

# REVISTA FORESTAL DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
Av. La Molina s/n, La Molina Lima - Perú

VOL. XXX

2007

ISSN 0556-6592

## COMITÉ DIRECTIVO

**DIRECTOR:** Milo Bozovich Granados, *DECANO*  
Gilberto Domínguez Torrejón  
Héctor Enrique Gonzales Mora

## COMITÉ EDITOR

Karin Begazo Curie  
Gilberto Domínguez Torrejón  
Héctor Enrique Gonzales Mora  
Carlos Vargas Salas

## COMITÉ CIENTÍFICO

Víctor Barrena Arroyo  
Karin Begazo Curie  
Violeta Colán Colán  
Jorge Chávez Salas  
Carlos Chuquicaja Segura  
Gilberto Domínguez Torrejón  
Héctor Enrique Gonzales Mora  
Carlos Llerena Pinto  
César Sandobal Meléndez  
Carlos Vargas Salas

La Revista Forestal del Perú es una publicación seriada sin fines de lucro cuyo propósito es difundir la investigación en los campos del conocimiento que abarcan las ciencias forestales y complementarias. La Revista Forestal del Perú (RFP) es editada y publicada por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina; es el órgano oficial de publicación de los artículos científicos de sus docentes.

La RFP, cuyo domicilio legal es la Universidad Nacional Agraria La Molina, acepta colaboraciones de artículos científicos, notas técnicas y temas especiales, que podrán figurar en alguno de los dos números que se emite anualmente. Los trabajos publicados son de entera responsabilidad de sus autores.

PORTADA: Mapa satelital que muestra área de selva central -cuenca del río Pachitea- que abarca el estudio sobre captura de carbono publicado en este número. Igualmente, se visualiza imágenes de los factores geográficos considerados.

# REVISTA FORESTAL DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES  
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

VOL. XXX

2007

Nº 1 - 2

## Contenido

Ensayo de determinación de las mejores procedencias de <i>Calycophyllum spruceanum</i> Benth, en relación al incremento volumétrico, en la cuenca del Aguaytía, Ucayali, Perú Julio Ugarte-Guerra, Gilberto Domínguez, Dora Samaniego y Zoila Vela	5
Determinación preliminar del turno silvicultural y financiero de cuatro especies utilizadas para reforestación en Satipo, Perú Adan Fernández, Percy Zevallos, Carlos Chuquicaja, Germán Pérez	17
Consumo de carne de cinco especies de mamíferos silvestres en la provincia de Leoncio Prado, Huánuco, Perú Jorge Arce y Zoila Cruz	43
Influencia de la densidad de la madera en la calidad de tableros de partículas homogéneas Tatiana Santillán y Julio César Canchucaja	61
Evaluación del potencial del ecoturismo en la Zona Reservada de Batán Grande, Lambayeque, Perú Jorge Chávez Salas	80
Análisis de la restauración forestal del carbono en el bosque húmedo tropical de selva central del Perú Patrick Gonzalez, Benjamín Kroll y Carlos R. Vargas	101
Influencia de tres variables en la obtención y propiedades físico-químicas de la oleorresina del <i>pinus tecunumanii</i> María Luisa Espinoza, Graciela Egoávil y Héctor Gonzáles	152

# Análisis de la restauración forestal del carbono en el bosque húmedo tropical de selva central del Perú

Patrick Gonzalez<sup>1</sup>, Benjamín Kroll S.<sup>2</sup>, Carlos R. Vargas S.<sup>3</sup>

## Resumen

El proceso de transformación del bosque tropical en tierras agropecuarias ha reducido la superficie boscosa y la provisión de servicios del ecosistema, incluyendo la protección de cuencas, conservación de biodiversidad y la fijación del carbono atmosférico. La conservación de bosques y la reforestación pueden restaurar tales servicios. En este trabajo se ha determinado patrones de especies forestales, se ha cuantificado las tasas de deforestación y reforestación, y se ha proyectado al futuro los valores referenciales de las emisiones y la remoción de carbono en el bosque húmedo tropical amazónico de la Selva Central del Perú. La investigación comprendió unos 4800 km<sup>2</sup> del área de amortiguamiento que circunda las siguientes tres áreas naturales protegidas: *Parque Nacional Yanachaga-Chemillén*, el *Bosque de Protección San Matías-San Carlos*, y la *Reserva Comunal Yanasha*. En esta superficie se localiza un proyecto que, en el período 2006-2035, pretende realizar dos objetivos: conservar 4000 ha de bosque del *Área de Conservación Municipal de Chontabamba*, cuya extensión prevista es 7000 ha, y reforestar un total de 7000 ha de tierras utilizadas por la agricultura, 5600 ha de ellas bajo la modalidad de regeneración natural, y 1400 ha mediante plantaciones de especies nativas, en fajas de enriquecimiento.

El inventario forestal se realizó en siete sitios de bosques primarios que suman 22,6 ha y 17 sitios de bosques secundarios que se extienden sobre 16,5 ha, contabilizando 17 073 árboles (diámetro a la altura del pecho (Dap)  $\geq$  10 cm). Los 24 sitios contienen árboles de 512 especies, 267 géneros y 69 familias. No se pudo identificar la familia botánica del 7%, ni la especie del 21% de los árboles. La riqueza en especies es 346 en el bosque primario y 257 en el secundario, ocurriendo 91 en ambas. En el bosque primario, 90% de la biomasa sobre la superficie del suelo está contenido en las especies tardías. En el bosque secundario, el 66% de la bioma-

<sup>1</sup> The Nature Conservancy, 4245 North Fairfax Drive, Arlington, VA 22203-1606 USA

<sup>2</sup> Fundación Peruana para la Conservación de la Naturaleza (ProNaturaleza), Oxapampa, Perú

<sup>3</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

sa superficial lo contienen las especies sucesionales. La densidad de árboles es 366 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en el bosque primario y 533 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en el secundario; sin embargo, el diámetro promedio de los árboles es  $24 \pm 15$  cm en el bosque primario y  $17 \pm 8$  cm en el bosque secundario. Utilizando ecuaciones de biomasa de bosques amazónicos y densidades de madera de 117 especies, se ha determinado que la biomasa superficial es  $240 \pm 30$  t  $\text{ha}^{-1}$  en los sitios de bosque primario y  $90 \pm 10$  t  $\text{ha}^{-1}$  en los sitios de bosque secundario. El carbono superficial del bosque primario presenta una densidad de  $120 \pm 15$  t  $\text{ha}^{-1}$ , siendo ésta de  $40 \pm 5$  t  $\text{ha}^{-1}$  en el bosque secundario. Los rodales boscosos en los sitios de bosque secundario varían en edad entre 10 y 42 años. El incremento en biomasa (t  $\text{ha}^{-1}$ ) en función del tiempo (años) sigue la relación  $\text{biomasa} = 4,09 - 0,017 \text{ edad}^2$  ( $p < 0,001$ ). Biomasa sobre la superficie y riqueza en especies están positivamente correlacionados ( $r^2 = 0,59$ ,  $p < 0,001$ ).

El análisis de una imagen Landsat de 1999 demostró que la cobertura de la tierra de los 3700  $\text{km}^2$  de superficie sin nubes era: bosque cerrado 78%, bosque abierto 12%, cobertura de vegetación baja 4%, cobertura de vegetación dispersa 6%. La deforestación ocurrida de 1987 a 1999 afectó 200  $\text{km}^2$  de bosques, con una tasa de 0,05  $\text{año}^{-1}$ . Del total de áreas de bosques cerrados existentes en 1987, únicamente 89% permaneció hasta 1999. Consecuentemente, la transformación de bosques cerrados en bosques abiertos en ese lapso ocurrió a una tasa que duplica la tasa neta de deforestación. Las tres áreas protegidas experimentaron una deforestación despreciable o una ligera reforestación. Con base en la cobertura de bosques de 1987, 26 000 ha son elegibles para el canje de carbono bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, establecido por el Protocolo de Kyoto para el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. El análisis de componentes principales demostró que *distancia a tierras sin bosque* es el factor que mejor explica el patrón de deforestación observado, mientras que *distancia al bosque* explica mejor los patrones de reforestación observados, teniendo ambos factores la mayor significación de un total de siete factores evaluados, que completan: *elevación, distancia a los ríos, distancia a carreteras, pendiente, y distancia a centros poblados con más de 400 habitantes*.

El carbono sobre la superficie contenido por la vegetación viva del área del proyecto decreció de  $35 \pm 4 \times 10^6$  t en 1987 a  $34 \pm 4 \times 10^6$  t en 1999. La tendencia proyectada al futuro señala que este valor descendería a  $33 \pm 4 \times 10^6$  t en 2006, a  $32 \pm 4 \times 10^6$  t en 2011, y a  $29 \pm 3 \times 10^6$  t en 2035. La deforestación neta proyectada del área de investigación totalizaría  $13\,000 \pm 3\,000$  ha en el período 1999-2011, representando una tasa de  $0,003 \pm 0,0007$   $\text{año}^{-1}$ , que se traduce en  $33\,000 \pm 7\,000$  ha para el período 2006-2035. La extensión de 7000 ha propuesta para la conservación de bosques equivale, en forma gruesa, a evitar la deforestación en una extensión de 100 ha (mín. 70 ha, máx. 150 ha) en el período 2006-2035, evitando emisiones de carbono de 10 000 t (mín. 6 000 t, máx. 18 000 t). La reforestación proyectada para el área investigada totalizaría  $8\,500 \pm 1\,500$  ha en el período 1999-2011, a una tasa

de  $0,0012 \text{ año}^{-1}$  (mín.  $0,010 \text{ año}^{-1}$ , máx.  $0,014 \text{ año}^{-1}$ ), y totalizaría  $24\,000 \pm 4000 \text{ ha}$  en el período 2006-2035. La reforestación propuesta para las  $7000 \text{ ha}$  referenciales totalizaría  $2600 \pm 400 \text{ ha}$  en el período 2006-2035, representando un valor referencial de remoción de  $73\,000 \text{ t}$  carbono atmosférico de (mín.  $30\,000 \text{ t}$ , máx.  $120\,000 \text{ t}$ ). El proyecto de reforestación propuesto podría extraer de la atmósfera  $230\,000 \text{ t}$  de carbono (mín.  $140\,000 \text{ t}$ , máx.  $310\,000 \text{ t}$ ) por encima del valor referencial de remoción en el período 2006-2035.

A través de la investigación realizada se ha desarrollado un método de análisis que permite cuantificar el éxito de los proyectos de conservación y restauración de bosques de dimensiones biológicamente significativas con respecto a la restauración del balance del carbono.

## Summary

Conversion of tropical forest to agricultural land and pasture has reduced forest extent and the provision of ecosystem services, including watershed protection, biodiversity conservation, and carbon sequestration. Forest conservation and reforestation can restore those ecosystem services. We have assessed forest species patterns, quantified deforestation and reforestation rates, and projected future baseline carbon emissions and removal in Amazon tropical rainforest at La Selva Central, Peru. The research area is a  $4800 \text{ km}^2$  buffer zone around the *Parque Nacional Yanachaga-Chemillén*, *Bosque de Protección San Matías-San Carlos*, and the *Reserva Comunal Yanasha*. A planned project for the period 2006-2035 would conserve  $4000 \text{ ha}$  of forest in a proposed  $7000 \text{ ha}$  *Área de Conservación Municipal de Chontabamba* and establish  $5600 \text{ ha}$  of natural regeneration and  $1400 \text{ ha}$  of native species plantations, laid out in *fajas de enriquecimiento* (contour plantings), to reforest  $7000 \text{ ha}$  of agricultural land.

Forest inventories of seven sites covering  $22,6 \text{ ha}$  in primary forest and 17 sites covering  $16,5 \text{ ha}$  in secondary forest measured  $17\,073$  trees of diameter  $\geq 10 \text{ cm}$ . The 24 sites host trees of 512 species, 267 genera, and 69 families. We could not identify the family of 7% of the trees or the scientific species of 21% of the trees. Species richness is 346 in primary forest and 257 in the secondary forest. In primary forest, 90% of aboveground biomass resides in old-growth species. Conversely, in secondary forest, 66% of aboveground biomass rests in successional species. The density of trees of diameter  $\geq 10 \text{ cm}$  is  $366 \text{ trees ha}^{-1}$  in primary forest and  $533 \text{ trees ha}^{-1}$  in secondary forest, although the average diameter is  $24 \pm 15 \text{ cm}$  in primary forest and  $17 \pm 8 \text{ cm}$  in secondary forest. Using Amazon forest biomass equations and wood densities for 117 species, aboveground biomass is  $240 \pm 30 \text{ t ha}^{-1}$  in the primary sites and  $90 \pm 10 \text{ t ha}^{-1}$  in the secondary sites. Aboveground carbon density is  $120 \pm 15 \text{ t ha}^{-1}$  in primary forest and  $40 \pm 5 \text{ t ha}^{-1}$  in secondary forest. Forest stands in the secondary forest sites range in age from 10 to 42 y. Growth in biomass ( $\text{t ha}^{-1}$ ) as a function of time (y) follows the

relation:  $biomass = 4,09 - 0,017 age^2$  ( $p < 0,001$ ). Aboveground biomass and forest species richness are positively correlated ( $r^2 = 0,59$ ,  $p < 0,001$ ). Analyses of Landsat data show that the land cover of the 3700 km<sup>2</sup> of non-cloud areas in 1999 was: closed forest 78%; open forest 12%, low vegetation cover 4%, sparse vegetation cover 6%. Deforestation from 1987 to 1999 claimed a net 200 km<sup>2</sup> of forest, proceeding at a rate of 0,05 y<sup>-1</sup>. Of those areas of closed forest in 1987, only 89% remained closed forest in 1999. Consequently, closed forests experienced disruption in the time period at double the rate of net deforestation. The three protected areas experienced negligible deforestation or slight reforestation. Based on 1987 forest cover, 26 000 ha are eligible for forest carbon trading under the Clean Development Mechanism, established by the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Principal components analysis showed that distance to non-forest was the factor that best explained observed patterns of deforestation while distance to forest best explained observed patterns of reforestation, more significant than elevation, distance to rivers, distance to roads, slope, and distance to towns of population > 400. Aboveground carbon in live vegetation in the project area decreased from 35 million ±4 million t in 1987 to 34 million ±4 million t in 1999. Projected aboveground carbon in live vegetation would fall to 33 million ±4 million t in 2006, 32 million ±4 million t in 2011, and 29 million ±3 million t in 2035. Projected net deforestation in the research area would total 13 000 ±3000 ha in the period 1999-2011, proceeding at a rate of 0,003 ±0,0007 y<sup>-1</sup>, and would total 33 000 ±7000 ha in the period 2006-2035. The proposed 7000 ha of forest conservation could prevent gross baseline deforestation of 100 ha (min. 70 ha, max. 150 ha) in the period 2006-2035, averting baseline carbon emissions of 10 000 t (min. 6 000 t, max. 18 000 t). Projected gross reforestation in the research area would total 8500 ±1500 ha in the period 1999-2011, proceeding at a rate of 0,0012 y<sup>-1</sup> (min. 0,01 y<sup>-1</sup>, max. 0,014 y<sup>-1</sup>), and would total 24 000 ±4000 ha in the period 2006-2035. Gross baseline reforestation for the proposed 7000 ha of reforestation would total 2600 ±400 ha in the period 2006-2035, representing a baseline removal from the atmosphere of 73 000 t carbon (min. 30 000 t, max. 120 000 t). The proposed reforestation project could sequester 230 000 t carbon (min. 140 000 t, max. 310 000 t) above baseline removal in the period 2006-2035. Through this applied research, we have developed a forest restoration carbon analysis method that quantifies measures of success for forest conservation and projects the future carbon benefit of the restoration of biologically significant forests.

## Introducción

El calentamiento global es uno de los problemas ambientales de mayor gravedad actualmente, y existe hoy una conciencia creciente entre los países sobre la necesidad de enfrentarlo con distintas estrategias. Entre los servicios ambientales que brindan los bosques se halla la captura del carbono atmosférico durante la etapa de crecimiento de los árboles y la incorporación del mismo dentro de su

estructura, donde permanece hasta que se descompone. Otros servicios ambientales muy importantes son la protección de las cuencas y la preservación de la biodiversidad.

La comunidad internacional ha implementado diversos mecanismos para fomentar el establecimiento de plantaciones en áreas deforestadas. Los países en los que el incremento de la captura de carbono por ampliación de áreas boscosas es mayor que la liberación de carbono por quema de combustibles fósiles y/o quema de bosques, pueden obtener bonos favorables para su desarrollo socio-económico.

Aparte del establecimiento de nuevas masas boscosas, existen otras dos formas de enfrentar el calentamiento global. Una de ellas consiste en impedir la quema de bosques mediante proyectos de conservación que evitan la deforestación de tumba y quema llevada a cabo regularmente por los pobladores de las áreas rurales con fines agropecuarios. La otra consiste en lograr masas boscosa densas a partir de bosques ralos, ya sea protegiendo los procesos naturales de reforestación o mediante plantaciones en fajas de enriquecimiento.

En el contexto de un proyecto de conservación que evite la deforestación, la cantidad de carbono capturado es aquella contenida por el bosque del área del proyecto, que sería cortado durante el tiempo que dura éste. Esta cantidad constituye la línea base de emisiones de carbono a la atmósfera. En un proyecto de reforestación, la cantidad de carbono capturado es igual a la diferencia entre la cantidad de carbono incorporado al nuevo bosque establecido en el área del proyecto y la cantidad de carbono que contendría tal área si el proyecto no se hubiera realizado. Esta cantidad constituye la línea base de remoción de carbono de la atmósfera.

La cuantificación de la captura potencial de carbono como resultado de actividades de conservación o reforestación requiere proyecciones de la línea base futura de emisiones de carbono a la atmósfera y de la línea base futura de remoción de carbono de la atmósfera.

La investigación aplicada que se presenta fue realizada en el bosque húmedo tropical de la Selva Central del Perú dando soporte a un proyecto propuesto para preservar más efectivamente la diversidad biológica y potenciar la captura de carbono a través de la conservación de 7000 ha de bosques y la reforestación de otras 7000 ha de tierras utilizadas por la agricultura. La investigación tiene los siguientes objetivos:

1. Evaluar patrones de distribución de especies y de tamaños de árboles.
2. Estimar tasas de deforestación y reforestación del pasado y hacer su proyección al futuro.
3. Proyectar futuras líneas base de emisión de carbono a la atmósfera por causa de la deforestación, y de remoción de carbono de la atmósfera por la reforestación.

## Revisión de literatura

### El calentamiento global y la conservación de bosques

Las emisiones de carbono antropogénicas han crecido hasta alcanzar 8 mil millones de toneladas por año, ingresando en la atmósfera al doble de la velocidad con que la vegetación y los océanos pueden capturar el carbono en forma natural (IPCC 2001a). El incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha elevado el promedio global de temperatura media de la superficie terrestre en  $0,6 \pm 0,2$  °C durante el Siglo XX y podría hacer que ésta se incremente 1,4 - 5,8 °C en el Siglo XXI (IPCC 2001a). El cambio climático causará impactos globales significativos, incluyendo extensos desplazamientos de los biomas vegetales, cambios en los regímenes de quemadas de origen natural, elevación del nivel del mar, incremento de intensidad en las tormentas, cambios en los sistemas agrícolas, diseminación de ciertas enfermedades humanas, y alteración de las condiciones económicas (IPCC 2001b, USGCRP 2001).

Las plantas de generación eléctrica basadas en combustible fósil, los vehículos, y las fábricas de cemento producen 65 - 90% de las emisiones globales de carbono mientras que la deforestación y otros cambios de la cubierta vegetal contribuyen con la fracción restante (IPCC 2001a). Al mismo tiempo, la deforestación reduce la provisión de servicios del ecosistema, incluyendo la protección de las cuencas, la conservación de la biodiversidad, y la captura de carbono. La deforestación tropical representó  $49\,000 \pm 13\,000$  km<sup>2</sup> año<sup>-1</sup> en el período 1990-1997 (Achard *et al.* 2002).

La conservación de bosques y la reforestación pueden restaurar los servicios del ecosistema y ayudan a reducir el cambio climático a través de la captura de carbono. Por *conservación de bosques* entendemos el cese del aclareo de éstos. *Reforestación* es el establecimiento de bosques en áreas no boscosas ya sea a través de plantación o de regeneración natural. *Restauración de bosques* es la renovación del funcionamiento efectivo del ecosistema de un bosque a través de conservación o de reforestación.

La máxima cantidad de carbono que la conservación de bosques podría impedir sea liberada a la atmósfera equivale a 80-170% de las emisiones globales post-industriales de carbono (IPCC 2001a). La máxima cantidad de carbono que la reforestación podría capturar representa 15-30% de las emisiones globales post-industriales de carbono (IPCC 2001a).

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), establecido por el Protocolo de Kyoto dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; el Programa de Reporte Voluntario de Gases de Efecto Invernadero, administrado por el Departamento de Energía de EEUU; y otras iniciativas políticas, ofrecen programas que dan cabida a proyectos de conservación de bosques y de refores-

tación, los cuales pueden vender derechos por carbono del bosque a instalaciones de energía y otras compañías privadas que necesiten realizar compensaciones por emisiones de gases de efecto invernadero.

## Los ecosistemas de Selva Central

La elevación altitudinal diferencia la flora de Selva Central en cuatro principales tipos de vegetación: *Selva Baja* (bosque lluvioso amazónico de tierras bajas), *Yungas* (bosque lluvioso montano de bajas altitudes), *Ceja de Montaña* (bosque nuboso de altitudes medias), y *Puna* (praderas andinas de gran altitud) (ONERN 1985, Brako y Zarucchi 1993, Gentry 1993, Richards 1996). La topografía y ecología particulares del área han condicionado un alto nivel de endemismo, con hasta 30% de especies nativas sólo para el Perú (Brako y Zarucchi 1993). La Selva Central alberga especies vegetales endémicas a una densidad de 13 por 1000 km<sup>2</sup> (van de Werff y Consiglio, 2004). El rango altitudinal restringido de muchas de las especies de los bosques vuelve a éstas particularmente susceptibles al cambio climático (IPCC 2001b, Bush *et al.*, 2004; Chambers y Silver, 2004).

La *Selva Baja* (bosque lluvioso amazónico de tierras bajas) es un bosque tropical perenne de dosel cerrado que ocurre en los valles anchos y planos de Selva Central. Estos bosques encierran más de 1000 especies de plantas, incluyendo más de 300 especies de árboles y arbustos (Gentry, 1993). Las familias vegetales dominantes son *Fabaceae*, *Moraceae* y *Rubiaceae*, con muchas especies representando también a las familias *Annonaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, y *Melastomataceae* (Gentry 1993). La *Selva Baja* constituye el hábitat para gran número de mariposas, aves y mamíferos.

Las *Yungas* (bosque montano lluvioso de baja altitud) es un bosque tropical perenne de dosel cerrado que ocurre en colinas y valles del flanco oriental de la cordillera de los Andes, dentro de un rango aproximado de elevación de 500-2400 m. Estos bosques lluviosos montanos exhiben una composición florística y diversidad similares a los bosques lluviosos de tierras bajas. La familia dominante es la *Fabaceae*, seguida por *Moraceae* y luego por *Annonaceae*, *Arecaceae*, *Burseraceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae*, *Nyctaginaceae*, *Melastomataceae*, *Meliaceae* y *Rubiaceae* (Gentry 1993). Muchas epifitas y orquídeas terrestres florecen en las Yungas.

La *Ceja de Montaña* (bosque nuboso de altitud media) es un bosque tropical a menudo oculto entre las nubes que ascienden desde la cuenca amazónica hasta los Andes. Estos bosques ocurren en un rango aproximado de elevación de 1500-3900 m (Gentry, 1993; Richards, 1996). Las familias vegetales dominantes son *Araliaceae*, *Ericaceae*, *Lauraceae*, *Melastomataceae*, *Myrsinaceae*, *Myrtaceae*, *Rubiaceae*, y *Solanaceae*, con muchas especies dotadas de hojas esclerófilas (Gentry, 1993; Richards, 1996). Las orquídeas se hacen más prevalecientes y diversas en estos bosques montano nubosos (Gentry, 1993).

La *Puna* (pradera alpina de gran altitud) es un pastizal perenne que ocurre hasta las crestas de las montañas andinas, con un rango aproximado de elevación de 3500-4500 m (Gentry, 1993; Richards, 1996). Esta pradera es taxonómica y ecológicamente distinta de los tipos de vegetación boscosa (Gentry, 1993).

Tres son los tipos de suelos que predominan en el área (McClain y Cossio, 2003): *entisoles* en los depósitos aluviales modernos, *inceptisols* en los depósitos aluviales más antiguos, y los restos gruesos *ultisols* en las faldas de las colinas. La acidez generalmente se incrementa, conforme decrece la fertilidad, con el incremento de la elevación altitudinal.

## Análisis de la restauración del carbono por el bosque

Los inventarios forestales proporcionan información detallada sobre la composición de las especies; diámetro, área basal y altura de los árboles; densidad, contenido de biomasa, y estado sucesional de los rodales. Los datos de inventario forestal proporcionan directamente las siguientes medidas de diversidad: riqueza de especies; diversidades  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  de especies (Whittaker 1960, 1972); y familias, géneros y especies dominantes.

Las ecuaciones alométricas son funciones empíricas que estiman la biomasa de un árbol como una función de su diámetro y/o la altura del mismo. Los técnicos forestales derivan ecuaciones alométricas apeando árboles, midiendo sus dimensiones físicas, y pesando sus componentes. Diferencias en la arquitectura, forma, y fisonomía entre especies de árboles darán lugar necesariamente al desarrollo de ecuaciones alométricas específicas a un taxón o a un grupo funcional (King, 1996; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Ketterings *et al.*, 2001; Jenkins *et al.*, 2004).

El estado sucesional indica el estado de desarrollo de un rodal. Los *bosques tardíos* son bosques maduros dominados por grandes árboles de edad avanzada y caracterizados por una densa estructura frecuentemente diferenciada en múltiples niveles de dosel. Las especies tardías son generalmente tolerantes a la sombra. Los *bosques sucesionales* son rodales jóvenes con árboles de estatura menor y con doseles abiertos que pueden dejar pasar la luz del sol hasta al suelo. Las especies sucesionales son generalmente intolerantes a la sombra. Richards (1996), Terborgh *et al.* (1996), Nelson *et al.* (1999), Peña-Claros (2003), Laurance *et al.* (2004) definen el estado sucesional de numerosas especies de árboles de la Amazonia.

Siendo que en el bosque lluvioso amazónico, “bosque primario”, es generalmente un bosque que jamás fue cortado o que fue cortado hace más de 100 años, casi la totalidad de árboles en el bosque primario deberían ser árboles maduros, aunque los disturbios y la mortalidad que ocurren en forma natural abren claros en los que crecen árboles sucesionales en número pequeño. Contrariamente, “bosque secundario” es por lo general un bosque que ha vuelto a crecer después de haber sido cortado, y así la mayoría de los árboles en el bosque sucesional serán sucesionales.

De acuerdo a tales premisas, el porcentaje de la biomasa de un bosque que corresponde a la fracción madura de árboles constituye la medida del éxito de los proyectos de conservación que pueden monitorearse a través de las fases del proceso de planeamiento Conservación por Diseño (Nature Conservancy, 2001).

El *análisis de la restauración del carbono por el bosque* (en inglés “*Forest Restoration Carbon Analysis*” o FRCA), es un método de análisis espacial integrado que utiliza datos del inventario forestal, de la diversidad biológica, y de sensores remotos (Gonzalez *et al.*, 2004). El método determina patrones de especies forestales, cuantifica las tasas de deforestación y reforestación, y proyecta las líneas base futuras de emisiones y de remoción de carbono para un territorio ecológicamente definido.

El FRCA utiliza análisis de componentes principales, una prueba estadística multivariante, para establecer el peso de diferentes factores al explicar la reforestación y deforestación observadas. El método de análisis utiliza también el ajuste estadístico bivariante de observaciones del cambio en el bosque para calcular las probabilidades futuras de deforestación y reforestación para cada píxel de una imagen Landsat. De esta forma, el FRCA extrapola las condiciones potenciales futuras basadas únicamente en observaciones sobre tendencias del pasado.

Una compleja mezcla de numerosos factores ambientales y socio económicos interactúan entre sí para determinar la intensidad y el patrón espacial de la deforestación. Pruebas estadísticas multivariantes analizan este tipo de situación a través de álgebra lineal sobre matrices de parámetros estadísticos de todas las posibles combinaciones de un conjunto de variables independientes. Por ejemplo, el escalamiento multidimensional (en inglés: *multi-dimensional scaling* o MDS) multivariante no-métrico de diez diferentes variables ambientales y socioeconómicas a través de 4 millones de kilómetros cuadrados de la Amazonia legal brasileña evidenció que la deforestación está altamente correlacionada con la distancia a las carreteras principales y con la densidad poblacional rural (Laurance *et al.*, 2002)

El análisis de componentes principales (Pearson, 1901; Hotelling, 1933) ofrece la prueba estadística exacta requerida para determinar el peso de diferentes factores cuantitativos en la explicación de patrones observados de deforestación y reforestación. El análisis de componentes principales determina los factores que proveen la mayor parte de la variabilidad entre un conjunto de datos multivariantes, y revela cualquier agrupamiento de muestras. En términos geométricos, el algoritmo del análisis de componentes principales reduce una proyección de puntos en un espacio multidimensional, que representan  $N$  muestras, en un conjunto de puntos centrado y rotado dentro de  $n$  ejes ortogonales, siendo definido cada eje por una combinación lineal de los valores estandarizados de cada variable.

La detección del cambio comprende el análisis de las diferencias espaciales que muestran dos escenas satelitales adquiridas sobre la misma zona en distintos mo-

mentos (Howarth y Wickware, 1981; Lu *et al.*, 2004). Los científicos han utilizado la serie de satélites Landsat para detectar cambios de la cobertura de la Tierra a partir del lanzamiento del primer satélite por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration, NASA) de los Estados Unidos, el 23 de julio de 1972.

El FRCA, a través de una secuencia de 13 pasos, proporciona estimaciones centrales de las cantidades finales de carbono y calcula las estimaciones altas y bajas de la cantidad de carbono, haciendo el seguimiento de las fuentes principales de error de medición y variabilidad estadística (Phillips *et al.*, 2002; Chave *et al.*, 2004). El FRCA requiere que los usuarios realicen las corridas de cálculo de carbono tres veces.

Los pasos que involucra el método del FRCA son: 1) Definición del área del proyecto; 2) Establecimiento de parcelas permanentes; 3) Análisis de parámetros del bosque y caracterización de rodales; 4) Cálculo de la biomasa; 5) Derivación de funciones de crecimiento; 6) Detección del cambio; 7) Compilación de datos de factores condicionantes; 8) Determinación de importancia de los factores mediante análisis de componentes principales; 9) Determinación de funciones de probabilidad; 10) Cálculo de probabilidades; 11) Proyección de la deforestación y reforestación; 12) Proyección de línea base futura; 13) Estimación de la captura de carbono.

## Materiales y métodos

### Zona del estudio

El área de investigación comprende 4800 km<sup>2</sup> de bosque húmedo tropical y tierras agrícolas entre los 9° 50' 42" y los 10° 50' 26" de latitud sur, y entre los 74° 59' 44" y los 75° 47' 13" de longitud oeste, en la Selva Central de Perú, sector del borde occidental de la Cuenca Amazónica (Figura 1). El área forma una zona de amortiguamiento al oeste de las Áreas Protegidas por el Estado: *Parque Nacional Yanachaga-Chemillen* (establecido en 1986), *Bosque de Protección San Matías-San Carlos* (1987) y la *Reserva Comunal Yanasha* (1988).

En Selva Central se conservan intactos ecosistemas que dan sostenibilidad a especies de plantas y animales únicos en el mundo, suministran agua fresca e hidroelectricidad para las poblaciones locales, retienen altas concentraciones de carbono forestal y brindan bellezas escénicas de paisajes fluviales y montañosos. Desde 1991, la *Fundación para la Conservación de la Naturaleza* (Pronaturaleza), una organización no gubernamental, y *The Nature Conservancy* (TNC) han trabajado conjuntamente con las poblaciones locales para mejorar las condiciones de conservación de la biodiversidad y socio-económicas.

Dentro del área de investigación de 4800 km<sup>2</sup>, las organizaciones mencionadas han desarrollado un plan para conservar 7000 ha de cuencas forestadas y reforestar

7000 ha de tierras agrícolas. El proyecto busca proteger un bloque de 4000 ha de bosque natural intacto en la sección superior de 7000 ha de la cuenca del río *Chotabamba*. El proyecto de reforestación debe establecer fajas de enriquecimiento siguiendo el contorno del terreno en sectores que anteriormente fueron tierras de cultivo o que se mantienen como pastizales. Las fajas en contorno, de 8 m de ancho, estarán constituidas de una combinación de pequeños árboles y renuevos de especies nativas producto de la regeneración natural, que se alternarán con franjas despejadas de 2 m de ancho con una línea central de plantación de árboles de especies nativas. Espaciamientos de 10 m entre líneas de plantación y de 3 m entre árboles, definen una densidad de 333 árboles ha<sup>-1</sup>. La superficie de 7000 ha estaría constituida por parcelas no contiguas identificadas a través de este análisis como elegibles bajo el MDL.

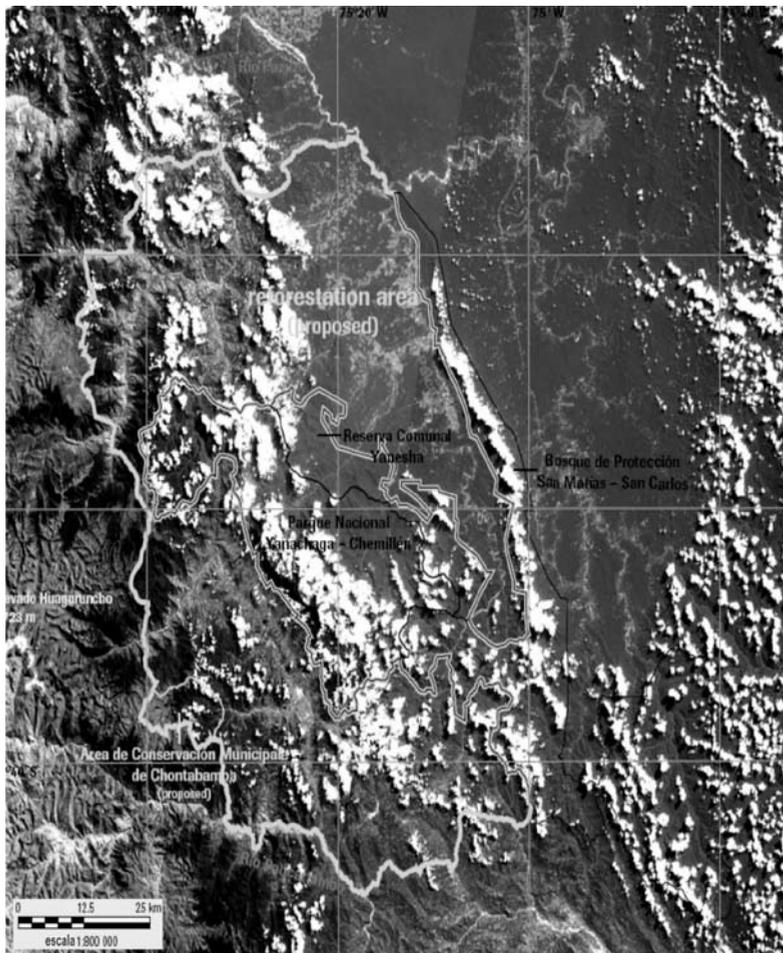
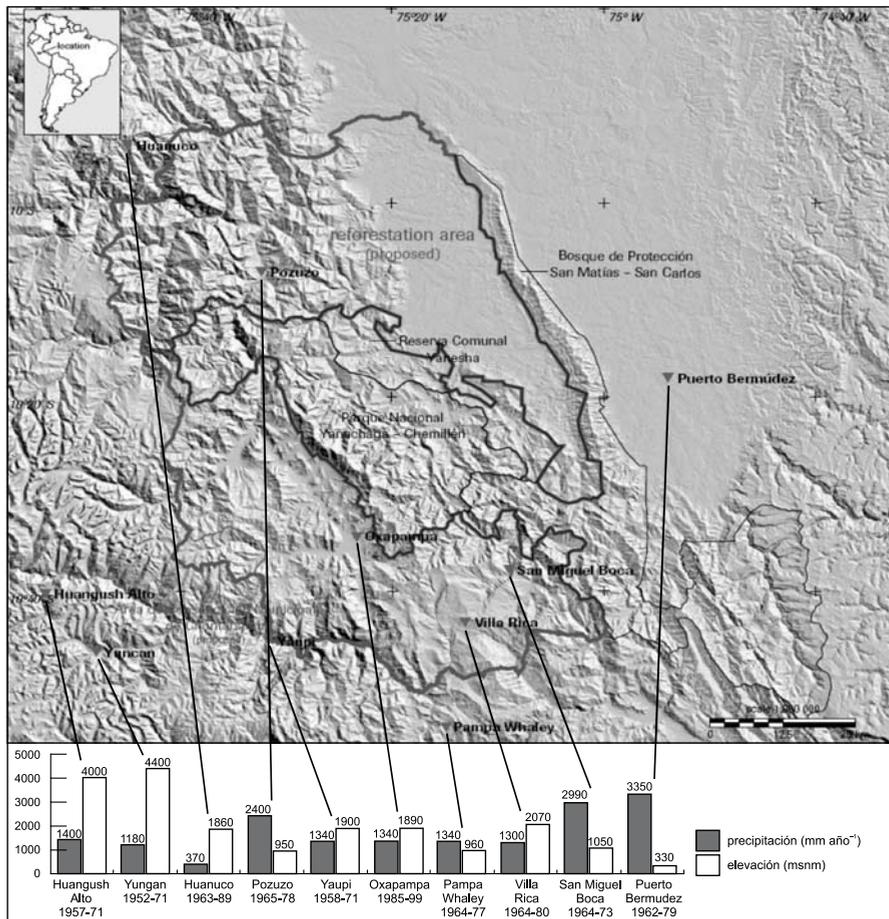


Figura 1. Localización de la zona de estudio

El área de investigación se distribuye a través de las ecorregiones *Suroeste Amazónica*, *Ucayali*, y *Yungas* (Olson *et al.*, 2001). Circunda los valles de los ríos *Chorobamba*, *Palcazú*, *Paucartambo* y *Pozuzo*, ríos que fluyen hacia el Amazonas, y se extiende en áreas montañosas hasta los 4400 m de elevación sobre el flanco oriental de la Cordillera de los Andes. Un clima húmedo y caliente se extiende sobre la mayor parte del área de investigación, con una estación lluviosa de noviembre a abril. Según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, del Departamento de Comercio de los Estados Unidos), la precipitación media anual medida en la región (figura 2) fluctúa entre 3400 mm año<sup>-1</sup> en las tierras bajas (Puerto Bermúdez, 1962-1979) y 370 mm año<sup>-1</sup> en las montañas (Huánuco, 1963-1989). Las temperaturas medias máximas (1960-2000) fluctúan desde 30°C en las partes bajas hasta 22° en las montañas, mientras que las temperaturas medias mínimas (1960-2000) fluctúan desde 21°C en las partes bajas hasta 10°C en las montañas.



**Figura 2.** Relieve y precipitación en la zona de estudio

Administrativamente, la mayor parte del área de investigación se encuentra en los distritos de *Chontabamba*, *Huancabamba*, *Oxapampa*, *Palcazú*, y *Villa Rica* de la provincia de *Oxapampa*, en el departamento de *Pasco*. La población de los seis distritos era 56 000 en 2001 (INEI 2001), aunque parte de esta población vive fuera del área de investigación. El crecimiento poblacional en el período 1990-2001 ocurrió a una tasa de 0,014 año<sup>-1</sup> (INEI 2001). La densidad de la población de los seis distritos fue siete personas km<sup>-2</sup> (INEI 1997, 2001). Tres grupos étnicos principales viven en el área de investigación: a) poblaciones de indígenas yanasha y quechuas, b) descendientes de inmigrantes germanos que arribaron en los siglos XIX y XX, y c) inmigrantes mestizos provenientes de otras partes del Perú.

La gente utiliza el fuego para hacer el aclareo de la tierra antes de sembrar maíz, yuca y café, y para criar ganado, principalmente en la *Selva Baja* y las *Yungas*. El *Instituto Nacional de Recursos Naturales* (INRENA) prohíbe la extracción de recursos en el Parque Nacional, aunque sí permite actividad extractiva de madera en el bosque de protección por parte de empresas. Los yanasha controlan el manejo de los recursos naturales en la reserva comunal y han excluido de forma efectiva la extracción de recursos, aunque la presión económica está cambiando sus prácticas tradicionales de manejo de recursos naturales (Hamlin y Salick, 2003).

## Aplicación del FRCA en Selva Central

A fin de determinar las emisiones y remoción de carbono en la zona de estudio, se aplicó el método de *Análisis de la restauración del carbono por el bosque* o FRCA, a través de la secuencia de 13 pasos que se describe a continuación en forma detallada.

### Paso 1. Definición del área de bosque del proyecto con base en su significación biológica

El objetivo primario de la mayoría de proyectos de restauración de bosques es mejorar la función del ecosistema como conservador de la biodiversidad. De tal manera que, aún cuando la captura de carbono mantiene su importancia, viene a ser un objetivo secundario; entonces, la significación biológica constituye el criterio principal para definir el área del proyecto.

Entre las condiciones geográficas biológicamente significativas se hallan: tipos de vegetación, zonas climáticas, ecorregiones, montañas y otros elementos topográficos conspicuos, cuencas, ríos, y áreas declaradas de manejo de recursos naturales. Estas condiciones generalmente definirán áreas con características ecológicas similares o con regímenes de manejo de la tierra aproximadamente iguales. La relativa homogeneidad de tales áreas facilita el muestreo estadístico y la generalización de resultados. Por otro lado, los límites administrativos u otras formas geométricas arbitrarias, como rectángulos o círculos, generalmente cortarán elementos naturales y generarán áreas de características ambientales conflictivas.

Las tres áreas protegidas en Selva Central presentan las más claras condiciones de significación ecológica para definir el área del proyecto (el área de investigación). Además, el límite entre los bosques de *Yungas* y las praderas de la *Puna* delinea el borde superior para el área del proyecto. Partiendo de tal borde, el área del proyecto se extiende por los sectores boscosos de la *Selva Baja*, las *Yungas*, y la *Ceja de Montaña* ubicados hacia el lado oeste del *Parque Nacional Yanachaga-Chemillén*, *Bosque de Protección San Matías-San Carlos*, y la *Reserva Comunal Yanesha*. Se ha completado la definición del perímetro del área del proyecto sobre la base de límites naturales: praderas de la *Puna* hacia el oeste, los ríos *Pozuzo* y *Huampumayo* hacia el norte, el río *Paucartambo* hacia el sur, y las cadenas de montañas hacia el noroeste y hacia el suroeste. El área así definida abarca fincas agrícolas de particulares y los bosques que conforman la zona de amortiguamiento para las tres áreas protegidas. En ella, la deforestación para el establecimiento de cultivos y pastos así como la extracción de madera y leña comprenden las principales amenazas locales a la salud del ecosistema.

## **Paso 2. Establecimiento de parcelas permanentes de inventario forestal**

Se estableció parcelas de inventario forestal en siete sitios durante el año 2001, abarcando 22,6 ha de bosque primario, y en 17 sitios en el período febrero-marzo 2003, abarcando 16,5 ha de bosque secundario. Se estratificó las parcelas en dos clases de bosque: *primario* y *secundario*. Se buscó con ello facilitar la posterior comprobación, sobre una imagen Landsat, de la extensión y distribución de tales clases de cobertura vegetal en el área del proyecto (paso 6). Parcelas dispersas por toda el área de investigación fueron escogidas tratando de lograr una buena representación de la fisonomía general y la estructura de los tres tipos de vegetación forestal presentes en la zona. Las parcelas de bosque primario se ubican en áreas que no han sido intervenidas. Las parcelas de bosque secundario incluyen terrenos que antes fueron utilizados para el desarrollo de cultivos agrícolas (8) y de pasturas (9), y representan varios estadios de la sucesión secundaria. La muestra no es aleatoria; más bien, fue seleccionada entre las parcelas a cargo de agricultores y ganaderos con disposición favorable a la conservación del bosque.

Se procuró establecer parcelas cuadradas de una hectárea, pero las condiciones locales impidieron que todas las parcelas fueran cuadradas. Cada parcela fue dividida en subparcelas cuadradas de 20 m × 20 m con las esquinas marcadas mediante tubos de PVC. Los árboles con  $Dap \geq 10$  cm, fueron identificados hasta el nivel taxonómico más bajo posible y se midió su *Dap*. También fue medida la altura de *Arecaceae* (palmeras) y *Cythea* spp. (helechos arbóreos). La evaluación de control de la calidad de las mediciones realizadas indicó un error aproximado de medición de  $\pm 1\%$ .

A fin de permitir el monitoreo permanente de las condiciones del ecosistema, en 2005 se estableció acuerdos con los propietarios de los terrenos de todas las par-

celas de bosque primario y de 13 de las parcelas de bosque secundario, para protegerlas. Con este propósito fueron cercadas y se colocó letreros en ellas, volviendo a medirse todos los árboles con  $Dap \geq 10$  cm, marcándolos con plaquitas de aluminio a una altura de 1,4 m.

### **Paso 3. Análisis de biodiversidad, de las medidas de los árboles y caracterización de los rodales forestales**

Los datos de los inventarios forestales se utilizaron para determinar la composición de las especies, los tamaños de los árboles, y las características de los rodales. Igualmente, con ellos se midió la diversidad mediante: riqueza de especies; diversidades  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  de especies; y familias, géneros y especies dominantes. Se determinó las siguientes características de los árboles: diámetro del fuste, área basal, densidad, biomasa, y estado sucesional. Para aquellas especies carentes de información publicada, la evaluación del estado sucesional se ha basado en observaciones propias realizadas en Selva Central durante décadas, y la prevalencia observada en las parcelas de inventario de bosque primario y secundario.

### **Paso 4. Cálculo de la biomasa utilizando ecuaciones locales alométricas de volumen y densidades de madera específicas para las especies.**

Se utilizó seis ecuaciones alométricas desarrolladas en el bosque amazónico lluvioso (Baker *et al.*, 2001<sup>a</sup>; Chambers *et al.*, 2001<sup>a</sup>; Nelson *et al.*, 1999; Saldarriaga *et al.*, 1988) (cuadro 1). No se pudo aplicar un conjunto de ecuaciones alométricas desarrolladas en el Perú (Barrena *et al.*, 1986; Barrena, 1988) debido a que ellas habían sido desarrolladas para la parte comercial del tronco, no para el árbol entero.

En el bosque lluvioso amazónico, la densidad básica de la madera tiene una fuerte influencia en el patrón espacial de la biomasa del bosque (Baker *et al.*, 2004b). En razón de ello, fueron utilizados valores de densidad de madera publicados para 117 especies arbóreas amazónicas (Aróstegui, 1974; Nalvarte *et al.*, 1993; Fearnside, 1997) para calcular en forma precisa la biomasa usando ecuaciones para bosques amazónicos primarios (Chambers *et al.*, 2001<sup>a</sup>; Baker *et al.*, 2004a) y secundarios (Nelson *et al.*, 1999). La variación natural de la densidad de la madera medida en el bosque amazónico lluvioso del Perú fue aproximadamente  $\pm 10\%$  (Aróstegui, 1974).

Mediciones del contenido de carbono en la biomasa de los árboles y arbustos del bosque amazónico lluvioso muestran una fracción de carbono de alrededor de 0,49 (Chambers *et al.*, 2001b). Debido a la falta de datos específicos referidos a la biomasa existente por debajo de la superficie del suelo y al carbono contenido en la madera muerta, en la hojarasca y el suelo orgánico del área de investigación, no se calculó el carbono de esos depósitos.

**Cuadro 1.** Ecuaciones alométricas para el bosque amazónico lluvioso.  
La ecuación 6 fue desarrollada en un bosque caribeño.

Ecuación N°	Tipo de bosque o taxón	Ecuación	Densidad específica de madera de muestra	Fuente
0	bosque amazónico primario de terra firme	$\ln b_{arb} = 0,33 \ln d_{130} + 0,933 (\ln d_{130})^2 - 0,122 (\ln d_{130})^3 - 0,37$	0,67	Baker <i>et al.</i> 2004a, Chambers <i>et al.</i> 2001a
1	bosque amazónico secundario de terra firme	$\ln b_{arb} = -1,9968 + 2,4128 \ln d_{130}$	0,54	Nelson <i>et al.</i> 1999
2	<i>Arecaceae</i>	$\ln b_{arb} = -6,3789 - 0,877 \ln (d_{130}^{-2}) + 2,151 \ln h$		Saldarriaga <i>et al.</i> 1988
3	<i>Bellucia spp</i>	$\ln b_{arb} = -1,8158 + 2,37 \ln d_{130}$		Nelson <i>et al.</i> 1999
4	<i>Cecropia sciadophylla</i>	$\ln b_{arb} = -2,5118 + 2,4257 \ln d_{130}$		Nelson <i>et al.</i> 1999
5	<i>Cyathea spp</i>	$b_{arb} = 3,82 h - 3,62$		Weaver 2000
6	<i>Laetia procera</i>	$\ln b_{arb} = 2,2244 + 2,5105 \ln d_{130}$		Nelson <i>et al.</i> 1999

$b_{arb}$  = biomasa del árbol sobre la superficie del suelo (kg)

$d_{130}$  = diámetro (cm) a 1,3 m de altura

$h$  = altura (m)

La densidad de carbono de un área de bosque es igual a la suma de los contenidos de carbono de los árboles individuales:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 7: } C_{\text{area}} = f_c \times \frac{\sum_{\text{todos arbs}} \left( \frac{\rho_{\text{arb}}}{\rho_{\text{muestra}}} \right) \times b_{\text{arb}}}{A} \times \left( \frac{1 \text{ t}}{10^3 \text{ kg}} \right)$$

$A$  área de bosque (ha)

$b_{arb}$  biomasa de un árbol individual (kg); dato proveniente de ecuaciones 0 - 6

$C_{\text{area}}$  densidad de carbono de un área de bosque ( $\text{t ha}^{-1}$ )

$f_c$  fracción de carbono de la biomasa ( $\text{kg C (kg biomasa)}^{-1}$ )

$\rho_{\text{muestra}}$  densidad específica de la madera de muestra alométrica (kg de biomasa seca al horno ( $\text{kg biomasa seca en campo}^{-1}$ )); el cuadro 1 proporciona los valores de  $\rho_{\text{muestra}}$  para las ecuaciones 0 y 1;  $\rho_{\text{muestra}}/\rho_{\text{arb}} = 1$  para las ecuaciones 2-6

$\rho_{\text{arb}}$  densidad específica de la madera de un árbol (kg de biomasa seca al horno ( $\text{kg biomasa seca en campo}^{-1}$ ))

## Paso 5. Derivación de funciones de crecimiento

A fin de proyectar cambios futuros en el almacenamiento de carbono, fue desarrollada una función de crecimiento en el tiempo. Para ello se usó la biomasa calculada de las parcelas de inventario en los sitios de bosque secundario que de acuerdo a la estimación de los finqueros habían crecido durante 10-42 años, desde que cesara el mantenimiento de los cultivos o el pastoreo. También se utilizó la biomasa calculada de los sitios de bosque primario, asumiendo que ellos tenían al menos 100 años de existencia (Richards, 1996).

## Paso 6. Detección del cambio utilizando inventarios forestales e imágenes Landsat

El área de investigación se halla en la intersección de tres escenas Landsat. Se utilizaron dos juegos de escenas Landsat para generar imágenes diferenciales de cambio del bosque. La fecha óptima para el inicio del período de análisis de cambio del bosque era 31 de diciembre de 1989, debido a que, para impedir deforestación oportunista, el MDL requiere que las áreas elegibles no contengan bosque desde esa fecha hasta el presente (2005). Se realizó una búsqueda en el archivo de USGS con el propósito de identificar un juego de escenas de 1989 y otro lo más actual posible. Las extensiones de bosques nubosos en el área de investigación, sin embargo, crearon condiciones de nubosidad para la mayoría de pasadas del satélite. Los dos años más próximos a 1989 y el presente con una cobertura de nubes menor al 20% sobre el área de investigación fueron 1987 y 1999. Las siguientes escenas Landsat fueron utilizadas para el año 1987: 5006067008715310 (6/06/87), 5007067008724010 (28/08/87), y 5006068008516310 (12/06/85, ~4% del área del proyecto). Para el año 1999 las escenas utilizadas fueron: L71006067\_06719990729 (29/07/99), L71007067\_06719990805 (5/08/99), L71006068\_06819990729 (29/07/99).

El paquete de software empleado para el análisis de sensores remotos fue ENVI/IDL 3.4, mientras que para el análisis vectorial se empleó ArcGis.

Se creó un mosaico con las tres escenas de 1999 para después emplearlo como imagen base para sobreponer, de forma que coincidiera geográficamente cada una de las escenas de 1987, empleando el método de triangulación de Delauney con aproximadamente 200 puntos de control y la selección del vecino más próximo. Tras haber juntado en un mosaico las escenas de 1987, se recortaron ambos mosaicos rectangularmente, a imágenes de 5099×4671 píxeles, correspondiendo sus bordes a las coordenadas 9° 39' 34" y 10° 55' 39" de latitud Sur y 75°56'22" y 74° 32' 31" de longitud oeste.

Las parcelas permanentes fueron estratificadas en dos clases, *bosque primario* y *bosque secundario* (paso 2), de forma que correspondieran con las clases que los datos del satélite Landsat permiten detectar en el área de investigación. Ensayos

previos demostraron que las firmas espectrales de los tipos de vegetación del área de investigación son tan similares entre sí que la clasificación supervisada podía distinguir únicamente entre las siguientes clases de tierra:

1. nubes, sombra, agua
2. vegetación rala – terreno desnudo
3. vegetación baja – campos agrícolas y pastizales
4. bosque abierto – bosque con cobertura del dosel de 10-40% (FAO 2001)
5. bosque cerrado – bosque con cobertura del dosel >40% (FAO 2001)

El bosque primario generalmente se visualiza en las imágenes Landsat como bosque cerrado. El bosque secundario generalmente aparece en las imágenes Landsat como bosque abierto. Usando las 24 parcelas de inventario forestal como sitios de entrenamiento (“verdad de campo”), fue realizada una clasificación supervisada con el algoritmo de mínima distancia para asignar cada píxel de las imágenes 1987 y 1989 a una de las cinco clases de tierra.

Como un paso intermedio para generar una imagen diferencial, se condensaron las clases no-bosque y las clases bosque en tres clases:

0. *nubes, sombra, agua* en cualquiera de los mosaicos: 1987 o 1999
1. *no-bosque* (vegetación baja y dispersa)
2. *bosque* (bosque cerrado y abierto)

La comparación de las imágenes de bosques para 1987 y 1999 permitió obtener la imagen de diferencia de imágenes 1987-1999, que es la imagen de detección del cambio, con cinco clases:

0. *agua*
1. *no-bosque*
2. *deforestación*
3. *reforestación*
4. *bosque*

### **Paso 7. Compilación de datos espaciales sobre los principales factores de deforestación y reforestación**

Fueron examinados seis factores que podrían explicar los patrones observados de deforestación y reforestación, y para los cuales existen datos de variación continua:

1. distancia a *no-bosque* (para análisis de deforestación) y distancia a *bosque* (para análisis de reforestación) (ambas en metros) - se derivaron las distancias a partir de las clases discriminadas en las imágenes Landsat.

2. elevación (metros) - se obtuvo los datos recogidos por el programa Misión Topográfica de Radar (SRTM, por su nombre en inglés Shuttle Radar Topography Misión) de la NASA, en febrero de 2000, a una resolución horizontal de 90 m. Los datos originales fueron reproyectados de coordenadas geodésicas a coordenadas UTM mediante triangulación Delauney con aproximadamente 200 puntos de control y con selección del vecino más próximo. En este proceso se subdividió cada píxel en tres, aumentando la resolución a 30 m.
3. distancia a ríos (m) - se digitalizaron los ríos de las imágenes Landsat y se verificaron con las hojas *Bajo Pichanaqui* (1987), *Codo del Pozuzo* (1993), *Iscozación* (1996), *Oxapampa* (1987), *Panao* (1990), *Pozuzo* (1984), *Puerto Bermúdez* (1999), *Ulcumayo* (1973), y *Yuyapichis* (1996), de la Carta Nacional Topográfica, mapas impresos en papel a la escala 1:100,000 por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), Lima, Perú.
4. distancia a carreteras (m) - se digitalizó las carreteras de las imágenes Landsat y se verificaron con mapas de IGN impresos en papel.
5. pendiente (grados) - se calculó la pendiente a partir de los datos de elevación de NASA.
6. distancia a centros poblados con una población mayor a 400 habitantes (m) - se digitalizó los centros poblados de las imágenes Landsat y se verificaron con los mapas de IGN y datos de población de 1993 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, INEI).

Estos factores actúan como indicadores para las amenazas subyacentes de la expansión agrícola y la extracción de madera y leña.

### **Paso 8. Análisis de componentes principales para calcular el peso de los factores en la explicación de la deforestación y la reforestación observados**

Fueron calculados los valores de cada uno de los seis factores para cada píxel individual de deforestación (241 842 píxeles en total) y de reforestación (94 641 píxeles en total) ocurridos en el período 1987-1999. Se condujo un análisis de componentes principales, empleando la matriz de correlación, sobre las seis capas de datos de deforestación y sobre las seis capas de datos de reforestación.

El análisis de componentes principales ofreció lo siguiente:

1. Seis componentes principales, constituyendo cada uno una capa de datos espaciales que representan la combinación de los seis factores originales.
2. Fracción de la varianza presente en los datos que logra explicar cada componente principal.

3. La carga de *eigenvalue* de cada factor para cada componente principal.
4. Una matriz 6×6 de la correlación de cada combinación de dos factores.

A fin de reconocer el número de componentes principales que explican 'suficientemente' las variaciones presentes en los datos de deforestación y de reforestación, se usó la prueba gráfica del *scree* (Catell, 1966). Luego fue calculado el peso de cada factor:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 8: } W_n^{\text{proceso}} = \frac{V_m}{\sum_{m=1}^i V_m} \times \frac{L_{mn}}{\sum_{n=1}^q \sum_j |L_{mn}|}$$

- $i$  número de componentes principales
- $j$  número de factores
- $L_{mn}$  carga de *eigenvalue*
- $m$  componentes principales
- $n$  factores explicatorios de la deforestación observada o, separadamente, de la reforestación observada
- proceso* deforestación observada o reforestación observada, una de las dos
- $q$  número de componentes principales explicatorios
- $V_m$  fracción explicada de la varianza
- $W_n^{\text{proceso}}$  peso de cada factor en la explicación de un proceso, rango 0-1

### Paso 9. Derivación de las funciones de probabilidad de deforestación y de reforestación

Para cada uno de los seis factores, fue derivada una ecuación de la probabilidad de deforestación y, separadamente, de la probabilidad de reforestación, como función del valor del factor. Primero se dividió los valores de variación continua de cada capa de factor (Paso 7) en clases de valores de 500 m para los factores *distancia a[...]* (*no-bosque, bosque, ríos, carreteras, centros poblados*), clases de valores de 25 m para *elevación*, y clases de valores de 0,5 grados para *pendiente*. Para cada clase de valores de factor se calculó la fracción deforestada y, separadamente, la fracción reforestada, en el período 1987-1999. La fracción deforestada es equivalente a la probabilidad (un valor en el rango 0-1) de que un píxel individual de bosque en una clase de valores de un factor pudiera haber sido cortado para 1999:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 9: } p_{\text{factor}}^{\text{deforest}} = f_{\text{factor}}^{\text{deforest}} = \frac{A_{\text{factor}}^{\text{deforest}}}{A_{\text{factor}}^{\text{bosque1987}}}$$

$A_{factor}^{bosque\ 1987}$  área, de una clase de valores de un factor, que era bosque en 1987 (ha)

$A_{factor}^{deforest}$  área, de una clase de valores de un factor, deforestada en el período 1987-1999 (ha)

$f_{factor}^{deforest}$  fracción del bosque de 1987, en una clase de valores de un factor, que se había perdido para 1999 (rango 0-1)

$p_{factor}^{deforest}$  probabilidad de deforestación, en una clase de valores de factor específica, en el período 1987-1999 (rango 0-1)

Separadamente, la fracción reforestada es equivalente a la probabilidad (un valor en el rango 0-1) de que un píxel individual de no-bosque de 1987 en una clase de valores de un factor pudiera haberse convertido en bosque hasta 1999:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 10: } p_{factor}^{reforesta} = f_{factor}^{reforesta} = \frac{A_{factor}^{reforesta}}{A_{factor}^{no\ bosque\ 1987}}$$

$A_{factor}^{no\ bosque\ 1987}$  área, de una clase de valores de un factor, que era no-bosque en 1987 (ha)

$A_{factor}^{reforesta}$  área, de una clase de valores de un factor, reforestada en el período 1987-1999 (ha)

$f_{factor}^{reforesta}$  fracción del área no-bosque de 1987, en una clase de valores de un factor, que había sido reforestada para 1999 (rango 0-1)

$p_{factor}^{reforesta}$  probabilidad de reforestación, en una clase de valores de factor específica, en el período 1987-1999 (rango 0-1)

Se utilizó el software Systat TableCurve2D para ajustar las funciones de probabilidad divariada empírica versus un valor de factor. Se derivaron las funciones de probabilidad para los valores inferior y superior de los intervalos de confianza a  $p = 0,05$ .

### Paso 10. Cálculo de la probabilidad de deforestación y reforestación para cada píxel

A fin de estimar la deforestación y reforestación futuras, se hicieron proyecciones hacia el futuro solamente una cantidad de años igual al largo del período para el cual teníamos observaciones del pasado. Entonces, las probabilidades de deforestación y reforestación fueron proyectadas para el período de 12 años, 1999-2011.

Usando las capas de datos espaciales de valores de variación continua para cada factor (Paso 7), fueron calculadas las probabilidades central, alta y baja de deforestación para 2011 para cada uno de los 3 429 276 píxeles de bosque de 1999. La suma de las probabilidades de los seis factores, ponderadas con los pesos obtenidos de los componentes

principales, proporciona, para cada píxel de bosque de 1999, el valor de la probabilidad (en el rango 0-1), de que para el año 2011 ese píxel de bosque haya sido cortado. Separadamente, la suma de las probabilidades de los seis factores, ponderadas con los pesos obtenidos de los componentes principales, proporciona el valor de la probabilidad (en el rango 0-1) que corresponde a cada uno de los 642 736 píxeles de no-bosque de 1999, de que para el año 2011 se haya convertido en bosque:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 11: } p_{\text{píxel}}^{\text{proceso}} = \sum_{n=1}^j W_n^{\text{proceso}} \times p_n^{\text{proceso}}$$

$j$  número de factores

$n$  factores explicatorios del proceso observado

$p_n^{\text{proceso}}$  probabilidad de un proceso para un factor específico en el período 1999-2011 (rango 0-1)

$p_{\text{píxel}}^{\text{proceso}}$  probabilidad total de un proceso para un píxel individual en el período 1999-2011 (rango 0-1)

*proceso* una de las dos: deforestación observada o reforestación observada

$W_n^{\text{proceso}}$  peso de cada factor en la explicación del proceso (rango 0-1) (Paso 8)

### Paso 11. Proyección de la deforestación y reforestación futuras

La fracción de bosque de 1999, que según la proyección será cortada para 2011, es igual a la suma de las probabilidades de deforestación de todos los píxeles de *bosque* 1999. De igual forma, la fracción de tierra *no-bosque* 1999, que según la proyección se convertirá en bosque para 2011, es igual a la suma de las probabilidades de reforestación de todos los píxeles no-bosque de 1999.

$$\Rightarrow \text{Ecuación 12: } f^{\text{proceso}} = \sum_{\text{todos píxeles}} p_{\text{píxel}}^{\text{proceso}}$$

$f^{\text{proceso}}$  fracción de la clase de tierra de 1999 que para el año 2011 estará comprendida en un proceso (rango 0-1)

$p_{\text{píxel}}^{\text{proceso}}$  probabilidad total, para un píxel individual, de que esté ocurriendo un proceso en el período 1999-2011 (rango 0-1)

Las tasas de deforestación y reforestación fueron proyectadas dividiendo las fracciones por el número de años comprendidos:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 13: } r_{\text{proceso}} = \frac{f^{\text{proceso}}}{t_{\text{fin}} - t_{\text{inic}}}$$

$f_{proceso}$	fracción de la clase de tierra de 1999 que estará comprendida en un proceso (rango 0-1)
<i>proceso</i>	una de las dos siguientes: deforestación observada o reforestación observada
$r_{proceso}$	tasa proyectada de un proceso (año <sup>-1</sup> )
$t_{inic}$	año inicial del periodo de proyección del cambio en el bosque (=1999, para la proyección de selva Central)
$t_{fin}$	año final del período de proyección del cambio en el bosque (=2011, para la proyección de selva central)

Las probabilidades de deforestación y de reforestación de cada píxel fueron usadas para desarrollar capas de datos espaciales o mapas de la cobertura de la tierra proyectada al futuro y del cambio futuro de la cobertura forestal. Primero fue determinado el umbral de la probabilidad de deforestación -probabilidad a la cual el número de píxeles que superan tal probabilidad es igual al de la deforestación proyectada 1999-2011-. Separadamente, fue determinado el umbral de la probabilidad de reforestación -la probabilidad a la cual el número de píxeles que superan esa probabilidad es igual a la reforestación proyectada 1999-2011-.

Fueron identificados: cada píxel de *bosque* 1999 con una probabilidad de deforestación mayor que el umbral de deforestación, cada píxel de *no-bosque* 1999 con una probabilidad de reforestación mayor que el umbral de reforestación, y cada píxel 1999 que no cambió, para producir una imagen de detección de cambio del bosque proyectado 1999-2011, con cinco clases ya usadas anteriormente:

0. agua
1. no-bosque
2. deforestación
3. reforestación
4. bosque

Luego, fue aplicada la imagen de detección de cambio a la capa de cobertura de la tierra 1999 para obtener una capa de datos de cobertura de la tierra proyectada a 2011, con las mismas clases de cobertura de la tierra establecidas previamente:

0. nubes, sombra, agua
1. vegetación rala
2. vegetación baja
3. bosque abierto
4. bosque cerrado

Esta capa de datos se desarrolló mediante el cambio de los píxeles de *bosque* 1999 que al ser proyectados serían comprendidos en el proceso de deforestación para 2011, ya sea en vegetación rala o en vegetación baja, dependiendo de su probabilidad y de la proporción vegetación rala - vegetación baja de 1999 observada entre los píxeles deforestados en el período 1987-1999. Se cambió a bosque abierto todos los píxeles de *no-bosque* 1999 que al proyectarse para 2011 pasan a reforestación.

Las capas de dato espacial para 2011 brindan directamente las áreas de las coberturas de tierra proyectadas para tal año. Las áreas proyectadas de bosque abierto y bosque cerrado para el año de inicio y el año final del proyecto propuesto, 2006 y 2035, son iguales a los valores extrapolados con las tasas de cambio proyectadas de 1999-2011:

⇒ Ecuación 14:

$$A_{\text{tipobsq}}(t_{\text{fin}}) = A_{\text{tipobsq}}(t_{\text{inic}}) + [(t_{\text{fin}} - t_{\text{inic}}) \times r_{\text{cambiotipobsq}} \times A_{\text{tipobsq}}(1999)]$$

⇒ Ecuación 15:

$$A_{\text{tipobsq}}(t_{\text{inic}}) = A_{\text{tipobsq}}(1999) + [(t_{\text{inic}} - 1999) \times r_{\text{cambiotipobsq}} \times A_{\text{tipobsq}}(1999)]$$

$A_{\text{tipobsq}}^{(t)}$  área de un tipo de bosque del área del proyecto de conservación en un año específico (ha)

$\text{tipobsq}$  uno de los dos tipos de bosque: cerrado o abierto

$r_{\text{cambiotipobsq}}$  tasa proyectada de cambio de un tipo de bosque (año<sup>-1</sup>)

$t_{\text{fin}}$  año final de un proyecto (año) (=2035, para selva central)

$t_{\text{inic}}$  año de inicio de un proyecto (año) (=2006 para selva central)

## Paso 12. Proyección de líneas base futuras de emisión y remoción

La línea base de emisiones de carbono a la atmósfera, del área de un proyecto de conservación, es igual a la diferencia entre las existencias de carbono del área bruta de deforestación (sin un proyecto) al inicio y el final del periodo del proyecto propuesto:

⇒ Ecuación 16:  $C_{\text{emisiones}} = f_c \times [S_{\text{bosque}}(t_{\text{fin}}) - S_{\text{bosque}}(t_{\text{inic}})]$

⇒ Ecuación 17:  $S_{\text{bosque}}(t) = S_{\text{cerrado}}(t) + S_{\text{abierto}}(t)$

⇒ Ecuación 18:  $S_{\text{tipobsq}}(t) = A_{\text{tipobsq}}(t) \times (B_{\text{tipobsq}} - B_{\text{tierra desboscada}})$

$A_{tipobsq}(t)$	área de un tipo de bosque el área del proyecto de conservación en un año específico (ha)
$B_{tierradesboscada}$	densidad de la biomasa contenida en la clase de tierra después que el bosque fue cortado ( $t\ ha^{-1}$ )
$B_{tipobsq}$	densidad de la biomasa del tipo de bosque existente ( $t\ ha^{-1}$ )
$C_{emisiones}$	total de emisiones de línea base de carbono a la atmósfera (t)
$f_c$	fracción de carbono de la biomasa ( $kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$ ); $f_c = 0,49\ kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$
$tipobsq$	uno de los dos tipos de bosque: cerrado o abierto
$S_{bosque}(t)$	existencias de biomasa en todos los tipos de bosque en un año específico (t)
$t$	año
$t_{fin}$	año final de un proyecto; $t_{final} = 2035$ para selva central
$t_{inic}$	año inicial del proyecto; $t_{inic} = 2006$ para selva central

La línea base de remoción de carbono de la atmósfera por un proyecto de deforestación es igual a la suma de las líneas base anuales de acumulación de carbono en el área bruta de reforestación sin un proyecto:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 19: } C_{remocion} = f_c \times \sum_{t_{inic}}^{t_{fin}} B_{reforesta}(t)$$

$$\Rightarrow \text{Ecuación 20: } B_{reforesta}(t) = \sum_{edad=1}^{t-t_{inic}+1} R_{resto}(edad)$$

$$\Rightarrow \text{Ecuación 21: } R_{resto}(edad) = r_{reforesta} \times A_{proyecto} \times [B(edad) - B(edad-1)]$$

$edad$	edad de un área de reforestación (años)
$A_{proyecto}$	área total del proyecto de reforestación propuesto (ha)
$B(edad)$	densidad de biomasa del bosque en regeneración a una edad específica ( $t\ ha^{-1}$ )
$B_{reforesta}(t)$	línea base de acumulación de biomasa en la reforestación (sin un proyecto) durante el año $t$ (t)
$C_{remocion}$	línea base total de remoción de carbono de la atmósfera (t)
$f_c$	fracción de carbono de la biomasa ( $kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$ ); $f_c = 0,49\ kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$ para el bosque lluvioso amazónico (Chambers <i>et al.</i> , 2001b)

$R_{resto}(edad)$  acumulación adicional de biomasa (en un año) para un área de reforestación (sin un proyecto) de una edad específica (t)

$r_{reforesta}$  tasa proyectada de una reforestación sin un proyecto (año<sup>-1</sup>)

$t$  año

$t_{fin}$  año final de un proyecto (año);  $t_{fin} = 2035$  para selva central

$t_{inic}$  año inicial de un proyecto (año);  $t_{inic} = 2006$  para selva central

Las existencias totales de carbono en el área de investigación de 4800 km<sup>2</sup> para un año específico es igual a la sumatoria del producto de: fracción de carbono, área, y densidad de biomasa, para cada clase de tierra en ese año.

$$\Rightarrow \text{Ecuación 22: } C_{total}(t) = f_c \times \sum_{todasclasesierra} A_{clasetierra}(t) \times B_{clasetierra}$$

$\Rightarrow$  Ecuación 23:

$$A_{clasetierra}(2006) = A_{clasetierra}(1999) + [(2006 - 1999) \times f_{cambioclasetierra} \times A_{clasetierra}(1999)]$$

$\Rightarrow$  Ecuación 24:

$$A_{clasetierra}(2035) = A_{clasetierra}(2006) + [(2035 - 2006) \times f_{cambioclasetierra} \times A_{clasetierra}(1999)]$$

$A_{clasetierra}(t)$  área de clase de tierra en un año específico (ha); datos para 1987, 1999 y 2011, de los Pasos 6 y 11

$B_{clasetierra}$  densidad de biomasa de una clase de tierra (t ha<sup>-1</sup>)

$C_{clasetierra}(t)$  existencias de carbono en un tipo de bosque en un año específico (t)

$f_c$  fracción de carbono de la biomasa (kg C (kg de biomasa)<sup>-1</sup>);  $f_c = 0,49$  kg C (kg de biomasa)<sup>-1</sup>

*clasetierra* vegetación rala o vegetación baja o bosque abierto o bosque cerrado

$r_{cambioclasetierra}$  tasa de cambio de 1999-2011 de una clase de tierra proyectada (año<sup>-1</sup>)

$t$  año

### Paso 13. Estimación de la captura de carbono futura debido al proyecto forestal propuesto

Para un proyecto de conservación del bosque, la cantidad de carbono capturada es igual al carbono contenido en el área de bosque proyectada que sería cortada durante el período del proyecto. Como lo expresa la ecuación 16, tal cantidad es igual a la línea base de emisiones de carbono a la atmósfera desde el área bruta de la deforestación.

$$\Rightarrow \text{Ecuación 25: } C_{\text{conservabosque}} = C_{\text{emisiones}}$$

$C_{\text{emisiones}}$  total de emisiones línea base a la atmósfera (t)

$C_{\text{conservabosque}}$  captura de carbono de un proyecto de conservación del bosque

Para un proyecto de reforestación, la cantidad de carbono capturado es igual a la diferencia entre la cantidad de carbono producido en el crecimiento del nuevo bosque y la cantidad de carbono contenido en el crecimiento del nuevo bosque que habría ocurrido aun si no hubieran existido los esfuerzos organizados del proyecto de reforestación. La última cantidad, que fue calculada con la ecuación 19, constituye la línea base de la remoción de carbono de la atmósfera para el área bruta de reforestación sin el proyecto. La cantidad de carbono que se producirá en el proyecto de reforestación propuesto, es igual a la suma de las cantidades de carbono acumulado año tras año en las diferentes etapas del proyecto de reforestación.

$$\Rightarrow \text{Ecuación 26: } C_{\text{totalproyreforesta}} = f_c \times \sum_{t_{\text{inic}}}^{t_{\text{fin}}} B_{\text{proyreforesta}}(t)$$

$$\Rightarrow \text{Ecuación 27: } B_{\text{proyreforesta}}(t) = \sum_{\text{todasetapas edad} > 0} R_{\text{reg.nat}}(\text{edad}) + R_{\text{plantac}}(\text{edad})$$

$$\Rightarrow \text{Ecuación 28: } R_{\text{reg.nat.}}(\text{edad}) = A_{\text{reg.nat.}}(\text{etapa}) \times [B(\text{edad}) - B(\text{edad} - 1)]$$

$\Rightarrow$  Ecuación 29:

$$R_{\text{plantac}}(\text{edad}) = A_{\text{plantac}}(\text{etapa}) \times \frac{D_{\text{plantac}}}{D_{\text{bsqsecund}}} \times [B(\text{edad}) - B(\text{edad} - 1)]$$

$$\Rightarrow \text{Ecuación 30: } \text{edad} = t - t_{\text{inic}} + G(\text{etapa})$$

$A_{\text{reg.nat.}}(\text{etapa})$  área de regeneración natural propuesta para una etapa especificada; el cuadro 2 contiene los datos correspondientes a las etapas del Proyecto Selva Central

$A_{\text{plantac}}(\text{etapa})$  área de plantación propuesta para una etapa especificada; el cuadro 2 contiene datos del área de plantación para las etapas del Proyecto Selva Central

$\text{edad}$  edad de un área de reforestación (años)

$B(\text{edad})$  densidad de biomasa del bosque regenerando a una edad específica ( $\text{t ha}^{-1}$ ); datos provenientes de la curva de crecimiento de la biomasa (paso 5)

$B_{proyreforesta}(t)$	acumulación de biomasa en un proyecto de reforestación durante un año $t$ (t)
$C_{totalproyreforesta}$	producción total de carbono de un proyecto de reforestación (t)
$C_{remocion}$	línea base total de remoción de carbono de la atmósfera (t)
$D_{plantac}$	densidad de árboles de una plantación (árboles $ha^{-1}$ )
$D_{bsqsecund}$	densidad de árboles de un bosque secundario (árboles $ha^{-1}$ )
$f_c$	fracción de carbono de la biomasa ( $kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$ ); $f_c=0,49\ kg\ C\ (kg\ biomasa)^{-1}$
$G(etapa)$	coeficiente para el cálculo (año); $G(etapa) = 1, 0, -1, -2, -3 \dots$ para las etapas 1, 2, 3, 4, 5...
$R_{plantac}(edad)$	acumulación adicional de carbono (en un año) para una plantación de una edad especificada (t)
$etapa$	número serial de campañas anuales de reforestación o etapas; el cuadro 2 brinda los números de las etapas para el proyecto propuesto de selva central
$t$	año

**Cuadro 2.** Etapas de implementación para el proyecto propuesto de reforestación selva central. La regeneración natural y las plantaciones están combinadas en las fajas de enriquecimiento

etapa	año	regeneración natural (ha)	plantación (ha)	total (ha)
1	2006	160	40	200
2	2007	640	160	800
3	2008	1200	300	1500
4	2009	1200	300	1500
5	2010	1200	300	1500
6	2011	1200	300	1500
total	2006-2011	5600	1400	7000

Para un proyecto de reforestación, la cantidad de carbono capturado es igual a la diferencia entre la cantidad de carbono producido en el crecimiento del nuevo bosque y la línea base de remoción de carbono:

$$\Rightarrow \text{Ecuación 31: } C_{adicionareforesta} = C_{total\ proy\ reforesta} - C_{remocion}$$

$C_{adicionareforesta}$	carbono adicional capturado por un proyecto de reforestación (t)
$C_{totalproyreforesta}$	producción total de carbono del proyecto de reforestación (t)
$C_{remocion}$	línea base total de remoción de carbono de la atmósfera (t)

Las mayores fuentes de error en la medición y de variabilidad estadística para los cálculos de carbono abarcan:

1. mediciones de diámetro  $\pm 1\%$
2. mediciones de altura  $\pm 1\%$
3. estimaciones de densidad de la madera  $\pm 10\%$
4. curvas de probabilidad de la deforestación bivariada  $\pm$ intervalo de confianza de curva ajustada a  $p=0,05$
5. curvas de probabilidad de la reforestación bivariada  $\pm$ intervalo de confianza de curva ajustada a  $p=0,05$

A fin de producir estimaciones conservadoras de cantidad de carbono, fueron usados los valores inferiores de (1), (2), (3) y (4), y el valor superior de (5) para calcular los estimados inferiores de la línea base de emisiones de carbono y los estimados superiores de la línea base de remoción de carbono. Contrariamente, los valores opuestos rinden estimados superiores de línea base de emisiones de carbono e inferiores de línea base de remoción de carbono.

## Resultados y Discusión

### Paso 1. Definición del área del proyecto forestal con base en su significación biológica

Las subsecciones “Zona del Estudio” y “FRCA, Paso 1” describen en detalle el área y la selección realizada. Dentro de los 4800 km<sup>2</sup> que abarca el área ha sido elaborado un plan para conservar una cuenca boscosa de 7000 ha y reforestar otras 7000 ha de tierras usadas previamente para fines agrícolas. El área del proyecto de conservación del bosque abarca la parte alta de la cuenca del río *Chontabamba*. El área del proyecto de reforestación la conformarán un conjunto de parcelas no contiguas, identificadas en el Paso 6 como elegibles bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

### Paso 2. Establecimiento de parcelas permanentes de inventario forestal

Se midió e identificó 17 073 árboles con un diámetro  $\geq 10$  cm en 24 parcelas permanentes de inventario forestal que totalizaron 39,1 ha de bosque (22,6 ha de bosque primario y 16,5 ha de bosque secundario). Los resultados del inventario se consiguan en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Resultados del inventario forestal

	primario	secundario	total
parcelas	7	17	24
área (ha)	22,6	16,5	39,1
árboles (d ≥ 10 cm a 1,3 m)	8267	8806	17073
<i>biodiversidad</i>	63	53	69
familias	232	141	267
géneros	346	257	512
especies	255	166	
especies únicas	91	91	
especies compartidas	588	639	1227
árboles de familias desconocidas	<i>Moraceae</i>	<i>Melastomataceae</i>	
familias más abundantes	<i>Myristicaceae</i>	<i>Mimosaceae</i>	
<i>características del rodal</i>			
densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	366	533	
diámetro promedio (cm)	24 ± 15	17 ± 8	
árboles de crecimiento tardío	7079	2093	
fracción de crecimiento tardío	0,86	0,24	
árboles sucesionales	1188	6713	
fracción sucesional	0,14	0,76	
área basal (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	24 (18-40)	15 (8-26)	
fracción de crecimiento tardío	0,87	0,31	
fracción sucesional	0,13	0,69	
biomasa sobre el suelo (t ha <sup>-1</sup> )	240 ± 30	90 ± 10	
fracción de crecimiento tardío	0,9	0,34	
fracción sucesional	0,1	0,66	
carbono vivo sobre el suelo (t ha <sup>-1</sup> )	120 ± 15	40 ± 5	

### Paso 3. Análisis de biodiversidad de las medidas de los árboles y caracterización de los rodales forestales

Como se aprecia en el cuadro 3, los sitios inventariados albergan árboles de 512 especies, 267 géneros, y 69 familias. No fue posible identificar las familias del 7% de los árboles o las especies botánicas del 21% de los árboles. Los sitios son tan ricos como lo son otros del bosque amazónico lluvioso (Terborgh y Andresen, 1998; Pitman *et al.*, 2002; Laurance *et al.*, 2004): el número de especies de los sitios de bosque primario es 346, mientras que la riqueza de especies de los sitios de bosque secundario es 257. La diferencia de tamaño de los sitios de inventario impide una comparación estadística de las dos muestras, pero los datos parecen indicar que los sitios primarios son más ricos y más diversos que los sitios secundarios.

La diversidad  $\alpha$  fluctúa entre 23 y 166 especies. Como una medida de la fracción del total de especies compartida entre el bosque primario y el secundario, la diversidad  $\beta$

es 0,18. La diversidad  $\gamma$  es 512 especies. Estos valores de diversidad caen en el rango de valores de diversidad conocido para otros bosques lluviosos amazónicos del Perú (Condit *et al.*, 2002; ter Steege *et al.*, 2003), aunque la diversidad  $\beta$  es menor que la de los bosques inundados del sureste del Perú (Pitman *et al.*, 1999).

Las familias con la mayor parte de los árboles en los sitios primarios son *Moraceae* y *Myristicaceae*; en los sitios secundarios, *Melastomataceae* y *Mimosaceae* tienen la mayoría de árboles. Las especies dominantes, por biomasa, son *Eschweilera* sp. ("palo misho", familia *Lecythidaceae*) en el bosque primario y *Jacaranda copaia* ("charapacho", familia *Bignoniaceae*) en el bosque secundario.

En los sitios de bosque primario, 90% de la biomasa sobre la superficie del suelo reside en especies tardías (primarias) y 10% en especies sucesionales (secundarias). Contrariamente, en los sitios de bosque secundario, 66% de la biomasa reside en especies sucesionales (secundarias) y 34% en especies tardías (primarias).

La densidad de árboles de diámetro  $\geq 10$  cm es 366 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en el bosque primario y 533 árboles  $\text{ha}^{-1}$  en el bosque secundario. El diámetro promedio es  $24 \pm 15$  cm en el bosque primario y  $17 \pm 8$  cm en el bosque secundario (cuadro 3), resultando en una distribución más suave y extendida la del bosque primario (figura 3). El área basal en el bosque primario es  $24 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  ( $18\text{-}40 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y  $15 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  ( $8\text{-}26 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) en el bosque secundario. Las parcelas de inventario forestal exhiben árboles y rodales de dimensiones similares a las de otras parcelas de inventario forestal constituidas en redes a través del bosque lluvioso amazónico (ter Steege *et al.*, 2003; Lewis *et al.*, 2004; Rice *et al.*, 2004; Chazdon *et al.*, 2005).

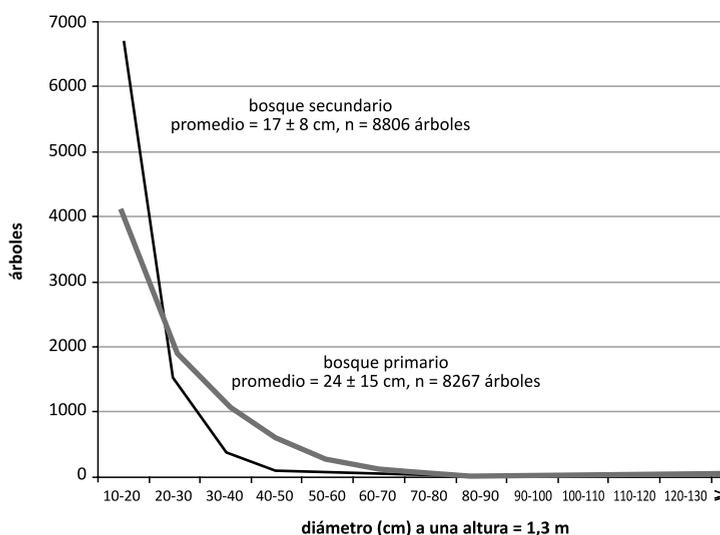


Figura 3. Distribución de los tamaños de los árboles

#### Paso 4. Cálculo de la biomasa utilizando ecuaciones alométricas locales y densidades de madera específicas para las especies

La biomasa sobre la superficie del suelo es  $240 \text{ t ha}^{-1} \pm 30 \text{ t ha}^{-1}$  en los sitios primarios y  $90 \pm 10 \text{ t ha}^{-1}$  en los sitios secundarios (cuadro 3). El carbono sobre la superficie en vegetación viva es  $120 \pm 15 \text{ t ha}^{-1}$  en bosques primarios y  $40 \pm 5 \text{ t ha}^{-1}$  en bosques secundarios. La densidad de carbono cae en el rango de valores medidos para el bosque lluvioso amazónico (Cummins *et al.*, 2002; DeWalt y Chave, 2004; Fearnside y Laurance, 2004; Feldpausch *et al.*, 2004; Rice *et al.*, 2004), el cual posee las más altas densidades de carbono de los trópicos (Olson *et al.*, 1983; Matthews *et al.*, 2000).

La biomasa sobre la superficie del suelo y la riqueza de especies del bosque están correlacionadas positivamente (significación a  $p < 0,001$ ) (figura 4). Los sitios con más alto número de especies tienden también a tener valores más altos de biomasa para la misma área de terreno. De hecho, en otro bosque tropical el almacenamiento de carbono está en función de la composición de las especies (Bunker *et al.*, 2005). Así, la conservación y restauración del bosque puede mejorar tanto la captura de carbono como la conservación de la biodiversidad.

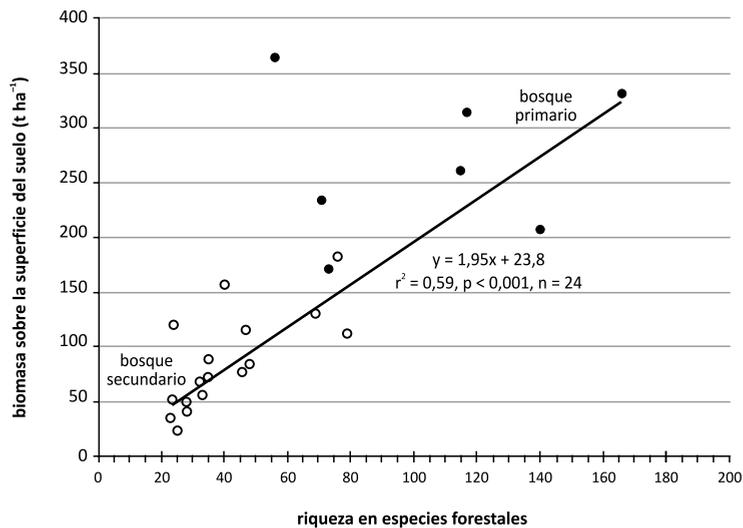


Figura 4. Biomasa sobre la superficie del suelo y riqueza en especies forestales

#### Paso 5. Derivación de las funciones de crecimiento

El crecimiento de la biomasa se produce rápidamente en los años tempranos del re-crecimiento, luego se retarda éste en forma paulatina, de acuerdo a la función empírica estadísticamente significativa (figura 5), derivada del inventario forestal.

⇒ Ecuación 32:  $B(\text{edad}) = 4.0887076 - 0.0174009 \text{ edad}^2$  ( $p < 0.001$ )

*edad* edad de un rodal del bosque (años)

*B(edad)* densidad de biomasa ( $t\ ha^{-1}$ )

La curva del crecimiento de la biomasa se asemeja en forma y magnitud a otras curvas de crecimiento de la biomasa de bosques lluviosos del Neotrópico (Hughes *et al.*, 1999; Feldpausch *et al.*, 2004; Neeff y dos Santos, 2005; Zarin *et al.*, 2005).

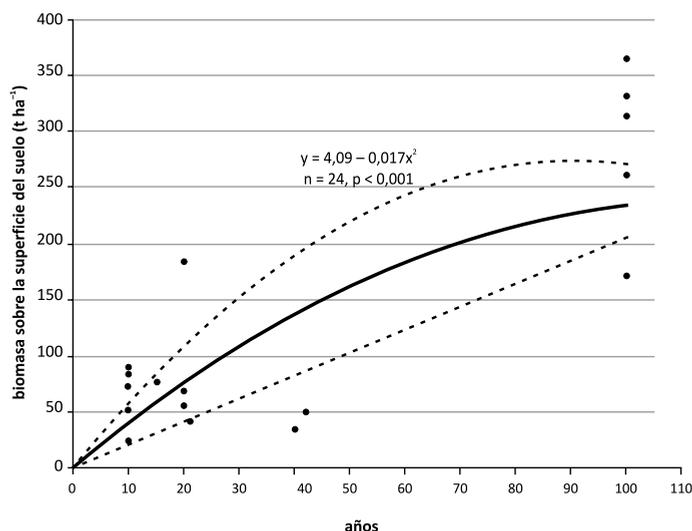


Figura 5. Curva de crecimiento de la biomasa del bosque amazónico en selva central. Intervalos de confianza a  $p=0,05$

## Paso 6. Detección del cambio utilizando inventarios forestales e imágenes Landsat

El área del proyecto cubre  $4800\ km^2$ , de los cuales  $3700\ km^2$  aparecían libres de nubes, sombras, y agua en las escenas Landsat de 1987 y 1999, como se aprecia en la figura 1 y el cuadro 4.

En 1987 y 1999 el bosque cubría el 90% del área de investigación. En el período 1987-1999, el área bruta de deforestación de  $32\ 000\ ha$  excedió al área bruta de reforestación de  $12\ 000\ ha$ , dando lugar a una deforestación neta, en el área de investigación, de  $20\ 000\ ha$ , a una tasa de  $0,005\ año^{-1}$  (cuadro 5).

El análisis de la información digital es evidencia clara de que la deforestación se presenta concentrada a lo largo de las carreteras, lo que es consistente con otras mediciones realizadas en el bosque lluvioso amazónico (Laurance *et al.*, 2002; Walker *et al.*, 2004; de Barros Ferraz *et al.*, 2005), pero también a lo largo de ríos, contrariamente a mediciones realizadas en la zona sur-oriental del Perú (Álvarez y Naughton-Treves, 2003). Se hizo evidente también que, en forma concurrente, la reforestación ocurrió a lo largo de ríos.

**Cuadro 4.** Cobertura de la tierra, 1987-1999, selva central, Perú

	1987 ha	1999 ha	Cambio neto 1987-1999 ha	Cambio neto 1987-1999 ha	Cambio neto 1987-1999 ha
bosque cerrado	285 000	281 000	-4 000	-400	-0,001
bosque abierto	44 000	28 000	-16 000	-1300	-0,03
<b>total bosque</b>	<b>329 000</b>	<b>309 000</b>	<b>-20 000</b>	<b>-1700</b>	<b>-0,005</b>
vegetación baja	15 000	28 000	13 000	1100	0,073
vegetación rala	23 000	30 000	7 000	600	0,026
<b>total no-bosque</b>	<b>38 000</b>	<b>58 000</b>	<b>20 000</b>	<b>1700</b>	<b>0,045</b>
<b>total tierra sin nubes</b>	<b>366 000</b>	<b>366 000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
nubes, sombra, agua	109 000	109 000	0	0	0
<b>total área de investigación</b>	<b>476 000</b>	<b>476 000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

**Cuadro 5.** Cambio bruto en área de bosque, 1987-1999, selva central, Perú

cambio del bosque	Condición inicial 1987 ha	Cambio bruto 1987-1999 ha	Cambio bruto 1987-1999 ha año <sup>-1</sup>	Cambio bruto 1987-1999 año <sup>-1</sup>
bosque		297 000		
reforestación	no-bosque	38 000	12 000	1 000
deforestación	bosque	329 000	32 000	2 700
no bosque		26 000		-0,008
<b>total tierra sin nubes</b>		<b>366 000</b>		

De las áreas que habían sido bosque cerrado en 1987, el 89% se mantuvo como bosques cerrados en 1999. La conversión a bosques secundarios o el desmonte neto convirtió el 11% restante de los bosques cerrados a otros tipos de cobertura a una tasa que duplica la tasa neta de deforestación. Esto demuestra que la tasa neta de deforestación detectada con imágenes Landsat no indica en forma suficiente el grado de irrupción en ecosistemas forestales intactos, un fenómeno documentado para otras partes de la Amazonia (Asner *et al.*, 2005).

Aún cuando en el área de investigación se ha producido una deforestación neta en el periodo 1987-1999, las áreas protegidas adyacentes han experimentado una deforestación insignificante (*Bosque de Protección San Matías - San Carlos, Parque Nacional Yanachaga - Chemillén*) y aun reforestación neta (*Reserva Comunal Yanasha*) (cuadro 6). Debido a que el gobierno del Perú declaró la protección de las tres áreas cercanamente al inicio del período de análisis (1987), los datos sugieren fuertemente que la protección fue exitosa. Otra interpretación podría juzgar que las áreas no habían estado amenazadas, pero la proximidad de las áreas protegidas

con áreas privadas que experimentaron deforestación significativa implica que el estatus de protección ha sido determinante en el destino del bosque.

El análisis de la deforestación muestra que 26 000 ha dentro del área del proyecto no eran bosque en 1987 y son elegibles para transacciones bajo el Mecanismo para el Desarrollo Limpio.

**Cuadro 6.** Cambio de la cobertura forestal 1987-1999, Proyecto Selva Central y áreas protegidas

		Área del proyecto Selva Central	Parque Nacional Yanachaga- Chemillen	Bosque de Protección San Matías- San Carlos	Reserva comunal Yanesha
			establecida en 1986	establecida en 1987	establecida en 1988
bosque	ha	297 000	48 000	61 000	24 000
reforestación	ha	12 000	600	500	100
deforestación	ha	32 000	700	700	80
no bosque	ha	26 000	400	40	5
área sin nubes	ha	366 000	50 000	62 000	24 000
nubes, sombra, agua	ha	109 000	62 000	90 000	9 000
total	ha	476 000	112 000	152 000	33 000
<b>cambio neto 1987-2011</b>		deforestación	deforestación	deforestación	reforestación
tasa neta	año <sup>-1</sup>	-0,005	-0,0002	-0,0003	0,00008

### Paso 7. Compilación de datos espaciales de los principales factores de deforestación y reforestación

Los valores de los seis factores de deforestación y reforestación (figura 6) varían en el área de investigación desde cero hasta los siguientes valores máximos:

1. distancia a no-bosque (para análisis de deforestación): 2 600 m  
distancia a bosque (para análisis de reforestación): 2 000 m
2. elevación: 4 400 m
3. distancia a ríos: 45 000 m
4. distancia a carreteras: 45 000 m
5. pendiente: 57°
6. distancia a centros poblados >400 44 000 m

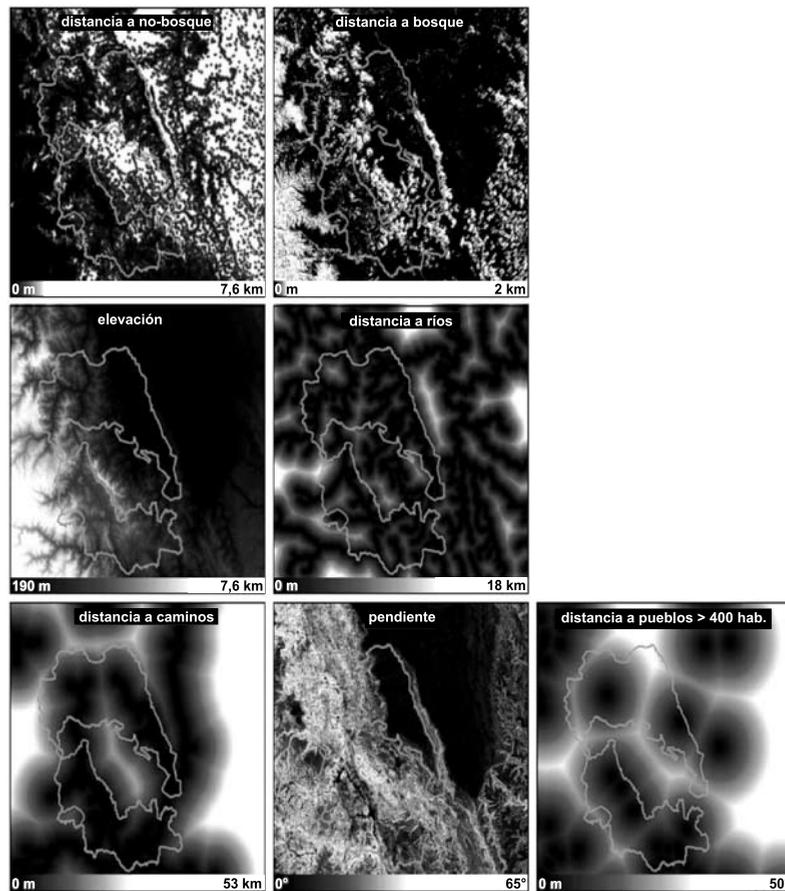


Figura 6. Factores de deforestación y reforestación

### Paso 8. Análisis de componentes principales para calcular el peso de los factores en la explicación de la deforestación y la reforestación observados

El análisis de componentes principales demostró que *distancia a no-bosque* era el factor que mejor explicaba los patrones de deforestación observados, mientras que *distancia a bosque* explicaba mejor los patrones de reforestación (cuadro 7). El análisis de componentes principales indicó que esos factores eran más significativos que *elevación*, *distancia a ríos*, *pendiente* y *distancia a centros poblados > 400*, aunque los pesos eran relativamente próximos para ajustar funciones divariadas de deforestación y reforestación con factores individuales (paso 9). La distancia a las áreas despejadas podría ser el mejor factor para explicar la deforestación debido a la facilidad física de realizar la tala cuando está próxima a un área despejada. Además, los efectos de borde incrementan la mortalidad de los fragmentos de bosque en la Amazonia (Laurance *et al.*, 1997; D'Angelo *et al.*, 2004).

**Cuadro 7.** Pesos de los factores al explicar la deforestación y reforestación observada, provenientes del análisis de componentes principales

Factor	deforestación 241 842 píxeles		reforestación 94 641 píxeles	
	peso	orden	peso	orden
distancia a bosque			0,186	1
distancia a no-bosque	0,190	1		
elevación	0,174	3	0,165	4
distancia ríos	0,143	6	0,151	5
distancia a carreteras	0,161	4	0,176	2
pendiente	0,175	2	0,150	6
distancia a pueblos > 400 hab.	0,157	5	0,171	3

### Paso 9. Derivación de funciones de probabilidad de deforestación y reforestación

Los patrones observados de deforestación y reforestación se ajustan muy estrechamente a las funciones polinomiales de probabilidad para cada factor (figuras 7, 8; cuadros 8, 9). La deforestación más alta ocurrió cerca de áreas despejadas, ríos, carreteras y centros poblados. La deforestación declinó con la distancia a las carreteras, pero se elevó de nuevo al alejarse de las carreteras, un posible signo de cortas ilegales. La reforestación más alta se dio cerca de áreas de bosque y ríos, y lejos de carreteras y centros poblados. La reforestación fue también mayor en áreas planas y a menor elevación.

**Cuadro 8.** Funciones de probabilidad de la deforestación 1987-1999 (y) para seis factores (x)

factor	distancia a no bosque	elevación	distancia a ríos	distancia a carreteras	pendiente	poblados > 400 hab.
unidades	m	m	m	m	grados	m
ecuación Nº	33	34	35	36	37	38
ecuación	$y = a + bx + cx^{0,5} + dx^{1,5} + ex^2$	$y = a + bx + cx^2 + dx^{2,5} + ex^3$	$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$	$y^{-1} = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$	$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$	$y = a + bx + cx^{2,5} + dx^3 + ex^2$
a	-0,08911672	0,490039516	0,15829998	4,972140575	0,112534116	0,18194664
b	3,37E-05	-0,00225374	-8,78809E-05	0,005207765	-0,00152327	-1,7944E-05
c	2,355132636	5,35471E-06	2,60611E-08	-4,564E-07	-0,00026059	1,16266E-11
d	-54,7479287	-1,4846E-07	-3,35114E-12	-3,8729E-12	1,40061E-05	-5,098E-14
e	241,4932368	1,15875E-09	1,54616E-16	7,87603E-16	-1,689E-07	6677,179773
r <sup>2</sup>	0,9999	0,7120	0,9832	0,9355	0,9194	0,8740
p	0,0009	0,0273	0,0042	0,0090	0,0048	0,0099
p<0,05	*	*	*	*	*	*
p<0,01	**		**	**	**	**

**Cuadro 9.** Funciones de probabilidad de la reforestación 1987-1999 (y) para seis factores (x)

factor	distancia a no bosque	elevación	distancia a ríos	distancia a carreteras	pendiente	poblados > 400 hab.
unidades	m	m	m	m	grados	m
ecuación Nº	39	40	41	42	43	44
ecuación	$y = a + bx + cx^{1,5} + dx^{0,5} + ex^{-1}$	$y = a + bx + cx^{1,5} + dx^2 + ex^{2,5}$	$y = a + bx + cx^{2,5} + dx^3 + ex^{-2}$	$y = a + bx + cx^2 + dx^{2,5} + ex^3$	$y = a + bx + cx^2 + dx^{2,5} + ex^3$	$y = a + bx + cx^{1,5} + dx^2 + ex^{2,5}$
a	0,182169351	0,339842962	0,224755224	0,200446029	0,422098933	0,084122595
b	0,000313406	0,001929361	-3,9003E-05	-2,7249E-05	-0,07785421	-7,2423E-06
c	7,26745E-06	-0,000106633	4,35446E-11	6,19503E-09	0,010347023	4,14889E-07
d	-3,20597861	1,87614E-06	-2,2562E-13	-5,9792E-11	-0,002241120	-4,4258E-09
e	20,48926241	-1,09366E-08	2906,309883	1,6449E-13	0,000139034	1,40742E-11
r <sup>2</sup>	0,9999	0,9511	0,9975	0,9067	0,9611	0,6779
p	0,0005	0,0336	0,0036	0,0143	0,0121	0,0281
p<0,05	*	*	*	*	*	*
p<0,01	**		**			

### Paso 10. Cálculo de la probabilidad de deforestación y reforestación para cada píxel

La distribución de la probabilidad de deforestación 1999-2011 exhibe una forma semejante a la campana de Gauss (figura 9). La probabilidad de deforestación promedio proyectada es 0,071 (mín. 0,066, máx. 0,075) y el umbral de probabilidad es 0,119 (mín. 0,112, máx. 0,125). La distribución de la probabilidad de reforestación 1999-2011 tiene forma bimodal (figura 10). La probabilidad de reforestación promedio proyectada es 0,147 (mín. 0,122, máx. 0,171) y el umbral de la probabilidad es 0,238 (mín. 0,224, máx. 0,245). La probabilidad de deforestación es elevada cerca de las áreas clareadas, caminos y ríos, mientras que la probabilidad de reforestación es alta cerca de los bosques existentes.

### Paso 11. Proyección de las futuras deforestación y reforestación

La deforestación neta proyectada en el área de investigación totalizará 13 000±3000 ha en el período 1999-2011, ocurriendo a una tasa de 0,003±0,0007 año<sup>-1</sup>, y totalizará 33 000±7000 ha en el periodo 2006-2035 (cuadros 10, 11). El área bruta de deforestación proyectada en las 7000 ha propuestas para Área Municipal de Conservación de Chontabamba totalizará 100 ha (mín. 70 ha, máx. 150 ha) en el periodo 2006-2035.

El área bruta de reforestación proyectada dentro del área de investigación totalizará 8500±1500 ha en el periodo 1999-2011, correspondiéndole una tasa de 0,0012 año<sup>-1</sup> (mín. 0,01 año<sup>-1</sup>, máx. 0,014 año<sup>-1</sup>), y totalizará 24 000±4000 ha en el periodo 2006-2035 (cuadros 11, 12). El área bruta de reforestación proyectada en

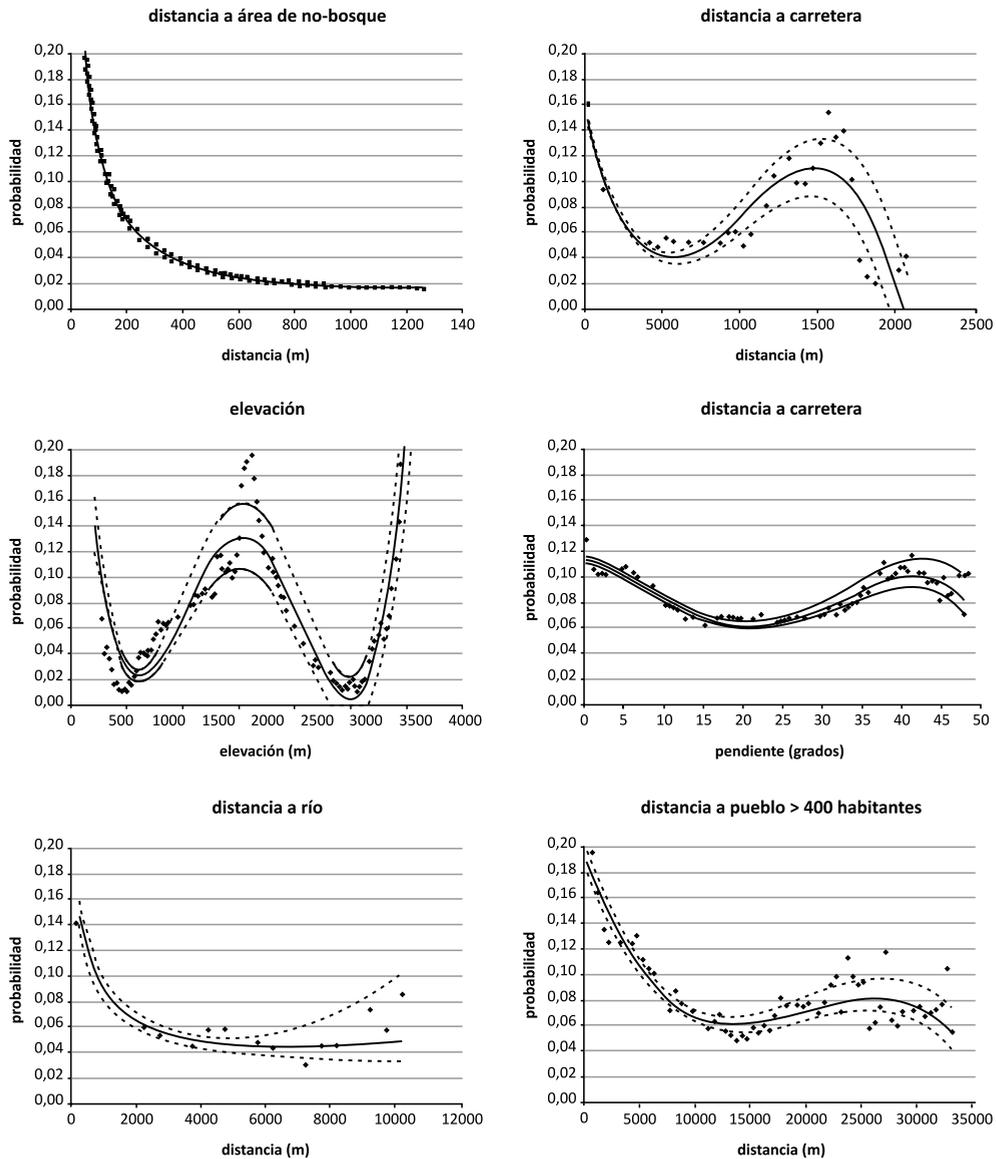
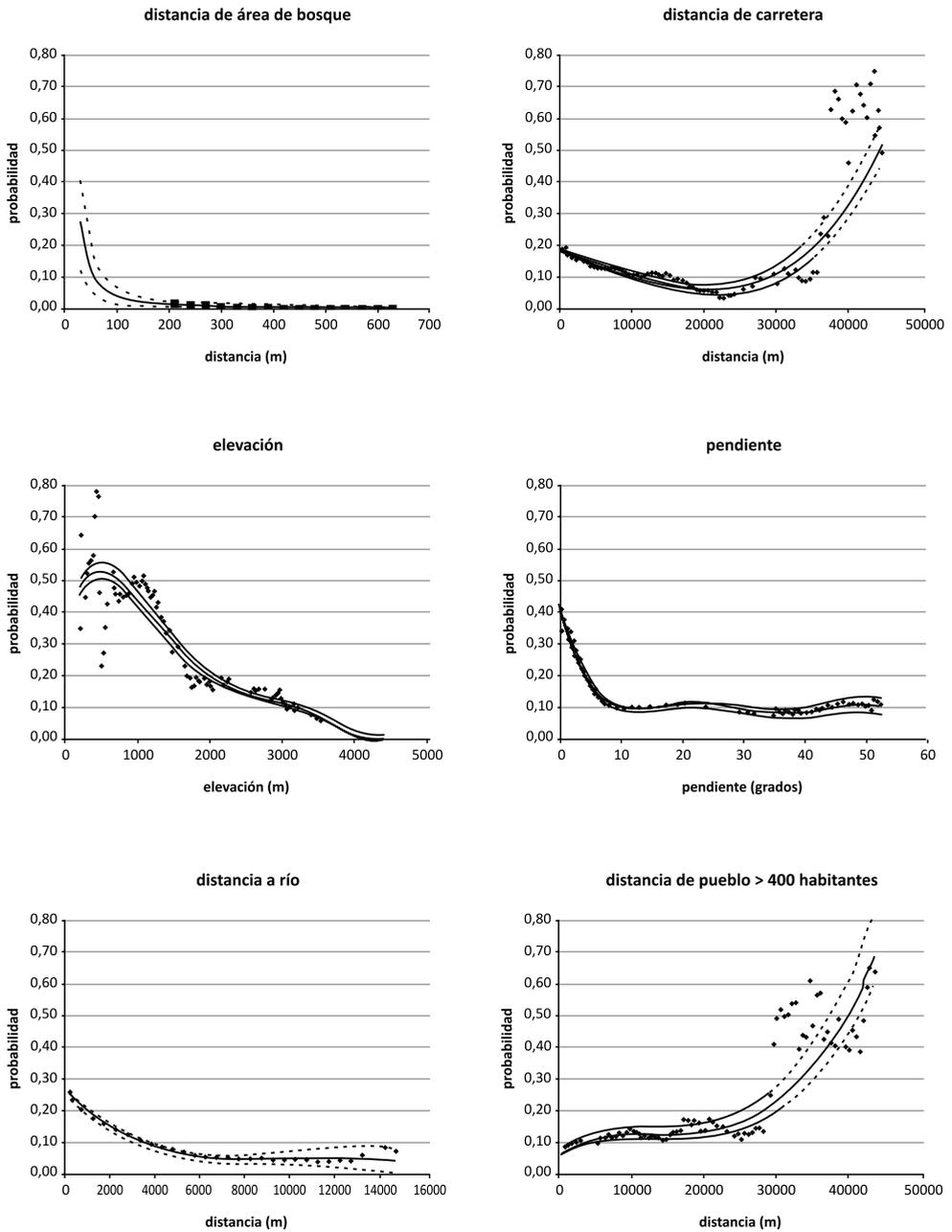


Figura 7. Funciones de probabilidad de deforestación, derivadas de las observaciones 1987-1999 (cuadro 8)

las 7000 ha de reforestación por fajas de enriquecimiento totalizará  $2600 \pm 400$  ha en el período 2006-2035.

Estas tendencias producirían, para 2011, una cobertura vegetal más dispersa y una vegetación baja a lo largo de ríos y en el área de Villa Rica, mientras que la reforestación proyectada para 1999-2011 se concentra a lo largo del río Palcazú (figura 11).



**Figura 8.** Funciones de probabilidad de reforestación, derivadas de las observaciones 1987-1999 (cuadro 9)

**Cuadro 10.** Coberturas forestales (selva central, Perú):  
observada 1987-1999 y proyectada 1999-2011

	1987 ha	1999 ha	2011 central ha	2011 alto ha	2011 bajo ha	1999-2011 central ha
bosque cerrado	285 000	281 000	266 000	265 000	267 000	-15 000
bosque abierto	44 000	28 000	30 000	28 000	31 000	2 000
total bosque	329 000	309 000	295 000	293 000	298 000	-13 000
vegetación baja	15 000	28 000	33 000	34 000	31 000	5 000
vegetación rala		30 000	38 000	39 000	37 000	9 000
total tierra no-bosque	23 000	58 000	71 000	74 000	68 000	13 000
total tierra no-nubes	38 000	366 000	366 000	366 000	366 000	0
nubes, sombra, agua	366 000	109 000	109 000	109 000	109 000	0
total área de análisis	109 000	476 000	476 000	476 000	476 000	0
	476 000					

**Cuadro 10.** (Continuación)...

	1999-2011 alto ha	1999-2011 bajo ha	1999-2011 central año <sup>-1</sup>	1999-2011 alto año <sup>-1</sup>	1999-2011 bajo año <sup>-1</sup>
bosque cerrado	-16 000	-14 000	-0,004	-0,005	-0,004
bosque abierto	0	3 000	0,002	0,000	0,007
total bosque	-16 000	-11 000	-0,003	-0,004	-0,003
vegetación baja	6 000	3 000	0,027	0,033	0,013
vegetación rala	10 000	8 000	0,031	0,035	0,026
total tierra no-bosque	16 000	11 000	0,029	0,034	0,024
total tierra no-nubes	0	0	0	0	0
nubes, sombra, agua	0	0	0	0	0
total área de análisis	0	0	0	0	0

**Cuadro 11.** Cambio observado de la cobertura forestal 1987-1999, cambio proyectado

cambio del bosque	cambio bruto		1999-2011					
	1987-1999		central	alto	bajo	central	alto	bajo
	ha	y <sup>-1</sup>	ha	ha	ha	y <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>	y <sup>-1</sup>
bosque	297 000		287 000	286 000	288 000			
reforestación	12 000	0,026	9 000	7 000	10 000	0,012	0,01	0,014
deforestación	32 000	-0,008	22 000	23 000	20 000	-0,0059	-0,0062	-0,0055
no-bosque	26 000		49 000	51 000	48 000			
total tierra no-nubes	366 000		366 000	366 000	366 000			

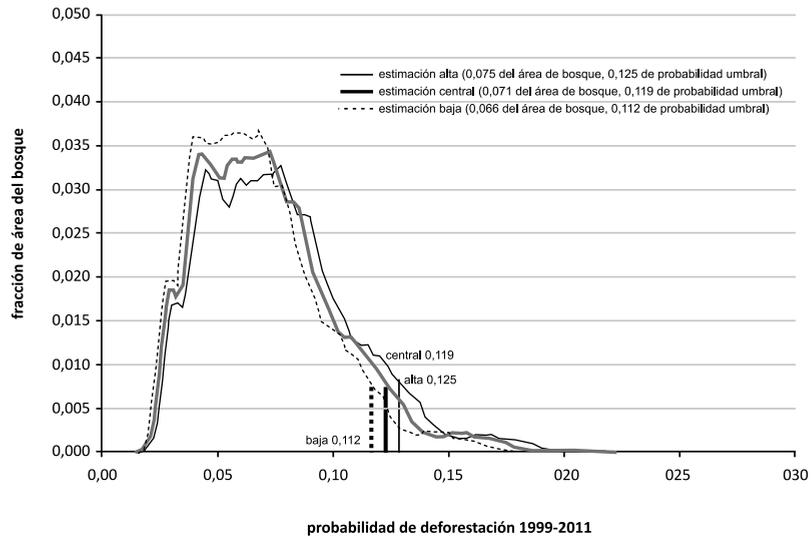


Figura 9. Probabilidad de deforestación 1999-2011, selva central

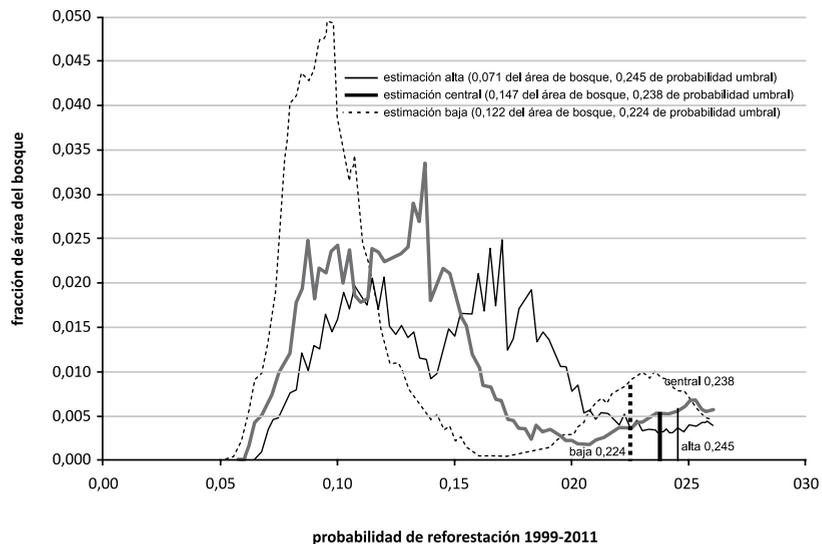
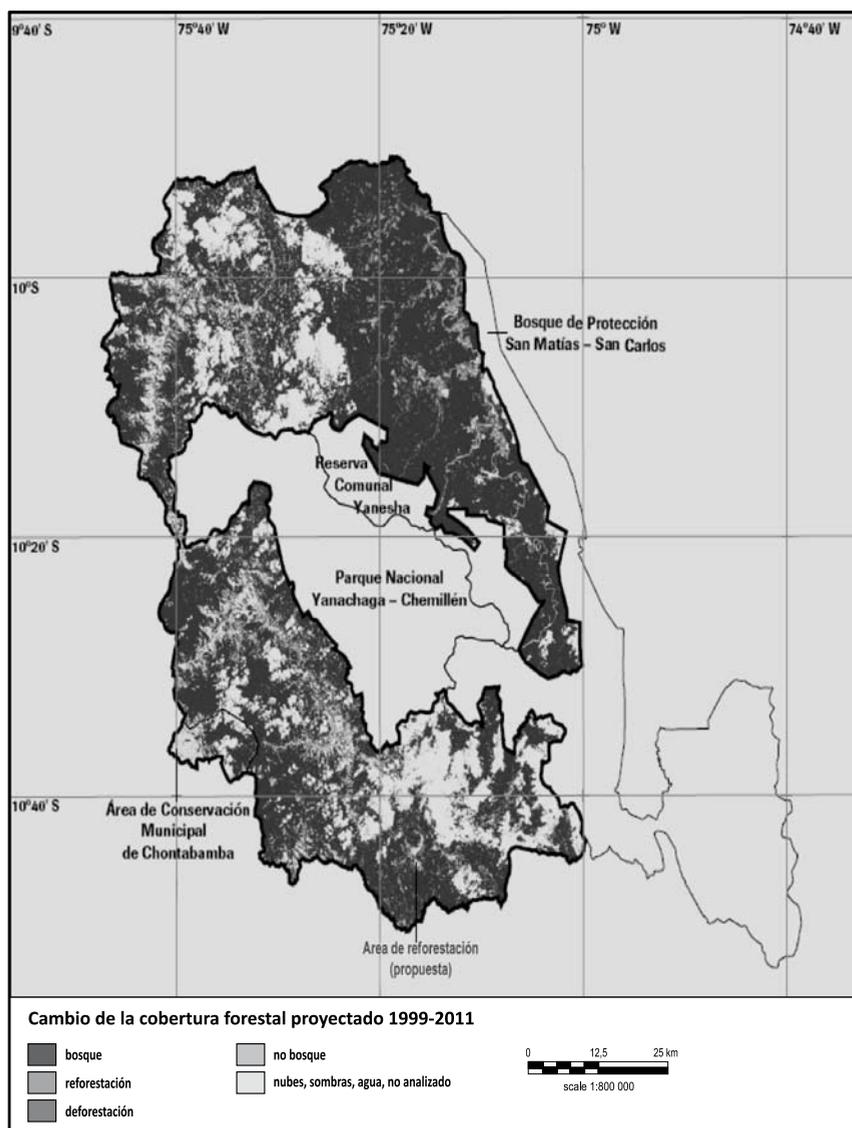


Figura 10. Probabilidad de reforestación 1999-2011, selva central

## Paso 12. Proyección de líneas base futuras de emisión y remoción

La línea base de emisiones de carbono en las 7000 ha propuestas para *Área de Conservación Municipal de Chontabamba* totalizaría 10000 t de carbono (mín. 6000 t, máx. 18 000 t) en el periodo 2006-2035. La línea base de remoción de carbono en las 7 000 ha propuestas para *plantaciones en fajas de enriquecimiento* totalizaría 73 000 t de carbono (mín. 30 000 t, máx. 120 000 t) en el mismo periodo.



**Figura 11.** Cambio proyectado de la cobertura forestal 1999-2011

El carbono sobre la superficie del suelo en vegetación viva, dentro del área proyectada decrecerá desde 35 millones $\pm$ 4 millones t en 1987 a 34 millones $\pm$ 4 millones t en 1999. Los valores proyectados de carbono sobre la superficie del suelo en vegetación viva disminuirán hasta 33 millones $\pm$ 4 millones t en 2006, 32 millones $\pm$ 4 millones t en 2011 y 29 millones $\pm$ 3 millones t en 2035 (figura 12). La línea base proyectada de emisiones netas de carbono en los 4800 km<sup>2</sup> del área de investigación totalizarían 4,1 millones t (mín. 3,2 millones t, máx. 5,1 millones t) en el periodo 2006-2035.

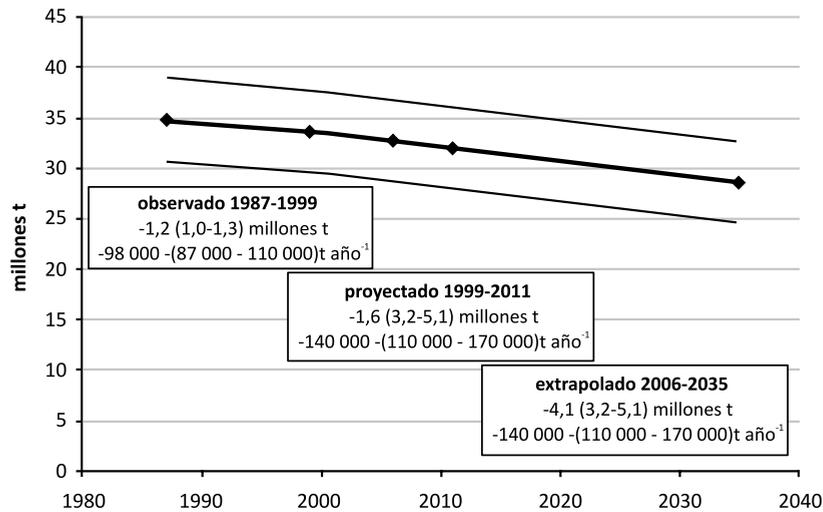


Figura 12. Carbono sobre la superficie del suelo

### Paso 13. Estimación de la captura de carbono futura debido al proyecto forestal propuesto

La propuesta *Área de Conservación Municipal de Chontabamba*, de 7000 ha, podría evitar emisiones de carbono en una línea base de 10 000 t (mín. 6 000 t, máx. 18 000 t) en el periodo 2006-2035.

El área propuesta de 7000 ha para *fajas de enriquecimiento* podría producir 310 000 t (mín. 170 000 t, máx. 430 000 t) de carbono en el periodo 2006-2035. Entonces, la reforestación propuesta podría capturar 230 000 t (mín. 140 000 t, máx. 310 000 t) de carbono adicionales por encima de la línea base de remoción en el periodo 2006-2035 (figura 13, cuadro 12).

Cuadro 12. Captura de carbono estimada 2006-2035, proyecto selva central

	área (ha)	estimación central (t)	estimación alta (t)	estimación baja (t)
<b>Captura de carbono por reforestación</b>				
reneración natural	5 600	270 000	170 000	370 000
plantación en fajas	1 400	40 000	30 000	60 000
suma	7 000	310 000	200 000	430 000
línea base de reforestación	2600±400	70 000	40 000	120 000
carbono adicional del proyecto		230 000	160 000	310 000
<b>deforestación evitada por la conservación</b>				
Chontabamba	7 000	10 000	14 000	8 000

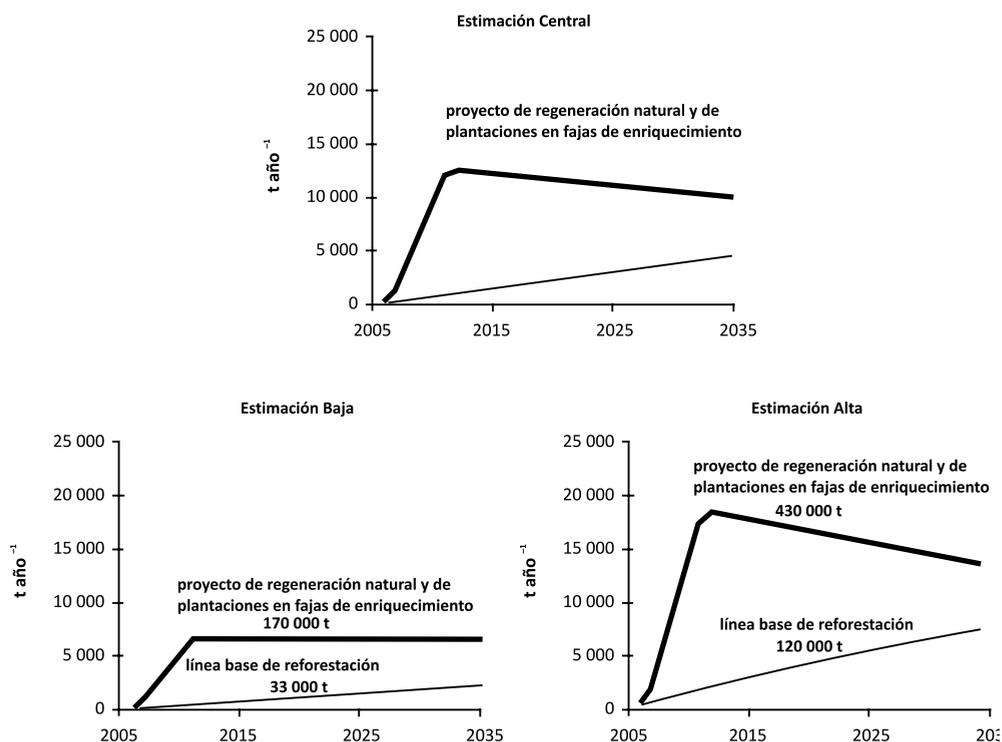


Figura 13. Estimaciones de carbono de la línea base y del proyecto de reforestación 2006-2035

## Conclusiones

Esta investigación aplicada ha producido nuevos datos:

1. de inventario forestal,
2. de sensores remotos,
3. de patrones de especies,
4. acerca del éxito de medidas de conservación,
5. sobre la densidad de carbono del bosque, y
6. acerca de la amenaza de deforestación.

Los datos revelan que selva central alberga una diversidad biológica significativa, así como importantes depósitos forestales de carbono. Un proyecto planificado de conservación y reforestación podría incrementar en forma significativa la provisión de servicios ecológicos de este bosque tropical lluvioso.

A través de este trabajo de investigación ha sido desarrollado el análisis de la restauración del carbono por el bosque (abreviado FRCA, de la expresión en inglés "Fo-

rest Restoration Carbon Análisis”), un método que determina patrones de especies forestales, cuantifica las tasas de deforestación y reforestación, y proyecta las líneas base futuras de emisiones y remoción de carbono en la restauración de bosques biológicamente significativos.

## Bibliografía

- ACHARD, F.; H.D. EVA; H.J. STIBIG; P. MAYAUX; J. GALLEGU; T. RICHARDS; J.P. MALINGREAU. 2002. Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297: 999-1002.
- ÁLVAREZ, N.L.; L. NAUGHTON-TREVES. 2003. Linking national agrarian policy to deforestation in the Peruvian Amazon: A case study of Tambopata, 1986-1997. *Ambio* 32: 269-274
- ARÓSTEGUI, A. 1974. Características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- ASNER, G.P.; D.E. KNAPP; E.N. BROADBENT; P.J.C. OLIVEIRA; M. KELLER; J.N. SILVA. 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310: 480-482.
- BAKER, T.R.; O.L. PHILLIPS; Y. MALHI; S. ALMEIDA; L. ARROYO; A. DI FIORE; T. ERWIN; N. HIGUCHI; T.J. KILLEEN; S.G. LAURANCE; W.F. LAURANCE; S.L. LEWIS; A. MONTEAGUDO; D.A. NEILL; P.N. VARGAS; N.C.A. PITMAN; J.N.M. SILVA; R.V. MARTÍNEZ. 2004A. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 353-365.
- BAKER, T.R.; O.L. PHILLIPS; Y. MALHI; S. ALMEIDA; L. ARROYO; A. DI FIORE; T. ERWIN; T.J. KILLEEN; S.G. LAURANCE; W.F. LAURANCE; S.L. LEWIS; J. LLOYD; A. MONTEAGUDO; D.A. NEILL; S. PATIÑO; N.C.A. PITMAN; J.N.M. SILVA; R.V. MARTÍNEZ. 2004b. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10: 545-562.
- BARRENA, V.; J. DANCÉ; D. SÁENZ. 1986. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú* 13: 3-12.
- BARRENA, V. 1988. La regresión ponderada en la elaboración de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú* 15: 21-28.
- BRAKO, L.; J.L. ZARUCCHI. 1993. Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru (Catálogo de las angiospermas y gimnospermas del Perú). Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO.
- BUNKER, D.E.; F. DECLERCK; J.C. BRADFORD; R.K. COLWELL; I. PERFECTO; O.L. PHILLIPS; M. SANKARAN; S. NAEEM. 2005. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science* 310: 1029-1031.

- BUSH, M.B.; M.R. SILMAN; D.H. URREGO. 2004. 48,000 years of climate and forest change in a biodiversity hot spot. *Science* 303: 827-829.
- CATTELL, R. B. 1966. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research* 1: 245-276.
- CHAMBERS, J.Q.; J. DOS SANTOS; R.J. RIBEIRO; N. HIGUCHI. 2001a. Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in a tropical forest. *Forest Ecology and Management* 152: 73-84.
- CHAMBERS, J.Q.; J.P. SCHIMEL; A.D. NOBRE. 2001b. Respiration from coarse wood litter in Central Amazon Forests. *Biogeochemistry* 52: 115-131.
- CHAMBERS, J.Q.; W.L. SILVER. 2004. Some aspects of ecophysiological and biogeochemical responses of tropical forests to atmospheric change. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 463-476.
- CHAVE, J.; R. CONDIT; S. AGUILAR; A. HERNANDEZ; S. LAO; R. PEREZ. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 409-420.
- CHAZDON, R.L.; A.R. BRENES; B.V. ALVARADO. 2005. Effects of climate and stand age on annual tree dynamics in tropical second-growth rain forests. *Ecology* 86: 1808-1815.
- CONDIT, R.; N. PITMAN; E.G. LEIGH; JR., J. CHAVE; J. TERBORGH; R.B. FOSTER; P. NÚÑEZ; S. AGUILAR; R. VALENCIA; G. VILLA; H.C. MULLER-LANDAU; E. LOSOS; S.P. HUBBELL. 2002. Beta-diversity in tropical forest trees. *Science* 295:666-669.
- CUMMINGS, C.L.; J.B. KAUFFMAN; D.A. PERRY; Y.R. HUGHES. 2002. Aboveground biomass and structure of rainforests in the southwestern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management* 153:293-307.
- D'ANGELO, S.A.; A.C.S. ANDRADE; S.G. LAURANCE; W.F. LAURANCE; R.C.G. MESQUITA. 2004. Inferred causes of tree mortality in fragmented and intact Amazonian forests. *Journal of Tropical Ecology* 20: 243-246.
- DE BARROS FERRAZ, S.F.; C.A VETTORAZZI; D.M. THEOBALD; M.V.R. BALLESTER. 2005. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: Assessment and future scenarios. *Forest Ecology and Management* 204: 69-85.
- DEWALT, S.J.; J. CHAVE. 2004. Structure and biomass of four lowland Neotropical forests. *Biotropica* 36: 7-19.
- FEARNSIDE, P.M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 90: 59-87.
- FEARNSIDE, P.M.; W.F. LAURANCE. 2004. Tropical deforestation and greenhouse-gas emissions. *Ecological Applications* 14: 982-986.

- FELDPAUSCH, T.R.; M.A. RONDON; E.C.M. FERNANDES; S.J. RIHA. 2004. Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. *Ecological Applications* 14: S164-S176.
- GENTRY, A. 1993. Overview of the Peruvian flora. In Brako, L. y J.L. Zarucchi. *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru (Catálogo de las angiospermas y gimnospermas del Perú)*. Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO.
- GONZÁLEZ, P.; B. KROLL, C.R. VARGAS. 2004. Forest restoration carbon analysis in moist tropical forest at La Selva Central, Perú. *Ecological Society of America Annual Meeting Abstracts* 89: 182.
- HAMLIN, C.C.; J. SALICK. 2003. Yanesha Agriculture in the Upper Peruvian Amazon: Persistence and Change Fifteen Years Down the 'Road'. *Economic Botany*, Volume 57, Issue 2: 163-180
- HOTELLING, H. 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology* 24: 417-441, 498-520
- HOWARTH, P.J.; G.M. WICKWARE. 1981. Procedures for change detection using Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing* 2: 277-291.
- HUGHES, R.F.; J.B. KAUFFMAN; V.J. JARAMILLO. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* 80: 1892-1907.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI). 1997. *Compendio Estadístico Departamental 1996-1997*. Departamento: Pasco. INEI, Lima, Perú.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI). 2001. *Perú: Proyecciones de Población por Años Calendario según Departamentos, Provincias, y Distritos (Periodo, 1990-2002)*. INEI, Lima, Perú.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2001a. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge. University Press, Cambridge, UK
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2001b. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- JENKINS, J.C.; D.C. CHOJNACKY; L.S. HEATH; R.A. BIRDSEY. 2004. *Comprehensive Database of Diameter-based Biomass Regressions for North American Tree Species*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Newtown Square, PA.
- KETTERINGS, Q.M.; R. COE; M. VAN NOORDWIJK; Y. AMBAGAU; C.A. PALM. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 201-211.

- KING, D.A. 1996. Allometry and life history of tropical trees. *Journal of Tropical Ecology* 12: 25-44.
- LAURANCE, W.F.; A.K.M. ALBERNAZ; G. SCHROTH; P.M. FEARNSTIDE; S. BERGEN; E.M. VENTICINQUE; C. DA COSTA. 2002. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography* 29: 1-12.
- LAURANCE, W.F.; S.G. LAURANCE; L.V. FERREIRA; J.M. RANKIN-DE MERONA; C. GASCON; T.E. LOVEJOY. 1997. Biomasa collapse in Amazonian forest fragments. *Science* 278: 1117-1118.
- LAURANCE, W.F.; A.A. OLIVEIRA; S.G. LAURANCE; R. CONDIT; H.E.M. NASCIMENTO; A.C. SÁNCHEZ-THORIN; T.E. LOVEJOY; A. ANDRADE; S. D'ANGELO; J.E. RIBEIRO; C.W. DICK. 2004. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. *Nature* 428: 171-175.
- LEWIS, S.L.; O.L. PHILLIPS; T.R. BAKER; J. LLOYD; Y. MALHI; S. ALMEIDA; N. HIGUCHI; W.F. LAURANCE; D.A. NEILL; J.N.M. SILVA; J. TERBORGH; A.T. LEZAMA; R.V. MARTÍNEZ; S. BROWN; J. CHAVE; C. KUEBLER; P.N. VARGAS; B. VINCETI. 2004. Concerted changes in tropical forest structure and dynamics: Evidence from 50 South American longterm plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 421-436.
- LU, D.; P. MAUSEL; E. BRONDI'ZIO; E. MORÁN. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25: 2365-2407.
- MATTHEWS, E.; R. PAYNE; M. ROHWEDER; S. MURRAY. 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Forest Ecosystems. World Resources Institute, Washington, DC.
- MCCLAIN, M.E.; R.E. COSSÍO. 2003. The use and conservation of riparian zones in the rural Peruvian Amazon. *Environmental Conservation* 30: 242-248.
- NALVARTE, W.; B. KROLL; I. LOMBARDI. 1993. Plan Maestro - Unidad Modelo de Manejo y Producción Forestal Dantas. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- NATURE CONSERVANCY. 2001. Conservation by Design. The Nature Conservancy. Arlington, VA.
- NEEFF, T.; J.R. DOS SANTOS. 2005. A growth model for secondary forest in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management* 216: 270-282.
- NELSON, B.W.; R. MESQUITA; J.L.G. PEREIRA; S.G.A. DE SOUZA; G.T. BATISTA; L.B. COUTO. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management* 117: 149-167.
- OLSON, D.M.; E. DINERSTEIN; E.D. WIKRAMANAYAKE; N.D. BURGESS; G.V.N. POWELL; E.C. UNDERWOOD; J.A. D'AMICO; I. ITOUA; H.E. STRAND; J.C. MORRISON; C.J. LOUCKS; T.F. ALLNUTT; T.H. RICKETTS; Y. KURA; J.F. LAMOREUX; W.W. WETTEN-

- GEL; P. HEDAO; K.R. KASSEM. 2001. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *Bioscience* 51: 933-938.
- OLSON, J.S.; J.A. WATTS; L.J. ALLISON. 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (ONERN). 1985. Los Recursos Naturales del Perú. ONERN, Lima, Perú.
- PEARSON, K. 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine* 6: 559-572.
- PEÑA-CLAROS, M. 2003. Changes in forest structure and species composition during secondary forest succession in the Bolivian Amazon. *Biotropica* 35: 450-461.
- PHILLIPS, O.L.; Y. MALHI; B. VINCETI; T. BAKER; S.L. LEWIS; N. HIGUCHI; W.F. LAURANCE; P.N. VARGAS; R.V. MARTINEZ; S. LAURANCE; L.V. FERREIRA; M. STERN; S. BROWN; J. GRACE. 2002. Changes in growth of tropical forests: Evaluating potential biases. *Ecological Applications* 12: 576-587.
- PITMAN, N.C.A.; J. TERBORGH; M.R. SILMAN; P. NÚÑEZ. 1999. Tree species distributions in an upper Amazonian forest. *Ecology* 80: 2651-2661.
- PITMAN, N.C.A.; J.W. TERBORGH; M.R. SILMAN; P. NÚÑEZ; D.A. NEILL; C.E. CERÓN; W.A. PALACIOS; M. AULESTIA. 2002. A comparison of tree species diversity in two upper Amazonian forests. *Ecology* 83: 3210-3224.
- RICE, A.H.; E.H. PYLE; S.R. SALESKA; L. HUTYRA; M. PALACE; M. KELLER; P.B. DE CAMARGO; K. PORTILHO; D.F. MARQUES; S.C. WOFSY. 2004. Carbon balance and vegetation dynamics in an old-growth Amazonian forest. *Ecological Applications* 14: S55-S71.
- RICHARDS, P.W. 1996. *The Tropical Rain Forest*. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- SALDARRIAGA, J.G.; D.C. WEST; M.L. THARP; C. UHL. 1988. Long term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology* 76: 938-958.
- TER STEEGE, H.; N. PITMAN; D. SABATIER; H. CASTELLANOS; P. VAN DER HOUT; D.C. DALY; M. SILVEIRA; O. PHILLIPS; R. VÁSQUEZ; T. VAN ANDEL; J. DUIVENVOORDEN; A.A. DE OLIVEIRA; R. EK; R. LILWAH; R. THOMAS; J. VAN ESSEN; C. BAIDER; P. MAAS; S. MORI; J. TERBORGH; P. NÚÑEZ VARGAS; H. MOGOLLÓN; W. MORAWETZ. 2003. A spatial model of tree alpha-diversity and density for the Amazon region. *Biodiversity and Conservation* 12: 2255-2277.
- TERBORGH, J.; E. ANDRESEN. 1998. The composition of Amazonian forests: Patterns at local and regional scales. *Journal of Tropical Ecology* 14: 645-664.

- TERBORGH, J.; R.B. FOSTER; P. NÚÑEZ V. 1996. Tropical tree communities: A test of the nonequilibrium hypothesis. *Ecology* 77: 561-567.
- TER-MIKAELIAN, M.T.; M.D. KORZUKHIN. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- UNITED STATES GLOBAL CHANGE RESEARCH PROGRAM (USGCRP). 2001. *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2003. *Landsat: A global land observing program*. USGS, Reston, VA.
- VAN DER WERFF, H.; T. CONSIGLIO. 2004. Distribution and conservation significance of endemic species of flowering plants in Peru. *Biodiversity and Conservation* 13: 1699-1713
- WALKER, R.; S.A. DRZYZGA; Y. LI; J. QI; M. CALDAS; E. ARIMA; D. VERGARA. 2004. A behavioral model of landscape change in the Amazon Basin: The colonist case. *Ecological Applications* 14: S299–S312.
- WHITTAKER, R.H. 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30: 279-338.
- WHITTAKER, R.H. 1972. Evolution and the measurement of species diversity. *Taxon* 21: 213-251.
- ZARIN, D.J.; E.A. DAVIDSON; E. BRONDIZIO; I.C.G. VIEIRA; T. SÁ; T. FELDPAUSCH; E.A.G. SCHUUR; R. MESQUITA; E. MORAN; P. DELAMONICA; M.J. DUCEY; G.C. HURTT; C. SALIMON; M. DENICH. 2005. Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3: 365-369.