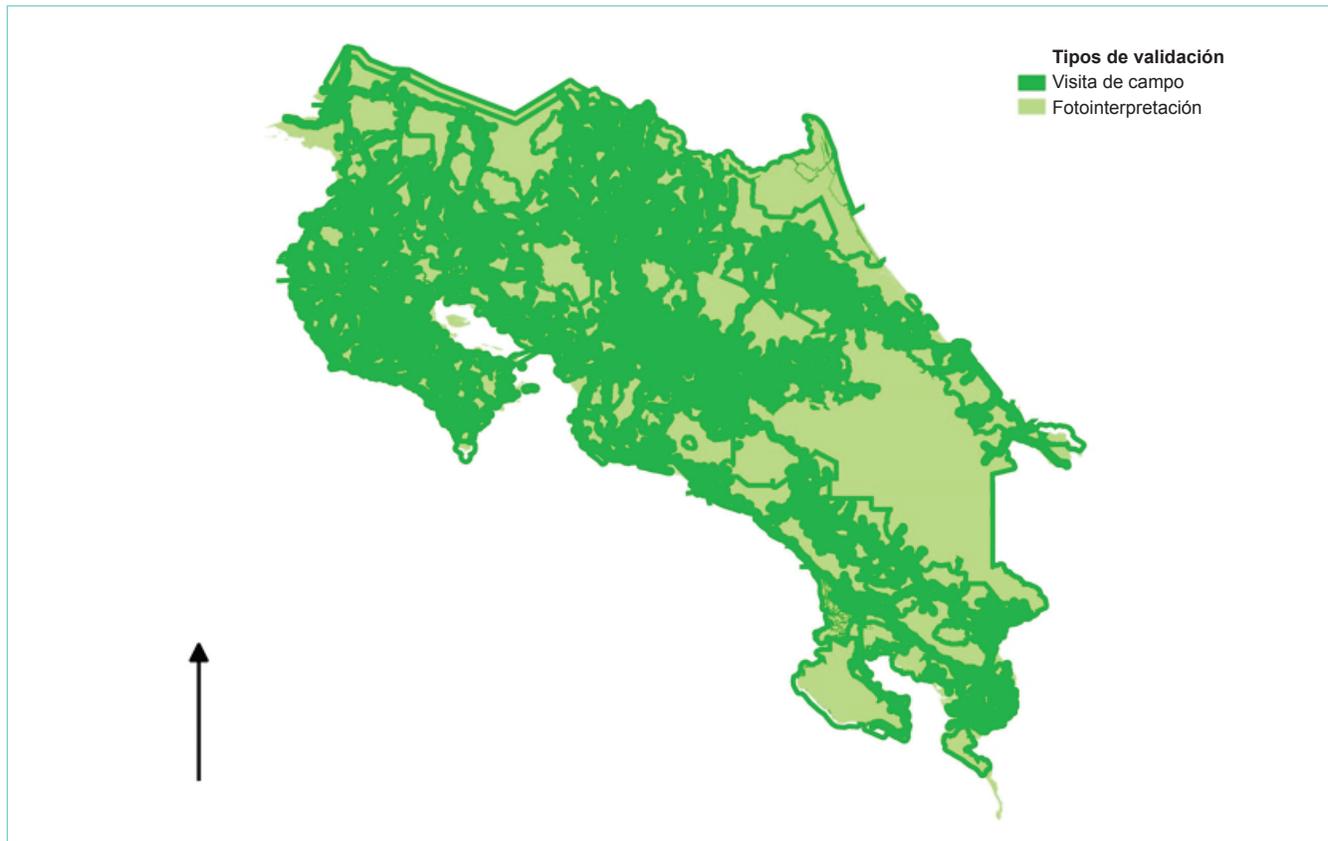
### Objetivos específicos

1. Realizar la verificación de 200 puntos de muestreo ubicados en el mapa de clasificación de tipos de bosque, distribuidos en todo el país y que contemplen las ocho categorías de uso existentes.
2. Realizar la verificación de 15 puntos de muestreo ubicados en coberturas no identificadas por presencia de nubes o sombra de nubes en el mapa de clasificación de tipos de bosque, distribuidos en todo el país.
3. Realizar la verificación mediante fotointerpretación de 100 puntos de muestreo ubicados en el mapa de clasificación de tipos de bosque, distribuidos sobre sitios de difícil acceso en todo el país y que contemplen las ocho categorías de uso existentes.
4. Formular una base de datos con la información colectada en el campo, que permita analizar el grado de concordancia entre la información aportada por la cartografía y lo existente en el campo.
5. Formular una base de datos con la información colectada mediante análisis fotointerpretativo, que permita determinar el grado de concordancia entre la información aportada por la cartografía y la fotointerpretada.

**Selección y muestreo de los 200 puntos para validación de campo y 100 de fotointerpretación.-** Con el objetivo de lograr un uso más eficiente de los recursos y ubicar puntos de control de campo en la totalidad del país, se siguió una estrategia diferente para la recolección de puntos de control:

1. Levantamiento de puntos de control en campo ubicados en regiones de accesibilidad media y alta, determinada por la densidad de caminos, ubicación de poblados y cercanía a áreas silvestres protegidas. En estas regiones se ubicaron 200 puntos de control que fueron visitados en campo (Figura 10).
2. Levantamiento de puntos de control mediante análisis fotográfico en regiones de baja accesibilidad (baja densidad de caminos y poblados, distancias mayores de 2 km a áreas silvestres protegidas). Se ubicaron puntos de control de manera aleatoria que fueron validados mediante la comprobación visual por parte del evaluador; para ello se utilizaron las ortofotografías BID-Catastro (ver distribución de puntos en el Cuadro 12).





**Figura 10.** Zonificación del país según tipo de validación realizado para la cartografía del IFN-Costa Rica 2013- 2014

**Cuadro 12.** Cantidad de puntos de control levantados para la validación de la cartografía del IFN-Costa Rica

Clase	Campo	Fotointerpretación	Total
Pastos (con y sin árboles)	51	22	73
Bosque maduro	47	20	67
Bosque secundario	40	24	64
No forestal	27	14	41
Plantación forestal	12	8	20
Manglar	12	6	18
Bosque de palmas	11	6	17
<b>Total</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>300</b>



### Validación de los puntos mediante visitas de campo

1. Por medio de la herramienta *r.sample* del programa Geospatial Modelling Environment (<http://www.spataleecology.com/gme/>) se realizó la selección aleatoria de los 200 puntos de muestreo en campo y 100 de fotointerpretación, según las cantidades indicadas en el Cuadro 12.
2. Una vez definida la ubicación de los 200 puntos de muestreo en campo se procedió a cargar los puntos en una unidad GPS GARMIN 62s. En la planificación del levantamiento de la información de campo, por medio del programa ArcGis se procedió a convertir el archivo de puntos (.shp) en un archivo .KML para hacerlo visible en el navegador Google Earth.
3. Mediante este navegador y la capa de información de poblados del Atlas Digital de Costa Rica (ITCR 2008), se procedió a identificar el nombre de los poblados más cercanos al punto de muestro, con el fin de trazar las rutas de muestreo.
4. Una vez trazadas las rutas de muestreo y cargada la capa de los puntos en la unidad GPS se procedió a navegar hacia cada uno de los puntos de muestreo según sus coordenadas.
5. Se confeccionó un formulario para la recolección de la información de campo, de manera que satisficiera las necesidades del proyecto (Anexo 2).
6. Al llegar al punto de muestreo se tomaron cuatro fotografías panorámicas, una en dirección de cada punto cardinal y siguiendo el orden siguiente: norte – oeste – sur – este.
7. Alrededor del punto de muestreo, se delimitó una parcela circular imaginaria con un radio de aproximadamente 50 metros. Esta corresponde al área donde se evaluó uso y cobertura dominante.
8. Se tomó un punto de control de GPS con la unidad GARMIN 62s y se guardó en su memoria.
9. Con un densiómetro y en cuatro puntos diferentes de la parcela circular, separados al menos por 25 metros, se realizó la medición de la cobertura de copas.
10. En cada punto de muestreo de copas, y cuando fue posible, se tomó una fotografía en ángulo de 70 a 90° que permitiera mostrar la estructura horizontal del sitio cuando dicha condición lo justificaba (no se realizó sobre áreas ‘no forestales’ ni en ‘pastos no arbolados’).
11. Durante el recorrido por la parcela imaginaria se observaron las características dominantes del sitio, tales como tipo de bosque, especies, uso y/o cobertura de suelo, tipo de cultivo, estructura.
12. Se procedió a completar el formulario de campo (Anexo 2).

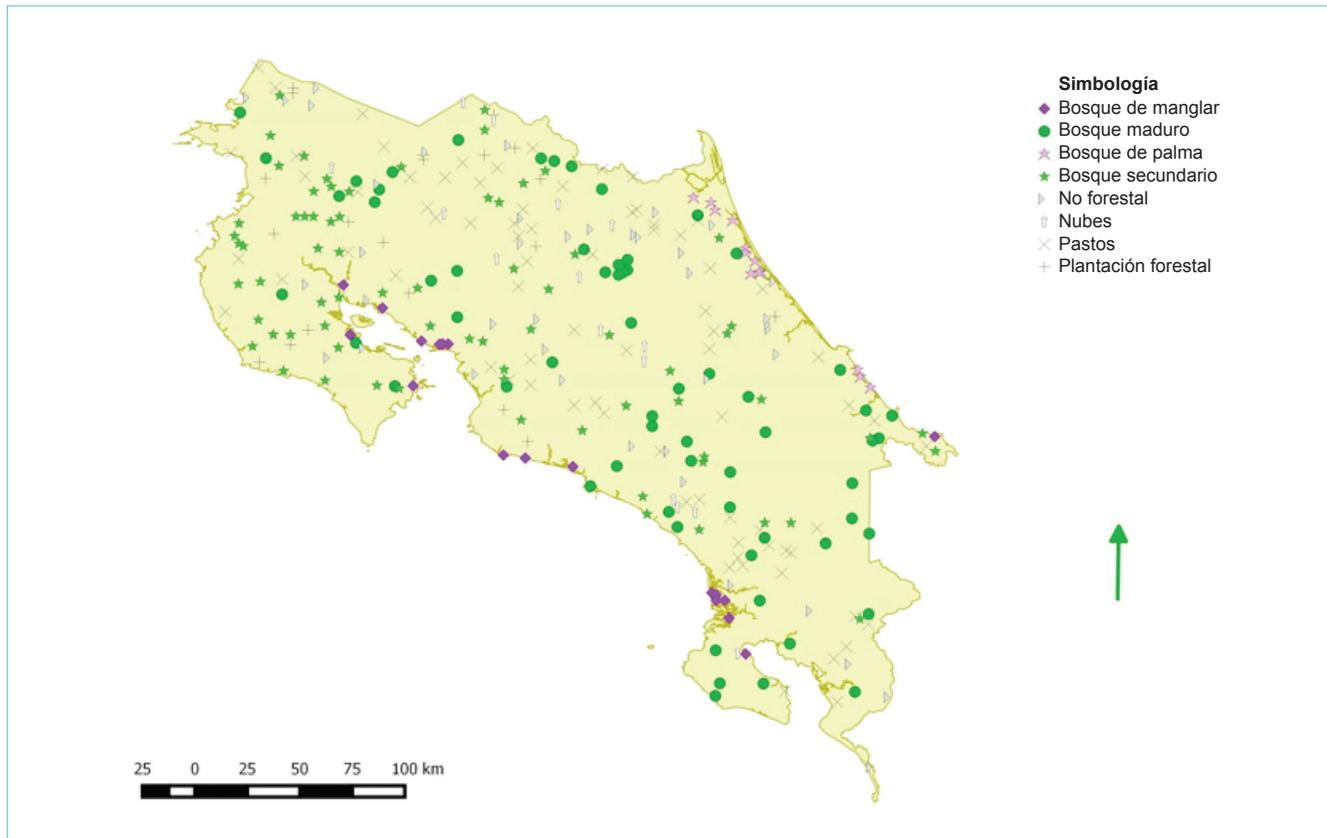
Si no fue posible acceder a los puntos de muestreo por razones fuera del alcance técnico, se procedió de la siguiente manera:

1. Se identificaron las razones por las cuales no se tuvo acceso al punto de muestreo.
2. En donde era posible, se tomaron fotografías para ilustrar la imposibilidad del acceso.
3. Mediante la malla de coordenadas debidamente filtrada, en una computadora portátil con el programa de SIG ArcView se procedió a seleccionar el punto de muestreo más cercano a la ubicación actual y correspondiente a la misma categoría de cobertura.

### Validación de los puntos mediante fotointerpretación de ortofotografías BID-Catastro

La escogencia de los 100 puntos de muestreo se realizó de forma aleatoria sobre la malla de puntos construida y aportada por la cartografía del proyecto. Para la selección de estos puntos se utilizó el programa de SIG ArcGis y se tomaron en cuenta algunas consideraciones con el fin de optimizar la recolección de la información en el menor tiempo, de la mejor calidad y al menor costo. En la Figura 11 se muestra la ubicación de todos los puntos de muestreo de la validación independiente. A continuación se detallan las consideraciones que se tomaron en cuenta para la selección de los puntos.





**Figura 11.** Ubicación de los puntos a validar mediante interpretación de ortofotografías del proyecto BID-Catastro, 2005

### 1. Cálculo de exactitud del mapa

Para evaluar la exactitud del mapa se creó una matriz de contingencia (*contingency matrix*), (Congalton 1991). Esta es una matriz cuadrada de números que expresan el número de píxeles (en este caso, observaciones) asignados a una categoría en particular relativos a la verdadera categoría a la cual pertenecen estos píxeles (obtenido mediante la verificación en campo) (Story y Congalton 1986). De esta matriz se extrae otra serie de estimadores de exactitud:

- Exactitud del productor: permite determinar los errores de omisión generados cuando puntos de control que se espera pertenezcan a una categoría, se encuentran en una o varias categorías diferentes.
- Exactitud del usuario: estima los errores de comisión; es decir, aquellos generados al tomar en cuenta todos los puntos de control que fueron clasificados dentro de una categoría.
- Parámetro kappa (K): este parámetro se deriva de las observaciones de campo y permite cuantificar que tan “mejor” es la clasificación obtenida, en comparación con otra realizada completamente al azar (Lunetta *et al.* 1991).

Como las observaciones de campo fueron realizadas en un área de 50 metros de radio y deben ser comparadas con ubicaciones puntuales en la cartografía, se estableció el siguiente mecanismo para homogenizar ambas observaciones:

- Para cada punto visitado en campo, se creó un área de 50 metros de radio (*buffer*) usando ArcGIS 10.0.
- Las áreas circulares resultantes fueron recortadas en la cartografía de tipos de bosque (función clip en ArcGIS 10.0).



- Para cada área circular extraída de la cartografía se calculó la superficie de cada una de las categorías presentes dentro del área circular (Figura 12). Se renombró cada área con el nombre de la categoría que tuviese una superficie mayor.
- Se compararon los resultados observados en campo con los resultados del proceso anterior (función *Table Join*, ArcGIS 10.0).



Figura 12. Área circular utilizada para determinar la categoría “esperada” en la cartografía de tipos de bosques

## 2. Comparación de datos observados en el campo versus los esperados en la cartografía

Si para un punto dado, la clase observada en el campo fue también la clase de mayor área en las regiones circulares extraídas del mapa (clase esperada), entonces ese punto se etiquetó como exitosamente clasificado. Si, por el contrario, la clase observada no se encontraba presente en el área circular extraída del mapa, o esta clase no era la de mayor área, el punto se etiquetó como “fracaso” y se consignó la clase de mayor superficie como la clase en la que fue clasificado erróneamente el punto. Con esta información se construyó una matriz de contingencia, la cual permite comparar los resultados esperados y observados de un proceso y además la distribución por cada uno de los componentes del error.

## 3. Procesamiento final de las imágenes clasificadas

El procesamiento final de las imágenes clasificadas consistió de cuatro subprocesos o actividades.

- Revisión de errores de nombres de clases y códigos de clases de cobertura.
- Agrupación de polígonos adyacentes de una misma clase de cobertura.
- Agregación de polígonos con área de menos una hectárea con la clase adyacente de área superior, la cual corresponde a la unidad mínima de mapeo según la definición de bosque aceptada.
- Concatenación (comando *Update*) de capas vectoriales para crear una sola capa de cobertura forestal. La concatenación resultante se transformó al sistema de coordenadas geográficas oficiales de Costa Rica (CRTM05) y se recortó con el borde del territorio continental de Costa Rica derivado de las hojas cartográficas 1.50 000 y actualizado al 2008.

Estos cuatro procesos se realizaron con las herramientas disponibles en los programas SIG: *Dissolve*, *Agregation*, *Update*. La descripción de los subprocesos b, c, y d se ofrece en el Anexo 3.



### Mapa de pastos arbolados

Para preparar el mapa de pastos arbolados se compararon los resultados del mapa de tipos de bosques preparado con una unidad de mapeo de una hectárea, con el mismo mapa antes de ser post-procesado a la unidad mínima de mapeo. El resultado de esta comparación permitió identificar todos los parches de bosque de menos de una hectárea y árboles inmersos en un área de pastos. Una vez identificadas estas áreas, se agregó la información a las áreas de pastos de la capa del tipo de bosque correspondiente. Se hace notar que este procedimiento es factible debido a que las imágenes utilizadas para preparar el mapa tenían una resolución de 5x5 metros y que la segmentación de las mismas permitió identificar áreas de menos de una hectárea. El mapa de pastos arbolados se ofrece en la Figura 13.

## Resultados

De acuerdo con los resultados de la clasificación, el 52,4% del país tiene algún tipo de cobertura boscosa; sobresale el bosque maduro (31%), seguido del bosque secundario (13,7%) y el bosque deciduo (4,6%). La mayor parte de esta última clase corresponde a bosque secundario deciduo (ausencia de hojas en verano), tal como se pudo comprobar mediante observaciones de campo. Por esta razón, a la hora de calcular la exactitud, el bosque deciduo se agrupó dentro de la clase 'bosque secundario'. Sin embargo, se espera que para la próxima temporada seca se pueda validar esta clase con más puntos de campo (Cuadro 13). En la Figura 14 se muestra el mapa de tipos de bosque para Costa Rica en el 2013.

**Cuadro 13.** Área de las clases de uso o cobertura identificadas en la cartografía del IFN-Costa Rica

Tipo de cobertura	Extensión (ha)	Porcentaje
Bosque maduro	1 581 893	31,0
Pastos	1 231 948	24,1
Bosque secundario	702 366	13,7
No forestal	694 756	13,6
Nubes y sombras	496 802	9,7
Bosque deciduo	234 164	4,6
Plantación forestal	74 627	1,5
Bosque palmas	46 834	0,9
Manglar	37 419	0,7
Páramo	10 253	0,2
Total	5 111 063	100,0

### Validación de la cartografía con respecto a la malla de puntos

Las pruebas de exactitud de la capa final se hicieron usando la malla de puntos descrita en la sección "Validación de la exactitud". Para realizar las pruebas se consideraron varias opciones de número de clases, cuyos resultados se resumen en el Cuadro



14. En el Cuadro 15 se presentan los resultados de las pruebas de exactitud considerando el análisis de 10 clases. Como se observa, la exactitud global es del 89%; las clases con mayor exactitud son las de nubes, sombra de nubes (100%), seguidas por la clase de bosque maduro (94%), lo que permite asegurar que el mapa es una excelente herramienta para la localización de bosques maduros, que son los de mayor biodiversidad y biomasa. Los mayores errores se obtuvieron en las clases esperadas: plantaciones forestales y bosque de palmas, clase que se confundió mayormente con bosque maduro. Cuando se analizaron 9 clases, la exactitud global sube a un 92%, con un Khat de 0,89. Asimismo, la exactitud global se incrementa a 94% cuando se resumen las clases de cobertura a las tres principales: bosque, no bosque, y sombras y nubes.

**Cuadro 14.** Resultados de las pruebas de validación y cálculo de exactitud de la capa de tipos de bosque producida en el procesamiento final

Número de clases	Exactitud global	Khat
<b>10 clases:</b> uniendo SAF, bosque secundario y bosque deciduo	0,89	0,86
<b>9 clases:</b> uniendo además clases de pastos y no bosque	0,92	0,89
<b>3 clases:</b> uniendo todas las clases de bosque, todas las de no bosque y nubes más sombra de nubes	0,94	0,90

**Cuadro 15.** Pruebas de validación de la clasificación de imágenes RapidEye usadas para la elaboración del mapa de tipos de bosque de Costa Rica 2012. Resultados usando 10 clases

Clasificador	Verificador										Total general	Exactitud usuario
	Bosque maduro	Bosque palmas	Bosque secundario	Manglar	No forestal	Nubes	Pastos	Plantación forestal	Páramo	Sombra nubes		
Bosque maduro	2743	11	64	2	13		23	3			2859	0,96
Bosque palmas		73	4		3		1				81	0,90
Bosque secundario	75	5	1682	2	28		175	10			1977	0,85
Manglar	1			57	6		2				66	0,86
No forestal	11	3	18	4	1282		212	2			1532	0,84
Nubes	0	0	0		0	840	0				840	1,00
Pastos	79	2	189		129		1888	23			2310	0,82
Plantación forestal	3		4		12		14	119			152	0,78
Páramo	3						1		22		26	0,85
Sombra de nubes	0		0	0	0		0	0		323	323	1,00
Total general	2915	94	1961	65	1473	840	2316	157	22	323	10166	
Exactitud productor	0,94	0,78	0,86	0,88	0,87	1,00	0,82	0,76	1,00	1,00		
Exactitud global	0,89											
Khat	0,86											



## Validación de la cartografía con respecto a la validación de campo

La exactitud general del mapa fue de un 82,792% con un indicador kappa de 0,79%. Este último valor indica la eficiencia de la clasificación y qué tan diferente es de una clasificación totalmente aleatoria. Las clases con menor exactitud esperada (usuario) son plantación forestal y bosque secundario (Cuadro 16). Sin embargo, en el caso de las plantaciones forestales, esto pudiera deberse a la poca cantidad de puntos de control -únicamente un 7% del total de la muestra-. Por otro lado, la gran variabilidad de estados sucesionales en los bosques secundarios podría influir en su inclusión en otra categoría al ser identificados en campo. Por ejemplo, etapas sucesionales tardías de bosque secundario pueden ser identificadas como bosque maduro, mientras que las etapas muy tempranas pueden identificarse como pastos arbolados (Cuadro 14).

Clases como bosque maduro, bosque secundario y pastos reflejan una dispersión en los hallazgos de la evaluación de campo. En el caso del bosque maduro, un 24% de los puntos de control visitados pertenecían a otra categoría. Llama la atención que, para esta clase, un 12% de los puntos identificados en el mapa fueron en realidad bosque secundario. Esto reafirma los indicios de que haya una mezcla importante y una dificultad media para separar bosques maduros de bosques secundarios. Por otro lado, casi el 50% de los puntos correspondientes a la clase plantación forestal estaban ubicados en otras categorías, como pastos arbolados y bosque secundario. Esto podría deberse a que la composición de una plantación forestal en etapas iniciales se asemeja más a un pasto arbolado o a un bosque secundario en estado sucesional intermedio.

**Cuadro 16.** Matriz de error para la validación de las clases obtenidas en la cartografía del IFN-Costa Rica. Los números en cada casilla indican la cantidad de puntos de control que corresponden a cada clase definida en el mapa de tipos de bosque.

		Campo (observado)							Exactitudes		
		BM	BS	BG	BP	PF	PA	NF	Total	Productor	Usuario
Cartografía (esperado)	BM	51	8	1	1	3	1	2	67	0,76	0,89
	BS	2	58	1			2	1	64	0,91	0,77
	BG	1	1	15	1				18	0,83	0,88
	BP	1	1		13			2	17	0,76	0,81
	PF		3			10	4	3	20	0,50	0,63
	PA	2	1		1	2	65	2	73	0,89	0,88
	NF		3			1	2	43	49	0,88	0,81
	Total	57	75	17	16	16	74	53			
General	82,79%										
Kappa	0,79										

BM: Bosque maduro  
BS: Bosque secundario

BG: Bosque de manglar  
BP: Bosque de palma

PF: Plantación forestal  
PA: Pasto arbolado

NF: No forestal



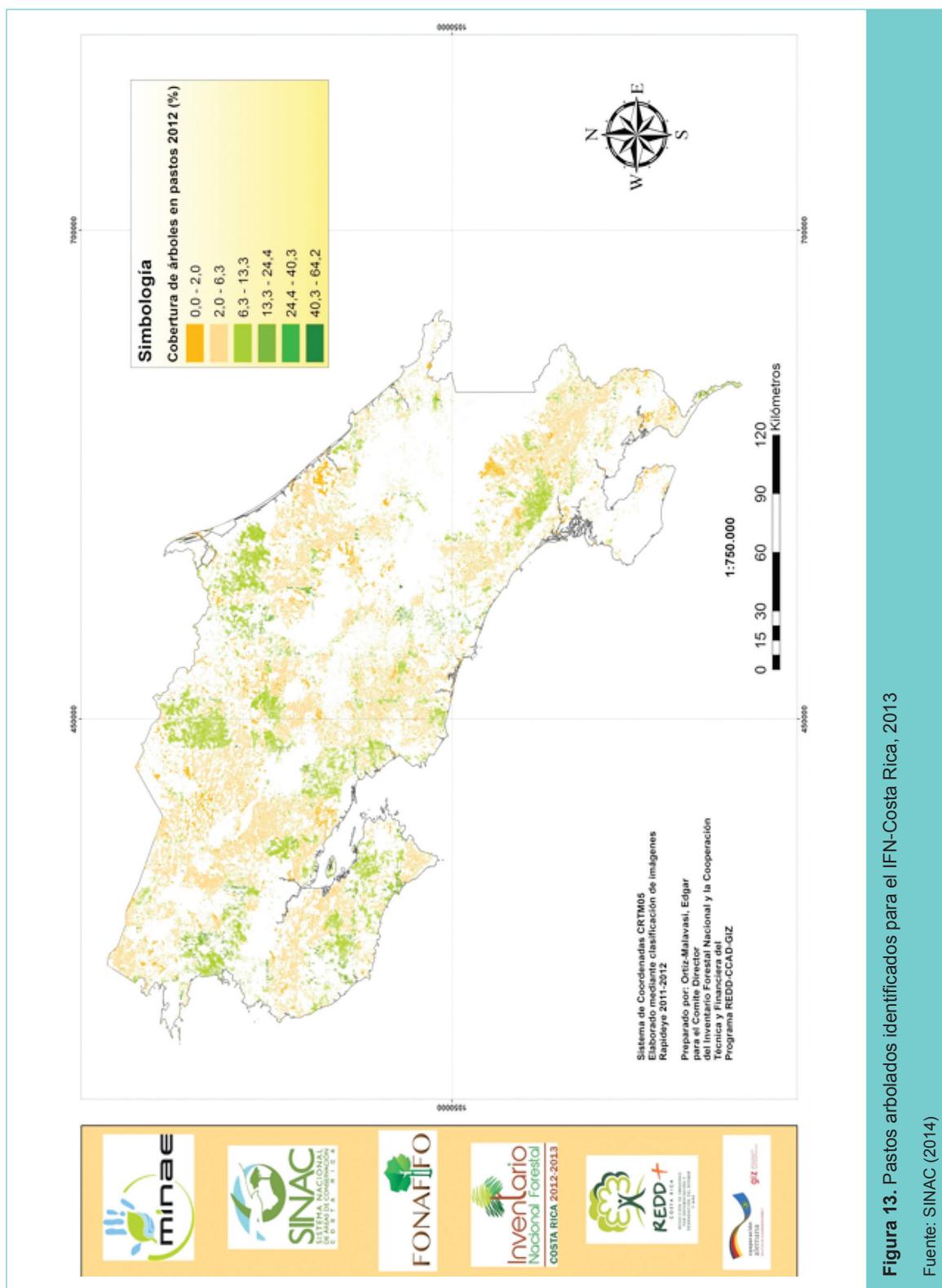


Figura 13. Pastos arbolados identificados para el IFN-Costa Rica, 2013

Fuente: SINAC (2014)



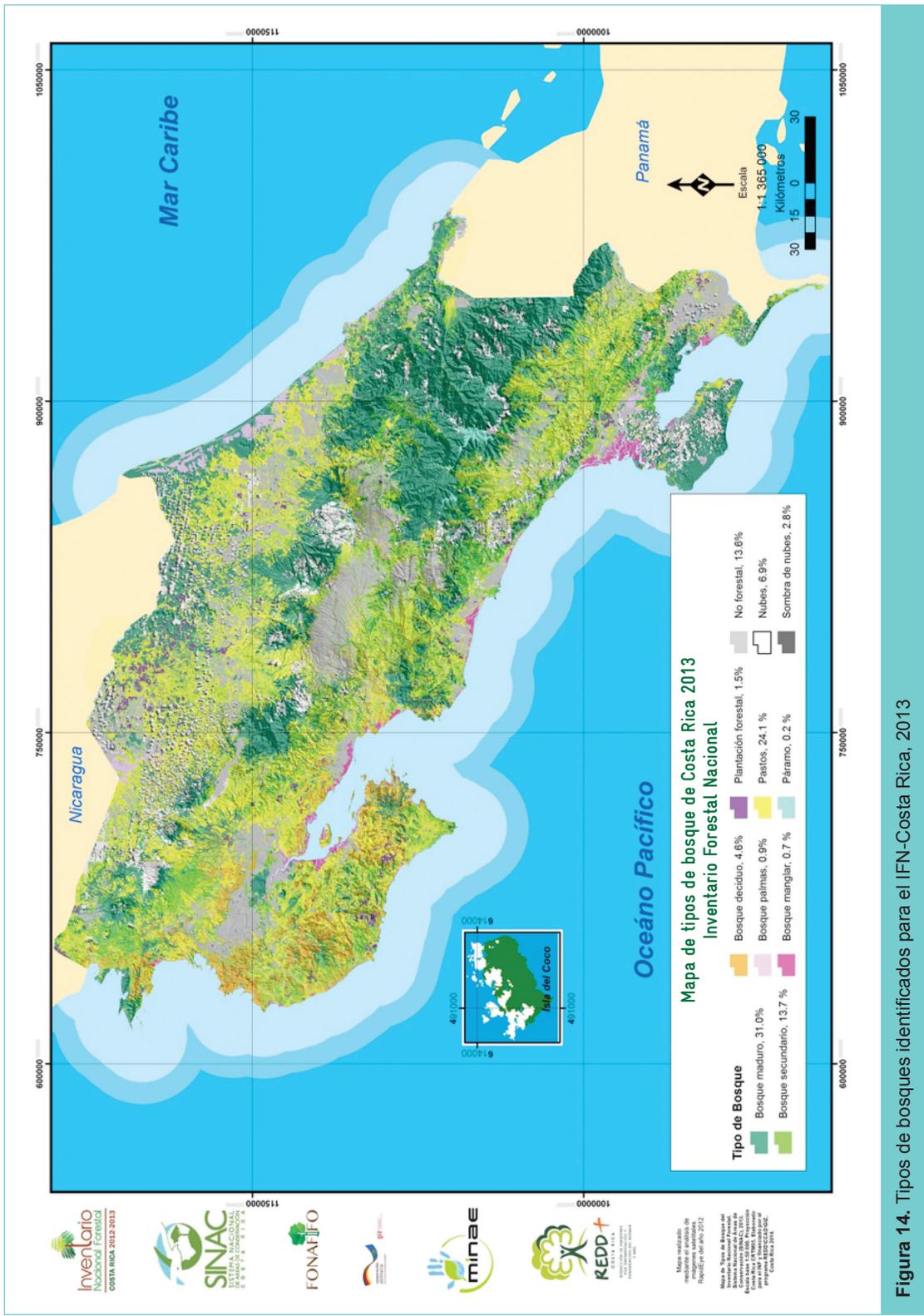


Figura 14. Tipos de bosques identificados para el IFN-Costa Rica, 2013

## Bibliografía

- Alvarado, G. 2014. Validación del mapa de estratificación por tipos de bosque y estratos fuera de bosque, a ser utilizados en el levantamiento del Inventario Nacional Forestal de Costa Rica. San José, Costa Rica, SINAC. 49 p.
- Blaschke, T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (1):2 – 16.
- Bontemps, S., Bogaert, P., Titeux, N., Defourny, P. 2008. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. *Remote Sensing of Environment* 112 (6): 3181-3191.
- Carleer, A., Debeir, O.; Wolff, E. 2005. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 71: 1285-1294.
- Congalton, R. 1991. A Review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* (37) 1: 35-46.
- Chuvieco, E. 2010. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 1ª ed. Barcelona, España, Editorial Planeta. 590 p.
- Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P. 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment* 102 (1-2): 1-11.
- Ewel, J. J. 1980. Tropical succession: Manifold routes to maturity. *Biotropica* 12(Suppl.): 2-7.
- Fallas, J. 2011. Ecoregiones y ecosistemas de Costa Rica: un enfoque ecosistémico. (sin publicar). 26 p.
- Fallas, J.; Valverde, C. 2009. Costa Rica: mapas de precipitación media anual-estacional, meses secos y temperatura media anual. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 16 p.
- Herrera, W.; Gómez, L. 1993. Mapa de Unidades Bióticas de Costa Rica. Escala 1:685 000. San José, Costa Rica.
- Holdridge, L. 1978. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.
- Husch, B.; Miller, C.; Beers, T. 1983. Forest Mensuration. New York, United States, John Wiley and Sons. 402 p.
- ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 2008. Atlas Digital de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 1 DVD.
- ITT Visual Information Solutions. 2007. ENVI 4.7; ITT Visual Information Solutions. Boulder, Colorado, USA.
- Jensen, J. R. 2005. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. New Jersey United States, Prentice Hall. 526 p.
- Kappelle, M.; Brown, A.D. (Eds). 2001. Bosques Nublados del Neotrópico. Heredia, Costa Rica, INBio. 698 p.
- Lunetta, R.; Congalton R.; Fenstermaker, L.; Jensen, J.; McWire, K.; Tinney, L. 1991. Remote Sensing and Geographic Data Integration: Error Sources and Research Issues. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (57)6: 677-687.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2011. Propuesta para la Preparación de Readiness R-PP Costa Rica” 163 p.
- Neubert, M.; Meinel. 2003. Evaluation of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Applications. *In* Schroeder, M.; Jacobsen, K.; Heipke, C. (Eds.). Proceedings of the Joint ISPRS/EARSel Workshop “High Resolution Mapping from Space 2003”. (Hannover, Germany, October 6-8, 2003). 8 p. CD-ROM.
- M. Neubert, G. Meinel Omernik, J. M. 1987. Ecoregions of the conterminous United States. Map supplement. *Annals of the Association of American Geographers.* (77) 1, 118 – 125.
- Ortiz, E. 2013. Cartografía base para realizar el Inventario Forestal Nacional (IFN) de Costa Rica. Informe Final Consolidado- en consultoría- para el Inventario Forestal Nacional en el marco del Programa REDD/CCAD/GIZ. San José, Costa Rica. 34 p.
- Ortiz, E.; Louman, B. 2002. Estrategias especiales de muestreo. *En: Inventarios forestales para bosques latifoliados en América.* Orozco, L.; Brumer, C. (eds). Turrialba, Costa Rica, CATIE. p. 151-170. (Serie Técnica. Manual Técnico no. 50).
- Scheiwe, J. 2002. Segmentation of High Resolution Remotely Sensed Data. Concepts, Applications and Problems. *In* Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications (2002, Ottawa, Canada). 2002. Costas Armenakis; Lee, Y.C. Ottawa, Canada. (Volume XXXIV, Part 4).
- SINAC-Fonafifo (Sistema Nacional de Áreas de Conservación – Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). 2011a. Taller Nacional de expertos para Analizar u sugerir la Metodología para la línea base y el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación para la Estrategia Nacional REDD+ de Costa Rica (setiembre, 2011). San José, Costa Rica. Ayuda Memoria.
- SINAC-Fonafifo (Sistema Nacional de Áreas de Conservación – Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). 2011b. Taller sobre lineamientos generales para el diseño del Inventario Forestal Nacional. Estrategia Nacional REDD+ de Costa Rica. (Noviembre 2011). San José, Costa Rica. Ayuda memoria. 68 p.
- Spectral Sciences Inc. 1987. MODTRAN: A moderate Resolution Model for LOWTRAN. Burlington, MA, United States. (Technical Report. No.1).
- Story, M.; Congalton, R. 1986. Accuracy assessment: A user’s prespective. *Photogrammetric and Remote Sensing* 52: 397-399.
- Ulate, C. 2011. Análisis y comparación de biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Cartago, Costa Rica, ITCR.
- Vesanto, Veli-Heikki. 2012. Atmospheric Correction of a Seasonal Time Series of Hyperion EO-1 Images and Red Edge Inflection Point Calculation. Master’s thesis of Geography Geoinformatics. University of Helsinki Department of Geosciences and Geography Division of Geography. p 7-25.
- Wang, L., Sousa, W.P., Gong, P. 2004. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing* 25 (24): 5655-5668
- Yang, A. Wright, J; Ma Y; Sastry, S. 2007. Unsupervised segmentation of natural images via lossy data compression. *Computer Vision and Image Understanding* 110 (2008): 212-225.



# Anexos

## Anexo 1. Pre-procesamiento de imágenes RapidEye

### Resumen de pre-procesamiento de imágenes realizado por el PRIAS

Carlos A. Campos<sup>1</sup>, Sofía Calvo<sup>2</sup>, Marilyn Ortega<sup>2</sup>

#### Corrección atmosférica

Un paso previo para la manipulación de imágenes es la conversión de los niveles digitales (ND) almacenados en una imagen original a variables físicas (reflectancia), ya que permite trabajar con variables de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y otros métodos de detección de energía electromagnética.

La importancia de la corrección atmosférica radica en que los componentes de la atmósfera aportan un efecto de absorción y dispersión que distorsiona -a veces fuertemente- la señal procedente de la superficie terrestre. Ese efecto perturba especialmente las longitudes de onda corta. Además, puesto que RapidEye colecta imágenes *off nadir*, también se ve afectado por el efecto de adyacencia, lo que implica que se reciba energía procedente de cubiertas vecinas, que reduce el contraste entre píxeles y dificulta la interpretación (Chuvieco 2010).

Para estimar la reflectancia de una superficie es necesario, previamente, calcular la radiancia espectral, que es consecuencia de la radiación solar reflejada en el suelo (suponiendo que la superficie tiene un comportamiento lambertiano), con lo cual se pueden generar coeficientes de calibración específicos para cada sensor (Chuvieco 2010). En el caso de RapidEye, estos coeficientes de calibración están contenidos en los metadatos y son generados para cada banda.

La corrección atmosférica puede ser desarrollada mediante diferentes metodologías. En este caso se utilizó el modelo físico MODTRAN, contenido en la extensión FLAASH (*fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes*), que intenta eliminar las distorsiones por aerosoles suspendidos en la atmósfera. Para más información del modelo MODTRAN consultar Vesanto (2012).

#### Resumen de imágenes RapidEye para Costa Rica, 2012

Imágenes	N
Reportadas por E. Ortiz	28
Corregidas por inconsistencias	9
Con nubosidad mayor al 40% de la imagen	6
Oscuras	18
Con recortes	34
Con reemplazo	46
Buena visibilidad	146
Total	164

<sup>1</sup> Redacción del documento

<sup>2</sup> Programa de Investigaciones Aerotransportadas y Sensores Remotos



## Estructura de carpetas

- **Cruda**
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####.tif
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_browse.tif
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_license.txt
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_metadata.xml
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_readme.txt
  - #####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_udm.tif
- **GE**
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ge.kml
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_thumbnail.png
- **Rad**
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_rad
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_rad.hdr
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_rad\_bil
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_bil.hdr
- **Ref**
  - acc\_modroot fla
  - channel\_def.txt
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref.hdr
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_journal.txt
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_template.txt
- **TIFF**
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_tiff.tfw
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_tiff.tif
- **Seg**
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_05\_05.dbf
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_05\_05.prj
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_05\_05.shp
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_05\_05.shx
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_07\_05.dbf
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_07\_05.prj
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_07\_05.shp
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_10\_07\_05.shx
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_05\_05.dbf
  - PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_05\_05.prj



PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_05\_05.shp  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_05\_05.shx  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_07\_05.dbf  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_07\_05.prj  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_07\_05.shp  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_50\_07\_05.shx  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_100\_05\_05.dbf  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_100\_05\_05.prj  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_100\_05\_05.shp  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_100\_05\_05.shx  
 PP\_#####\_aaaa-mm-dd\_RE#\_3A\_#####\_ref\_100\_07\_05.dbf

1644119_2012-08-13_RES_3A_142490	5% nubes + recorte	30	Se aclaró la imagen
1644122_2011-11-29_RE4_3A_142490	25% nubs + recorte	30	Se aclaró la imagen
1644126_2012-08-24_RE2_3A_142490	Recortada	60	Corregida
1644127_2012-08-24_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1644220_2011-04-16_RE1_3A_142490	5% nubes + recorte	40	Se aclaró la imagen
1644222_2012-04-24_RE3_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1644223_2012-04-26_RE1_3A_142490	10% nubes + recorte	40	Se aclaró la imagen
1644225_2011-04-01_RE1_3A_142490	70% nubosidad + recorte	20	Nubosidad concentrada en un área de la imagen
1742805_2012-03-13_RES_3A_142490	Recortada	40	Se aclaró la imagen
1742806_2011-12-06_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1742903_2012-04-21_RE1_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1742904_2012-04-20_RE5_3A_142490	30% nubes	40	Se aclaró la imagen
1743002_2012-01-29_RE4_3A_142490	45% nubes	20	Se aclaró la imagen
1743002_2012-03-16_RE3_3A_142490	40% nubes	20	Se aclaró la imagen, pero continúa muy oscura
1743003_2012-01-29_RE4_3A_142490	30% nubes	15	Se aclaró la imagen
1743201_2012-03-16_RE3_3A_143711	Recortada	60	Corregida
1743102_2012-03-26_RE4_3A_142490	Brillo excesivo	20	Corregida
1743103_2012-01-29_RE4_3A_142490	45% nubes	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743104_2012-02-25_RE_3A_143711	25% nubes	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743105_2012-03-07_RE4_3A_142490	Oscura	20	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743107_2012-01-20_RE4_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1743202_2012-03-29_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1743207_2012-01-10_RE4_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1743301_2012-04-22_RE2_3A_142490	Recortada	50	Corregida
1743306_2012-01-22_RE1_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1743305_2012-01-22_RE1_3A_142490	15% nubes + muy oscura	20	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743401_2012-08-01_RE3_3A_142490	45% nubes	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743404_2012-03-02_RE3_3A_142490	10% nubes + muy oscura	50	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743405_2012-01-18_RE2_3A_142490	35% nubes	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743504_2012-03-02_RE3_3A_142490	10% nubes + muy oscura	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura



1743507_2012-02-05_RE1_3A_142490	Recortada	60	Corregida
1743606_2012-01-18_RE2_3A_142490	Recortada	60	Corregida
1743701_2012-06-25_RE4_3A_142490	35% nubes	15	Se aclaró la imagen, pero continúa oscura
1743702_2011-01-31_RE3_3A_142490	30% nubes	20	Nubosidad concentrada en un área de la imagen
1744003_2012-04-22_RE2_3A_142490	Recortada	60	Corregida
1744103_2012-04-22_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1744102_2012-04-22_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida
1744103_2012-04-22_RE2_3A_142490	Recortada	40	Corregida

Nota: imágenes en negrita son coincidentes con las reportadas por Edgar Ortiz.



## Anexo 2. Formulario para la validación independiente de la cartografía



1. Fecha: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ Hora: \_\_\_:\_\_\_
2. ID Punto: \_\_\_\_\_
3. Código Punto : \_\_\_\_\_
4. CRTMX : \_\_\_\_\_
5. CRTMY: \_\_\_\_\_
6. No. Fotos: \_\_\_\_\_

### Observaciones:

1. **Cobertura de Copa:**  
(Medida en al menos 4 puntos dentro del área)  
 Mayor o igual a 30% (Promedio de las observaciones).  
*Pase a punto 3*  
 Menor a 30% (Promedio de las observaciones). *Pase a punto 17*  
 Menor al 10% (*Pase al punto 2*).
2. **Tipo de Cobertura No boscosa dominante:**  
 Pasto no arbolado  
 Urbano disperso / rural  
 Urbano medio  
 Urbano denso  
 Agrícola mixto:  
 Tipos de cultivo:  
 \_\_\_\_\_  
 Agrícola monocultivo:  
 \_\_\_\_\_  
 Cuerpos de agua / Lagunas  
 Rocas / suelo desnudo (no preparado para agricultura).
3. **Tipo aparente de cobertura boscosa:**  
 a.  Bosque (maduro, deciduo, secundario). *Pase punto 4*  
 b.  Plantación forestal. *Pase a punto 10*  
 c.  Agroforestal. *Pase a punto 15*  
 d.  Manglar. *Pase a punto 14.*  
 e.  Bosque de palmas. *Pase a punto 13.*  
 f.  Pasto arbolado. *Pase a punto 17*
4. **Cantidad de doseles arbóreos.**  
 a.  Un dosel arbóreo  
 b.  Más de un dosel arbóreo.
5. **Presencia notoria de especies indicadoras de bosque secundario:**  
 a.  No hay presencia notoria de especies indicadoras de bosque secundario.

- b.  Se encuentran las siguientes especies indicadoras de bosque secundario.  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

6. **Presencia notoria de especies exóticas o agrícolas en el bosque.**  
 a.  No hay presencia notoria de especies exóticas o agrícolas.  
 b.  Presencia de especies exóticas o agrícolas en el bosque.  
 \_\_\_\_\_
7. **Evidencia de aprovechamientos maderables anteriores.**  
 a.  No hay evidencia de aprovechamientos anteriores.  
 b.  Tocones, caminos de extracción, pistas de arrastre.  
 c.  Vecinos indican existencia de aprovechamientos anteriores.
8. **Historial del último cambio de cobertura vegetal.**  
 a.  Vecinos indican que no se ha dado un cambio significativo en la cobertura boscosa.  
 b.  Vecinos indican que el último cambio de cobertura vegetal se dio hace menos de 5 años.  
 c.  Vecinos indican que el último cambio en la cobertura vegetal se dio hace más de 5 años.
9. **Estacionalidad del follaje:**  
 a.  Bosque pierde las hojas en verano (observado o a través de información de residentes locales).  
 b.  Bosque no pierde su follaje en verano.
10. **Especie(s) forestal(es) plantada(s):**  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_
11. **Edad aparente de la Plantación:**  
 a.  Menor a 5 años  
 b.  5 años o más.
12. **Estado sanitario aparente de la plantación**  
 a.  Sana.  
 b.  Enferma.
13. **Porcentaje de Palmas en el parche.**  
 a.  0 -25%  
 b.  26 – 50 %  
 c.  51 – 75%  
 d.  > 75%
14. **Porcentaje de manglar en el parche.**  
 a.  0 -25%  
 b.  26 – 50 %





- c.  51 – 75%
- d.  > 75%

**15. Categoría agroforestal.**

- a.  En bloques
- b.  Cortina rompevientos.
- c.  Otro \_\_\_\_\_

**16. Cultivo agrícola asociado a la especie forestal.**

- a.  Cacao
- b.  Café
- c.  Otro \_\_\_\_\_

**17. Cuenta de árboles en un radio de 100m del punto**

**18. Estado de uso del potrero arbolado:**

- a.  Abandonado
- b.  Ganadería
- c.  Otro: \_\_\_\_\_

**19. Basado en las observaciones anteriores el punto se clasifica como:**

- a.  Bosque maduro
- b.  Bosque decíduo
- c.  Bosque secundario
- d.  Bosque de palmas
- e.  Manglar
- f.  Plantación Forestal
- g.  Potrero Arbolado
- h.  No bosque



### Anexo 3. Metodología de clasificación de imágenes RapidEye<sup>1</sup>

La metodología para realizar la clasificación de las imágenes RapidEye incluye los siguientes pasos:

#### Para hacer una clasificación no supervisada de la imagen

1. Utilice alguno de los programas disponibles: ArcGis o ERDAS. Se puede hacer uso de las siguientes opciones:
  - A partir de una exploración rápida de la imagen, escoja de 25 a 30 clases. Use 20 a 30 interacciones.
  - Si tiene opciones de máxima desviación estándar escoja una desviación estándar. Si tiene otras opciones en el programa, escoja opciones para que la clasificación sea lo más exacta posible.
2. Exporte la clasificación resultante a un formato .img, u otro que sea legible y analizable con los comandos de *Spatial Analyst* en el Programa ArcView o ArcGis. Guarde la imagen en una carpeta de trabajo, con el nombre de la imagen bajo análisis.
3. Ejecute la operación de *Zonal Statistics* disponible en la extensión de *Spatial Analyst*. Utilice como unidad de referencia para el *Zonal Statistics* los resultados de la segmentación realizada por el PRIAS y como imagen de análisis, la producida en el paso 1. El estadístico a solicitar es *Majority*; opcionalmente, se puede incluir *Variety*.
4. Proceda a convertir la imagen resultante del paso anterior a formato vector. Utilice como valor para la conversión la variable “*value*”; NO utilice “*simplify*”. Utilice para eso cualquiera de los programas, aunque es preferible que use los programas de ArcGis, ArcView u otro que le permita editar la capa vectorial resultante.
5. Agregue tres variables a la tabla de atributos de la capa vectorial creada anteriormente, de manera que le permita determinar, para cada polígono, la clase y subclase de cobertura; asigne un código numérico a las clases de cobertura.
6. Proceda a especificar a qué tipo de cobertura corresponde cada *gridcode* asignado a cada polígono del segmentador; para ello, use la variable subclases. Utilice la imagen que se está clasificando en falso color (532-RGB) y las ayudas: orthofotos 2005, puntos de campo, la capa de PSA-reforestación Fonafifo y la de CO\_SINAC; cuando sea posible, use Google Earth.
7. Una vez identificados los 20 a 30 tipos de cobertura a nivel de subclases con las diferentes variaciones y densidades, asigne los tipos de cobertura a nivel de clase de cobertura y código de clase (ver Cuadro 8. Agrupamiento de las categorías a identificar en la cartografía del IFN-Costa Rica, pag. 29).

<sup>1</sup> Tomado de Ortiz (2013).



### Control de calidad del analista

La validación o control de calidad externa se hizo contra los porcentajes de exactitud presentados en el Cuadro 8. Antes de la validación externa, el analista SIG aplicó un control interno por medio del siguiente procedimiento:

- La imagen preclasificada se sobrepone a un mosaico de ortofotos 1:5000 (proyecto BID-Catastro) y al mosaico de imágenes RapidEye.
- Cada una de las clases (una a la vez) se transparenta para observar qué tipo de cobertura está debajo de cada uno de los polígonos.
- Primero se colocan las fotos aéreas del 2005; si se notan divergencias, se comprueba si la diferencia se debe a un cambio de cobertura en el 2012. Para esto, se usa la imagen clasificada en falso color (532-RGB).
- A continuación se toma una muestra de puntos distribuidos sistemáticamente sobre la imagen clasificada (al menos 100) y se procede a verificar si la clasificación es la correcta para cada punto.
- Como referencia, se utilizan los valores de exactitud esperados (Cuadro 12. Matriz de error para la validación de las clases obtenidas en la cartografía del IFN-Costa Rica, pag. 34).
- Si no se cumple con los estándares del Cuadro 12, se revisa la clasificación para corregir las clases mal clasificadas. Se repite nuevamente el procedimiento de control de calidad usando una muestra de puntos diferente.



