



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

CATIE
Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Programa Regional de Cambio Climático de USAID

Insumos metodológicos para el establecimiento de niveles de referencia para REDD+: deforestación y recuperación de cobertura forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua

Argotty, F
Zamora Pereira, JC
Brenes Pérez, C
Schlesinger, P
Cifuentes Jara, M
Imbach, P



En coordinación con



Insumos metodológicos para el establecimiento de niveles de referencia para REDD+: deforestación y recuperación de cobertura forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua

Freddy Argotty
Juan Carlos Zamora
Christian Brenes
Peter Schlesinger
Miguel Cifuentes
Pablo Imbach

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2017

ISBN 978-9977-57-670-1

634.98

159 Insumos metodológicos para el establecimiento de niveles de referencia para REDD+: Deforestación y recuperación de cobertura forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua / Freddy Argotty... [et al.]. – 1ª ed. – Turrialba, C.R : CATIE, 2017. 88 p. : il. – (Serie técnica. Informe técnico / CATIE ; no. 408)

ISBN 978-9977-57-670-1

1. REDD+ – Metodología – Nicaragua 2. Deforestación – Nicaragua
3. Dióxido de carbono – Emisión de contaminantes – Nicaragua I. Argotty, Freddy.
II. Zamora, Juan Carlos III. Brenes, Christian IV. Schlesinger, Peter. V. Chacón, Mario
VI. Cifuentes Jara, Miguel VII. Imbach, Pablo A. VIII. CATIE IX. Título X. Serie.

Forma sugerida para citar este documento:

Argotty, F; Zamora Pereira, JC; Brenes Pérez, C; Schlesinger, P; Cifuentes Jara, M; Imbach, P. 2017. Insumos metodológicos para el establecimiento de niveles de referencia para REDD+: deforestación y recuperación de cobertura forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Laboratorio de Modelado Ambiental. 86 p. (Serie técnica. Informe técnico, no.#).

La elaboración de este informe fue posible gracias al Programa Regional de Cambio Climático de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) bajo los términos del Acuerdo Cooperativo No. AID 596-A-13-00002 (Programa de Cambio Climático Regional USAID), ejecutado por el CATIE, IUCN, CARE International y TerraGlobal Capital LLC. Los contenidos y opiniones expresadas aquí son responsabilidad del Programa Regional de Cambio Climático de USAID y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID o del Gobierno de los Estados Unidos.

Los autores expresan su agradecimiento a Jenny Ordoñez y Geovanna Carreño (ICRAF) por facilitar la obtención de puntos de control en campo para clasificar y validar el mapa de la cobertura de uso del suelo. Además, a Mario Chacón por sus contribuciones para mejorar el contenido del mismo.

Contenido

Resumen ejecutivo	9	Clasificación de cobertura fraccional	33
Presentación	10	Segmentación (clasificación de objetos)	34
Introducción	11	Árboles de clasificación (<i>Random Forest</i>)	34
Objetivos	12	Validación del mapa de uso de la tierra y cobertura forestal 2014	35
Contexto bajo el cual se realizó este estudio	13	Resultados de la preparación y procesamiento de las imágenes	37
El estado de los recursos forestales en Nicaragua	13	Preprocesamiento de las imágenes de radar	37
La Estrategia Nacional de Deforestación y Degradación Forestal Evitada (ENDE-REDD+)	13	Cobertura fraccional y clasificación bosque/no bosque	38
Caracterización de la RACCN	15	Enmascaramiento de imágenes Landsat	38
Suelos	15	Clasificación	38
Biodiversidad y áreas protegidas	15	Validación	38
El rol de la RACCN como área prioritaria para la conservación	16	Análisis de cambios históricos de usos de la tierra	42
Definición del marco metodológico: conceptos básicos y consideraciones generales	18	Información utilizada para estimar los determinantes de cambio de uso de la tierra	42
Consideraciones sobre niveles de referencia forestal (NRF) para REDD+	18	Resultados sobre el análisis histórico del cambio de uso	43
Ámbito y selección de actividades REDD+	21	Proyección de la deforestación a futuro	48
Definición de bosque	22	Modelado del escenario futuro de deforestación	48
Datos de actividad (DA) y representación de tierra	22	Modelado de deforestación con DINAMICA-EGO	49
Factores de emisión (FE) y depósitos de carbono	22	Resultados sobre la proyección futura de la deforestación	51
Escala, área de contabilidad y periodo de referencia	24	Definición de los determinantes o causas de deforestación en la RACCN	51
Categorías principales de uso y cobertura del suelo	25	Futuro de deforestación y recuperación de bosque en la RACCN (2034)	57
Cambios en las reservas o existencias de carbono	25	Estimación de emisiones y remociones de CO₂ en la RACCN	60
Método de diferencia de existencias	26	Metodología para el cálculo de emisiones y remociones	60
Método de ganancias y pérdidas	27	Cálculo de emisiones	60
Principios de contabilidad para el reporte	27	Estimación de datos de actividad (DA)	61
Preparación de imágenes y elaboración de mapas de cobertura del suelo	29	Nivel de factores de emisión	61
Imágenes utilizadas y criterios para la selección de imágenes satelitales	29	Resultados de la estimación de la cantidad de emisiones y remociones de CO ₂ eq en el periodo 2000-2014 y proyecciones al 2034 para las tierras forestales de la RACCN	61
Unidad Mínima de Mapeo (UMM)	30	Análisis espacial de las emisiones y remociones de carbono en los bosques de la RACCN (2014-2034)	62
Definición de bosque	30	Conclusiones sobre la dinámica de emisiones y remociones de la RACCN	65
Procesamiento imágenes satelitales	30	Conclusiones y recomendaciones	66
Georreferenciación	30	Glosario	68
Calibración de imágenes	30	Literatura citada	71
Calibración radiométrica	31	Anexos	74
Calibración atmosférica	31		
Cobertura fraccional y clasificación de la cobertura boscosa	31		
Restauración de píxeles perdidos y bandeado	32		
Restauración del periodo 2000	32		
Restauración de periodo 2008 (ALOS PALSAR)	32		
Restauración de periodo 2014 (SENTINEL)	33		
Clasificación de imágenes en categorías de uso de suelo	33		

Índice de cuadros

Cuadro 1.	Cuantificación de la cobertura forestal de Nicaragua por diferentes fuentes de información	14
Cuadro 2.	Consideraciones del enfoque metodológico para el establecimiento de niveles de referencia en concordancia con la CMNUCC, el Marco Metodológico del Fondo de Carbono del Banco Mundial, el VCS y consideraciones para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	19
Cuadro 3.	Matriz de actividades de conversión para REDD+ según las categorías de uso del suelo del IPCC	21
Cuadro 4.	Descripción de las clases de uso de la tierra encontradas en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	23
Cuadro 5.	Depósitos de carbono a ser considerados en el análisis de factores de emisión por tipo de actividad	24
Cuadro 6.	Biomasa aérea de las coberturas del suelo y factores de emisión ($Mg\ ha^{-1}$) por actividad de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	24
Cuadro 7.	Matriz de confusión de la clasificación del mapa de uso/cobertura 2014	40
Cuadro 8.	Evaluación de la exactitud de la clasificación del mapa de uso/cobertura 2014	40
Cuadro 9.	Determinantes del uso y cambio de uso de la tierra evaluados para explicar la deforestación de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2000-2011	43
Cuadro 10.	Distribución relativa, absoluta y cambios de uso/cobertura, según tipo de uso/cobertura, RACCN, 2000, 2008, 2014	44
Cuadro 11.	Matriz de transición de uso/cobertura del suelo de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, 2000-2014	46
Cuadro 12.	Comparación entre modelos para simular espacialmente cambios en el uso de la tierra	51
Cuadro 13.	Desempeño general del modelo DINAMICA para la simulación de uso y cambio de uso de la tierra en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2000-2014	55
Cuadro 14.	Valores de biomasa aérea para las coberturas utilizados en el cálculo de los factores de emisión para las transiciones	61
Cuadro 15.	Existencias, emisiones y remociones de GEI para el periodo histórico de referencia para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2000-2014	62
Cuadro 16.	Balance de emisiones y remociones de GEI para el periodo futuro en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, 2014-2034	64
Cuadro 17.	Características espectrales y espaciales del sensor Landsat TM	78
Cuadro 18.	Características espectrales y espaciales del sensor Landsat ETM	78
Cuadro 19.	Características espectrales y espaciales del sensor Landsat LDCM	78
Cuadro 20.	Características espectrales y espaciales de ALOS-PALSAR	80
Cuadro 21.	Características espectrales y espaciales de SENTINEL 1A	81



Índice de figuras

Figura 1.	Mapa que describe la ubicación de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) en Nicaragua	16
Figura 2.	Proceso metodológico para determinar cambios históricos y futuros del uso de la tierra, emisiones y absorciones asociadas	19
Figura 3.	Área de contabilidad de emisiones y remociones del período 2000-2014 para los niveles de referencia forestales (NRF) de la Región Autónoma del Caribe Norte (RACCN), Nicaragua	26
Figura 4.	Eliminación de ruido en imágenes ALOS PALSAR (ejemplo tomado sobre el periodo 2008)	37
Figura 5.	Cobertura fraccional de bosque bajo diferentes umbrales de ajuste de PV (vegetación fotosintéticamente activa) y S (sustrato expuesto)	38
Figura 6.	Combinación de imágenes Landsat en color natural y separación bosque/no bosque con CLASlite	39
Figura 7.	Cobertura del suelo para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, según clasificación de imágenes satelitales para los años 2000, 2008 y 2014	40
Figura 8.	Métricas de desempeño de las clases evaluadas	41
Figura 9.	Distribución relativa de la cobertura de la tierra de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en 2000, 2008 y 2014	44
Figura 10.	Balance neto en la dinámica de cambio de uso/cobertura del suelo de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2000-2014	45
Figura 11.	Distribución espacial de la deforestación en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua. Periodo 2000-2014	46
Figura 12.	Grados de afectación del huracán Félix 2007 y deforestación estimada 2008-2014 para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	47
Figura 13.	Comportamiento de los coeficientes de pesos de evidencia para la transición tierra forestal a pasto en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	53
Figura 14.	Comportamiento de los pesos de evidencia de la variable seleccionada para la transición tierras forestales a Sabana Arbolada Temporalmente Anegada (SATA) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	54
Figura 15.	Coeficientes de pesos de evidencia para la transición tierras forestales a tierras agrícolas en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua	55
Figura 16.	Ajuste comparativo de la deforestación y tierras forestales remanentes, realizado mediante DINAMICA y la cobertura observada en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2008-2014	56
Figura 17.	Desempeño del modelo DINAMICA en polígonos de diferentes tamaños en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2008-2014	57
Figura 18.	Cambio de tierras forestales a otras tierras (deforestación) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, entre los años 2014 y 2034	58
Figura 19.	Cambio de otras tierras a tierras forestales (recuperación) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, entre los años 2014 y 2034	59
Figura 20.	Emisiones de CO ₂ eq en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, tomando en cuenta el efecto del huracán Félix, y sin este, en el área de tierras forestales	63
Figura 21.	Emisiones y remociones futuras para las tierras forestales de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua (se muestran los valores para el periodo 2014-2034)	63
Figura 22.	Mapeo del balance neto de las emisiones y remociones de carbono en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, entre el año 2014 y 2034	64

Acrónimos y siglas

ASDI	Agencia Sueca de Desarrollo Internacional
ASF	Alaska Satellite Facility
CCF-A	Consejo Consultivo Forestal y Ambiental
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático
DEM	Modelo de Elevación Digital (Digital Elevation Model)
ENDE-REDD+	Estrategia Nacional para Reducir la Deforestación y Degradación Forestal
FCPF	Fondo Cooperativo del Carbono de los Bosques
GCS	Estudio Comparativo Mundial sobre REDD+
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INAFOR	Instituto Nacional Forestal
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
INF	Inventario Nacional Forestal
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
JAXA	Agencia Espacial Japonesa (Japan Aerospace Exploration Agency)
LCM	Land Change Modeler
MAGFOR	Ministerio Agropecuario y Forestal
MARENA	Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales
MRV	Monitoreo, Reporte y Verificación
NRF	Niveles de Referencia Forestal
NREF	Niveles de Referencia de Emisiones Forestales
RACCN	Región Autónoma de la Costa Caribe Norte de Nicaragua
RACCS	Región Autónoma de la Costa Caribe Sur de Nicaragua
REDD+	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal, Conservación, Gestión Sostenible y Aumento de las Reservas de Carbono de los Bosques
R-PP	Propuesta para la Preparación (Readiness Preparation Proposal)
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINIA	Sistema Nacional de Información Ambiental
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
UN-REDD	Programa Colaborativo de las Naciones Unidas para Reducir Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal en los Países en Desarrollo
URACCAN	Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey)
UTCUTS	Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura
VCS	Estándar Verificado de Carbono (Verified Carbon Standard)
VCS-JNR	Requerimientos para REDD+ jurisdiccional y anidado del VCS



Resumen ejecutivo

Cambios de uso de la tierra, como la deforestación y recuperación de cobertura forestal, influyen en la emisión y remoción de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, lo cual ha incentivado que países como Nicaragua, estén preparando estrategias de reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD+) o de restauración de bosques bajo iniciativas como el “Desafío de Bonn” o la Iniciativa 20x20. Dentro de este contexto, CATIE, a través del Programa Regional de Cambio Climático de USAID, realizó un análisis de cambio de uso de la tierra, como parte del desarrollo de la Estrategia de Restauración de Paisajes de la RACCN, liderado por la UICN y en coordinación con las autoridades locales del Consejo Consultivo Forestal de la RACCN. Como parte de este proceso se definió y ejecutó una metodología novedosa que reemplaza datos ópticos de Landsat con problemas de bandeo, presencia de nubes y sombras, por datos de Radar (ALOS-PALSAR y Sentinel). De esta forma, se crearon, por primera vez, mapas de cobertura de la tierra con información completa para la RACCN.

Para estimar la deforestación y la recuperación de la cobertura forestal en la RACCN, se contempló los requerimientos de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y, como soporte técnico y metodológico, las metodologías del Estándar Verificado de Carbono (VCS, por sus siglas en inglés), buscando cumplir con los principios de contabilidad y reporte del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus

siglas en inglés). El estudio incluyó tres periodos de estudio (2000-2008-2014), realizando una cuantificación de las pérdidas y recuperación de tierras forestales, así como sus consecuentes emisiones y remociones de carbono. El proceso se realizó utilizando un proceso metodológico uniforme para todo el periodo, asegurando la consistencia del análisis y reduciendo las incertidumbres asociadas a los estimados de cambios de cobertura y la dinámica de emisiones. Finalmente, mediante el análisis de los determinantes de la deforestación y recuperación de cobertura forestal, se logró una proyección futura de los cambios de cobertura de la tierra para el período 2014-2034.

Este estudio estimó una emisión neta de 22,7 millones de MgCO_2eq para el periodo histórico de referencia. Además, se identificaron focos de deforestación potencial en los municipios de Siuna, Puerto Cabezas, Prinzapolka, y Rosita, y de restauración en los municipios de Prinzapolka, Waspán y Puerto Cabezas. La información generada en este análisis permitirá a las autoridades en la RACCN planificar el mejor uso de sus recursos forestales y, potencialmente, también tener un acercamiento a su nivel de referencia de emisiones de carbono.



Presentación

El Programa Regional de Cambio Climático de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) es una plataforma que nace con el objetivo de apoyar el desarrollo de ideas y acciones innovadoras que mejoran los medios de vida de las poblaciones, mientras procuran la provisión de bienes y servicios, en medio de la afectación por el cambio climático que vive la región.

En el marco de este programa, el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) favorece la armonización técnica y metodológica de los procesos relacionados con uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés), el mecanismo de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD+), inventarios forestales nacionales, los sistemas de medición, reporte y verificación (MRV) y la construcción de niveles de referencia de emisiones forestales para REDD+.

El presente trabajo se realizó en apoyo a las labores que la UICN realiza en la RACCN para establecer una plataforma de diálogo subnacional que fomente

acciones de reducción de la deforestación y restauración de ecosistemas y cambio climático a partir de acciones en los territorios de esa región.

Los resultados de este estudio son en extremo valiosos para la RACCN, por varias razones. En primer lugar, este estudio proporciona un análisis consistente de la dinámica de uso y cambio de uso de la tierra (datos de actividad) para la región. El uso de métodos armonizados y consistentes a lo largo del tiempo asegura una determinación robusta de la magnitud de cambio (pérdida y recuperación) de la cobertura forestal. En segundo lugar, se diseñó y ejecutó una metodología novedosa que utiliza datos de Radar (ALOS-PALSAR y Sentinel) para crear, por primera vez, mapas de cobertura de la tierra con información completa para la RACCN. En tercer lugar, los resultados de este estudio también permiten cuantificar la dinámica de emisiones y remociones de GEI asociadas con los cambios en la cobertura forestal.

Los impactos regionales de este trabajo son considerables porque la metodología pionera que fue desarrollada e implementada ha recibido un visto bueno inicial por parte del VCS-JNR y, al replicarse de forma consistente, podrá constituirse en una herramienta en extremo útil para complementar los análisis de la dinámica forestal y de emisiones y remociones de GEI en Centroamérica y República Dominicana, una región conocida por su abundante y constante cobertura de nubes.



Introducción

Se estima que la deforestación y la degradación de los bosques contribuyen al 17% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales a escala global (IPCC 2007). Por lo tanto, reducir la deforestación y la degradación de bosques es una acción de gran relevancia para mitigar el cambio climático. Nicaragua, un país con grandes reservas de recursos forestales, reporta una tasa de deforestación de 76 000 ha/año, sin contabilizar los procesos de degradación forestal (FCPF 2015). Esta deforestación afecta principalmente al bosque tropical húmedo, que representa casi el 60% del territorio nacional. Las áreas protegidas son las zonas más afectadas por la conversión de bosques a ganadería extensiva y agricultura migratoria (MAGFOR 2005), con pérdidas acumuladas del 30 al 80% de sus ecosistemas naturales (MARENA 2007).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) propone que países en vías de desarrollo implementen acciones de reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques, reconociendo el papel de la conservación de las reservas forestales de carbono, la gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas de carbono. Estas acciones implementadas a nivel nacional se les conocen como REDD+ (CMNUCC 2010). Ante esto, Nicaragua se encuentra preparando una Estrategia Nacional REDD+ con el apoyo de agencias internacionales de cooperación y tratando de negociar “pagos por resultados” a través de Fondo Cooperativo de Carbono de Banco Mundial (FCPF, por sus siglas en inglés), ante el cual el país ha presentado ideas preliminares para la creación de un programa de reducción de emisiones.

Dentro de la propuesta de este programa de reducción de emisiones por deforestación, el país considera a la Región Autónoma de la Costa Caribe de Nicaragua (RACCN), como un sitio prioritario (FCPF 2015). Además, actores locales de la RACCN están construyendo una Estrategia de Restauración de Paisaje Forestal, con el apoyo de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Estas acciones se enmarcan dentro de los compromisos que Nicaragua desarrolla dentro de acuerdos internacionales de restauración de paisajes, como el Desafío de Bonn y la Iniciativa 20x20.

La RACCN es una zona de vital importancia para Nicaragua, puesto que allí se concentra una alta diversidad biológica, étnica y cultural. Datos preliminares estiman que los bosques en esta región representan 43,4% de los bosques del país (INAFOR 2009) y que la zona concentra el 12,3% de la población del país (MAGFOR 2010). Desafortunadamente, la información relacionada con las existencias de bosques de Nicaragua es escasa, generada utilizando diferentes metodologías y publicada por diferentes instituciones a lo largo del tiempo (ej. Guevara 2004, INAFOR 2009, MAGFOR 2010) lo cual no permite comparaciones de donde se desprendan conclusiones.



En el presente informe se detalla un análisis histórico y una proyección futura de la deforestación y recuperación de cobertura forestal para la RACCN. Esta información puede ser usada para diseñar acciones sobre la reducción de la deforestación en áreas críticas o amenazadas y sobre áreas importantes a considerar en estrategias de restauración. Se provee además estimaciones sobre las emisiones de GEI asociadas a la deforestación y el potencial de absorciones de emisiones asociadas a la recuperación de la cobertura forestal.

Objetivos

General

Estimar la deforestación y recuperación de cobertura forestal en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) de Nicaragua para los periodos 2000-2008 y 2008-2014.

Específicos

- Crear mapas históricos de uso del suelo mediante la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales Landsat y RADAR, para determinar deforestación y recuperación de cobertura forestal en los periodos 2000-2008 y 2008-2014.
- Cuantificar el efecto de determinantes directos/esenciales sobre la ubicación de la deforestación y recuperación de cobertura forestal durante los periodos 2000-2008 y 2008-2014.
- Desarrollar escenarios futuros de deforestación y recuperación de cobertura forestal a partir de la validación del modelo de deforestación histórica.
- Cuantificar las emisiones asociadas a la deforestación y absorciones asociadas a la recuperación de cobertura forestal para los periodos 2000-2008, 2008-2014 y a proyecciones futuras de la cobertura forestal al 2026.

Contexto bajo el cual se realizó este estudio



El estado de los recursos forestales en Nicaragua

Nicaragua tiene una extensión territorial de 130 373,47 km², que incluyen 10 033,93 km² de lagos y lagunas. Fisiográficamente se divide en tres grandes regiones (Pacífico, Central y Caribe). Política y administrativamente está dividida en 15 departamentos y dos regiones autónomas, que en su conjunto constituyen un total de 154 municipios. La región del Caribe la conforman: la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN), la Región Autónoma de la Costa Caribe Sur (RACCS) y el departamento de Río San Juan.

El análisis del mapa forestal de 1983, realizado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y el mapa forestal del año 2000, realizado por el Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR), indican una pérdida de 1,24 millones de hectáreas de bosques. Esto representa una tasa de deforestación neta del 1,17% anual, con un valor promedio de 73 140 ha anuales y con rangos anuales de áreas deforestadas que oscilan entre 66 463 y 80 220 ha. El análisis de cambios en la cobertura forestal del año 2000 (MAGFOR) y 2008 (INAFOR) reporta un aumento en la tasa de deforestación para un total de 2,37 millones de hectáreas (Guevara 2004).

El sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) es uno de los más dinámicos en el país (Guevara 2004). De acuerdo con los resultados del segundo inventario nacional de GEI, presentado en la segunda Comunicación Nacional sobre Cambio

Climático enviada por el Gobierno de Nicaragua a la CMNUCCC (MARENA 2008), ese sector es el principal emisor de GEI, producto de actividades como la ganadería extensiva y la agricultura migratoria; responsables de al menos el 70% de deforestación en el país (MAGFOR 2010). Las emisiones de GEI por UTCUTS se han incrementado al año 2000, pasando de ser el principal sumidero en 1994 a ser la principal fuente de emisión de CO₂ con un total de 45 380 Gt por año.

Las estimaciones de cobertura forestal en Nicaragua, según la información anterior, podrían variar debido a diferencias en los sistemas y metodologías de clasificación, resolución espacial y espectral, fecha y época de toma de las imágenes satelitales y nivel de comprobación en campo; dificultando las comparaciones entre los diferentes mapas (Cuadro 1).

La Estrategia Nacional de Deforestación y Degradación Forestal Evitada (ENDE-REDD+)

Nicaragua, como otros países de la región centroamericana, está preparando una estrategia nacional REDD+, para lo cual cuenta con el apoyo de agencias

Cuadro 1. Cuantificación de la cobertura forestal de Nicaragua por diferentes fuentes de información

Organización que reporta	Año	Área (ha)		
		Cobertura (ha)	Latifoliado	Coníferas
FAO	1948	7 100 000	6 300 000	800 000
AID	1960	6 320 000	5 400 000	920 000
CATASTRO	1973	4 760 000	4 288 000	472 000
ASDI	1983	6 862 915	6 402 436	460 479
PAF-NIC	1992	4 200 000	3 700 000	500 000
MAGFOR-INAFOR	2000	5 619 533	5 104 654	514 879

Fuente: Guevara (2004)

internacionales como la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo, a través del Programa REDD/CCAD-GIZ¹ o el Fondo Cooperativo del Carbono de los Bosques (FCPF) del Banco Mundial². Desde el año 2012, bajo el marco de apoyo del FCPF, Nicaragua recibe fondos para completar su propuesta de preparación para REDD+ (*Readiness Preparation Proposal*, R-PP, por sus siglas en inglés, MARENA 2013). El proceso de preparación pretende generar las condiciones políticas y herramientas de campo necesarias para que los resultados de REDD+, en términos de reducción de emisiones, sean compensados con fondos de acuerdo con resultados verificables. El país además ha sometido a consideración ante el FCPF ideas preliminares para la construcción de un programa de reducción de emisiones, el cual pretende ser la base para que el país reciba en el futuro financiamiento por la reducción de las emisiones generadas.

La Estrategia Nacional de Deforestación y de Degradación Forestal Evitada (ENDE-REDD+) se concibe como una “estrategia de país que integra acciones en los niveles nacional, subnacional y local, orientadas a revertir las principales causas de la deforestación y degradación de los bosques, considerando la restitución de derechos de los pueblos originarios y del pueblo nicaragüense al goce, uso y disfrute de los ecosistemas forestales de forma racional y sostenida” (MARENA 2013). La propuesta ENDE-REDD+ da continuidad a los procesos participativos de gobernanza forestal basados en la política y legislación sectorial,

la cual cuenta con el amplio respaldo de los diferentes agentes públicos y privados, como mecanismo para enfrentar de forma efectiva la deforestación y degradación forestal como causa directa del cambio climático.

Tanto para la ENDE-REDD+ como para el programa de reducción de emisiones, el país debe desarrollar: (1) una evaluación rápida del uso actual de la tierra, las tendencias de la deforestación en el pasado y presente, un análisis del marco institucional y de los mecanismos de gobernanza; (2) creación de un grupo nacional de trabajo REDD+ y la preparación de un plan de consulta y de extensión; (3) diseño de una estrategia REDD+; (4) elaboración de un marco institucional para la implementación de la estrategia REDD+; (5) evaluación de los impactos sociales, ambientales y económicos de la estrategia REDD+; (6) evaluación de las necesidades de inversión y formación de capacidades; (7) desarrollo de un escenario de referencia; (8) diseño de un sistema de monitoreo y seguimiento, y (9) diseño de un sistema de coordinación para las actividades de preparación.

La convergencia de múltiples actores económicos y sociales; instituciones del gobierno nacional, regiones autónomas de la Costa Caribe y territorios indígenas, así como ONG y el sector privado, han sido un factor clave durante la elaboración de la estrategia. De acuerdo con la reunión de Ministros de CCAD realizada en San Salvador en noviembre de 2011, “Nicaragua apuesta por la adopción de un enfoque

1 Acceso a la página del Programa REDD/CCAD-GIZ <http://www.reddccadgiz.org/>

2 Consultar más detalles sobre Nicaragua y el FCPF en la página web: <https://forestcarbonpartnership.org/nicaragua>



holístico, coherente y respetuoso que contemple la multifuncionalidad de los bosques y recalque la necesidad de trabajar por detener la deforestación para enfrentar el cambio de uso de suelo, degradación de los ecosistemas, con el fin de proteger y defender la Madre Tierra, restituyendo el derecho de los pueblos a gozar de la sustentabilidad ambiental que generan los ecosistemas y bosque en calidad de aire, recargas hídricas, protección de los bosques, entre otros. Asimismo, no debería limitarse al conocimiento científico occidental, sino también incluir los conocimientos tradicionales, innovaciones y prácticas indígenas, que históricamente han contribuido a los esfuerzos de conservación” (CCAD 2011).

Para cuantificar los beneficios que aporta el mecanismo REDD+ en Nicaragua, es fundamental contar con estimaciones exactas y transparentes sobre las emisiones de GEI producidas por la deforestación y la degradación de bosques, así como del aumento de las reservas de carbono. Para ello, es necesario contar con acceso a información, infraestructura y capacidad técnica para llevar a cabo un análisis y manejo de datos que permitan asegurar la rigurosidad de los niveles de referencia. La calidad en las estimaciones define la capacidad del proyecto de obtener unidades de reducción de emisiones que sean verificables³.

Caracterización de la RACCN

La RACCN fue creada en 1987 con la aprobación de la Ley 28: Estatuto de Autonomía de las dos Regiones de la Costa Atlántica de Nicaragua y su reglamento, según decreto número 3584, Gaceta 186 del 02 de octubre de 2003 (Figura 1). Los primeros gobiernos regionales fueron elegidos en 1990.

La RACCN es la región geográfica y administrativa de mayor extensión del país. Comprende la parte noroeste del territorio nacional, con una extensión superficial de 32 127 km², que corresponde al 52% del territorio nacional (Figura 1). Concentra el 12,3% de la población del país, con una densidad de 8 habitantes/km². La población es multiétnica, compuesta en su mayoría por indígenas, afrodescendientes, criollos y una

minoría de mestizos. Se hablan varias lenguas: el creole (inglés del Caribe), el misquito, el mayangna y el español (MAGFOR 2010).

El clima predominante en la región es el de selva húmeda tropical, con precipitaciones entre los 2400 y 6000 mm anuales. Los extremos anuales de temperatura fluctúan entre los 27 y los 39 °C. Su posición geográfica la expone a tormentas tropicales y huracanes que provienen del océano Atlántico y/o mar Caribe. Producto de esta situación (clima y precipitaciones), en la región se concentran dos estaciones climáticas importantes: el invierno o estación lluviosa, que comprende los meses desde mayo hasta enero (nueve meses) y el verano o estación seca, que comprende desde febrero hasta abril. Durante este último periodo, el régimen de las lluvias es limitado hasta casi suspenderse, especialmente en los últimos dos meses (INETER 2005).

Suelos

La estructura de los suelos define las zonas biofísicas del Atlántico Norte. Los suelos ubicados en la zona de los llanos, al este del río Wawa, tiene un pH ácido y en su mayoría tienen deficiencia de nitrógeno, potasio, fósforo y calcio, con una ausencia generalizada de micronutrientes y materia orgánica, que los convierte en zonas de vocación principalmente forestal. Los suelos de las riberas de los ríos presentan acumulaciones de sedimentos de origen aluvial, lo que los hace aptos para la agricultura y la ganadería, pero su área es muy limitada, restringiendo los usos intensivos. Otro tipo de suelos en la región, son los presentes en las zonas montañosas, al oeste del río Wawa, donde se encuentran las mayores reservas biológicas maderables y subsisten la agricultura y la ganadería en laderas y pequeños valles. Allí predomina el cultivo de granos básicos, musáceas, raíces y tubérculos (FUNICA 2009).

Biodiversidad y áreas protegidas

La vegetación y la fauna del Atlántico Norte son muy variadas, en función de los diferentes ecosistemas y zonas biofísicas que conforman el territorio. En el litoral, la flora que impera son los bosques de coníferas, manglares y arbustos, con alguna presencia

3 El valor de los créditos tiene en cuenta la fiabilidad metodológica, así como la contribución del proyecto a la generación de otros beneficios ambientales y sociales.

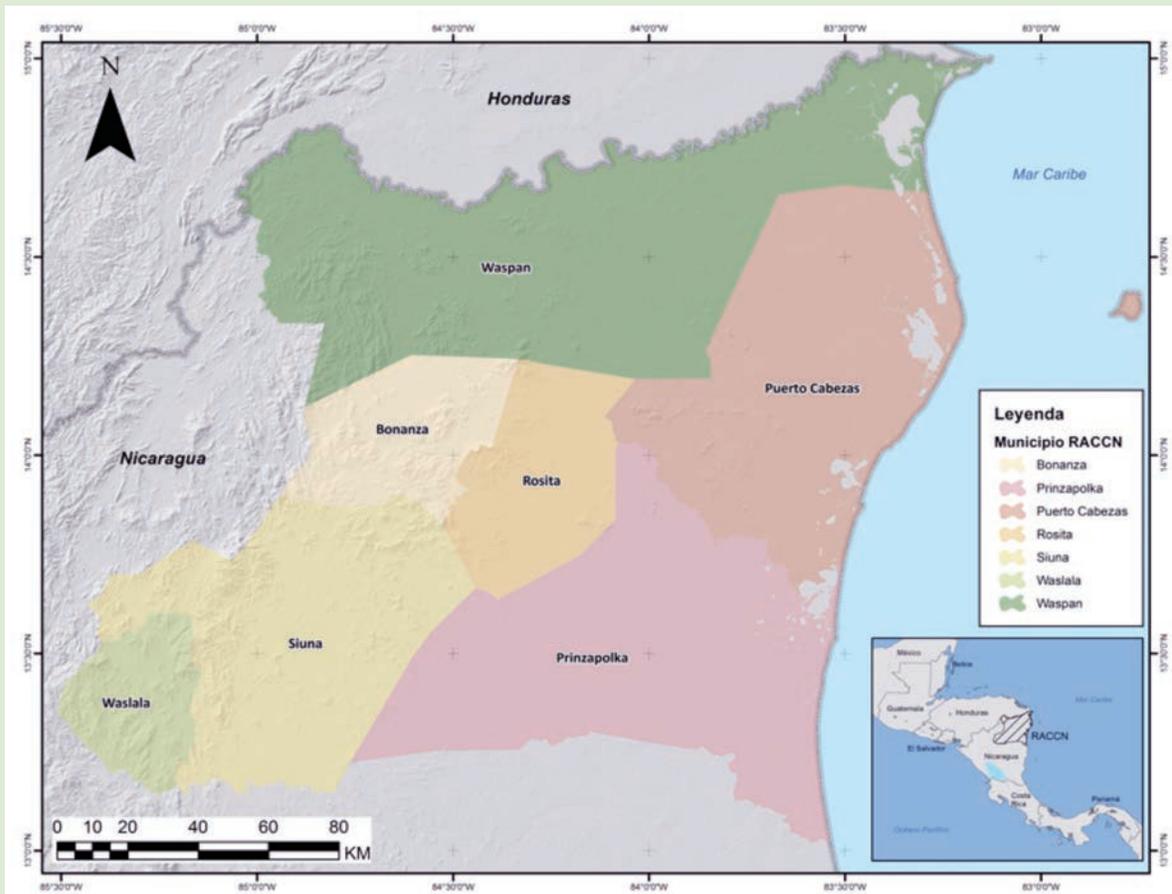


Figura 1. Mapa que describe la ubicación de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) en Nicaragua. Se ilustra la ubicación de los municipios y la ubicación de la RACCN respecto a Centroamérica

hacia el interior de bosques latifoliados, con especies maderables de alto valor comercial. En la RACCN se encuentran Washawan y Cayos Miskitos que son reservas del Corredor Biológico del Atlántico (CBA). Bosawás es la primera reserva de biosfera de Nicaragua y abarca el 14% del territorio nacional (20 000 km²); forma parte del territorio de Bonanza y es compartida con los municipios de Wiwilí, Waslala, Cuá Bocay, Siuna y Waspam. La región posee una considerable extensión de zonas húmedas (pantanosas y manglares) que perduran todo el año, en la zona de los litorales y bosques húmedos. Se estima que los humedales alcanzan una extensión de unos 340 000 ha y de manglares unas 34 000 ha en las lagunas y áreas costeras (FUNICA 2009).

El rol de la RACCN como área prioritaria para la conservación

La RACCN, al igual que gran parte del paisaje forestal nicaragüense, ha sido afectada por la irrupción de la agricultura a partir de la tumba del bosque. Esto ha provocado un alto grado de deterioro de tierras deforestadas y generado pasturas poco productivas. Sin embargo, la RACCN sigue representando la base para la conservación de la biodiversidad existente en Nicaragua, albergando los últimos reductos de bosque tropical pluvial, del trópico húmedo y nebliselva, con miles de especies naturales con potencial económico para el país y de enorme riqueza para la investigación científica. Tiene además, diversos pisos altitudinales con importantes cuencas hidrográficas de enorme



potencial hidroeléctrico para cambiar la matriz energética del país y, además, alberga la conservación cultural y etnológica de las comunidades indígenas (López 2012).

De acuerdo con PNUD (2005), si se reserva un 30% del área del bosque para la protección de cuencas y áreas estratégicas de conservación, el área disponible para intervención a partir de planes de manejo generaría una oferta productiva de 975 000 m³ anuales de madera, lo cual causaría un ingreso adicional

cercano a los USD 254 millones anuales. El mismo estudio resalta que servicios ambientales como la fijación de carbono contribuirían con más de USD 25 millones. Otros servicios como la leña, el carbón, frutas y nueces silvestres, medicina, belleza escénica, y biodiversidad no tienen una cuantificación en cuanto a su aprovechamiento, lo cual sugiere que no se están percibiendo los beneficios que se derivarían de la puesta en marcha de una política de aprovechamiento, valoración del servicio ambiental y de un manejo y producción forestal adecuado y sostenible.



Definición del marco metodológico: conceptos básicos y consideraciones generales

Para la estimación de la deforestación y recuperación de cobertura forestal en la RACCN, se siguieron una serie de pasos metodológicos que inician con la definición de un marco metodológico para la elaboración de los mapas que permiten analizar el cambio histórico en el uso del suelo y generar proyecciones de la deforestación y las emisiones y remociones de dióxido de carbono asociadas. Las etapas metodológicas se resumen en la Figura 2.

Consideraciones sobre niveles de referencia forestal (NRF) para REDD+

Las plataformas internacionales que incentivan acciones REDD+ tienen requerimientos particulares para el establecimiento de niveles de referencia forestal (NRF). Este estudio contempló en primera instancia los requerimientos de la CMNUCC y, como soporte técnico y metodológico, se apoyó en metodologías del VCS. Las diferentes plataformas difieren en los elementos a considerar en los NRF/NRF, según se resumen en el Cuadro 2 y la forma en que se abordaron los requerimientos de dichas plataformas durante la elaboración de este estudio.

La Conferencia de las Partes (CP) de la CMNUCC ha establecido que los niveles de referencia de emisiones forestales y/o los niveles de referencia forestales (NREF/NRF) son: “...puntos de referencia para evaluar el desempeño de cada país en la ejecución de actividades de REDD+” (CMNUCC 2010). Un NRF incluye tanto las actividades que reducen las emisiones como las que incrementan las remociones. Así, el alcance de un NRF podría incluir las mismas actividades que un NREF además de, por ejemplo, el incremento de reservas forestales de carbono. De esta forma, y dependiendo de cómo sean definidas por el país, la gestión sostenible de los bosques y la conservación de las existencias de carbono podrían estar incluidas en un NRF o en un NREF. Hay numerosas razones para desarrollar los NRF/NRF:

- Los países pueden acceder a pagos basados en resultados. Según lo acordado por la CMNUCC, la elegibilidad de los pagos basados en resultados requiere un NRF (CMNUCC 2010).
- Los NRF/NRF pueden ser relevantes para evaluar la contribución de un país a la mitigación del cambio climático, a través de gestión de sus bosques y los efectos en emisiones y/o absorciones de gases de efecto invernadero.
- Los países pueden tratar de contribuir a la mitigación a nivel internacional a través de acciones de REDD+ en el marco de la CMNUCC.



Figura 2. Proceso metodológico para determinar cambios históricos y futuros del uso de la tierra, emisiones y absorciones asociadas

Cuadro 2. Consideraciones del enfoque metodológico para el establecimiento de niveles de referencia en concordancia con la CMNUCC, el Marco Metodológico del Fondo de Carbono del Banco Mundial, el VCS y consideraciones para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN), Nicaragua

Elementos NREF/NRF	CMNUCC	Marco Metodológico del Fondo de Carbono	Metodología VM0015 de VCS	Consideraciones para la RACCN
Ámbito de aplicación	Una o más actividades pueden no ser incluidas si su aporte no es significativo. Debe justificarse la exclusión.	Incluye deforestación y degradación (usando los mejores datos disponibles) cuando las emisiones son mayores al 10% del total. Las mejoras en las reservas de carbono son voluntarias.	Incluye deforestación, degradación, manejo forestal y aumentos en las reservas de carbono.	Deforestación y aumentos en las reservas de carbono son posibles de evaluar según la información disponible.
Representación de la tierra	No especificado	Enfoque 3 del IPCC para deforestación; otras opciones como degradación pueden usar métodos alternativos.	Enfoque 3 del IPCC para deforestación. Otras opciones como degradación pueden usar métodos alternativos.	Se aplica el enfoque 3 del IPCC. Uso de datos espacialmente explícitos y en matrices de cambio de uso de la tierra.
Factores de emisión	No especificado	Nivel 2 del IPCC o el más alto usado para estimar las emisiones. En casos excepcionales se puede usar nivel 1.	Para el VCS-JNR los FE deben basarse en datos específicos del país o de la región y no basarse en valores predeterminados (IPCC o literatura científica). Si este fuera el caso, pueden ser utilizados únicamente en reservorios que representen <15% de las existencias de carbono.	Los FE se calcularon considerando el contenido de carbono de los bosques antes y después de la conversión (IPCC 2006 y Cifuentes 2008) y el contenido de carbono de los usos del suelo no-forestales posteriores a la conversión a tierras no-forestales o anteriores a la conversión a tierras forestales (Jobse 2008).
Depósitos de carbono	Los sumideros significativos no deben ser excluidos. Se justifica la exclusión cuando no son significativos.	Todos los sumideros son significativos (ej. los que representan más del 10% del total). Se permite la exclusión si se demuestra que el aporte no es importante.	Los depósitos de carbono forestal del área del proyecto parten de datos del inventario de biomasa forestal con parcelas temporales o permanentes o con valor conservador predeterminados. En muchos casos la exclusión de un depósito de carbono será conservadora y su inclusión se recomienda (pero no se exige) en el caso que represente una importante proporción del total del stock atribuible a la actividad del proyecto (>10%, VCS 2015).	Se incluyó solo carbono en biomasa viva arriba del suelo.

Elementos NREF/NRF	CMNUCC	Marco Metodológico del Fondo de Carbono	Metodología VM0015 de VCS	Consideraciones para la RACCN
Escala	Nacional o subnacional	Nacional si en conjunto una o más jurisdicciones tienen una escala significativa o si el gobierno designa un área (ej. una ecorregión).	Escala subnacional jurisdiccional o a escala local a nivel de proyectos.	Subnacional
Periodo de referencia y puntos de datos	No especificado	10 años (máximo 15) y datos de cobertura forestal al 2013	Imágenes de al menos tres momentos en el tiempo, del periodo entre 10 y 15 años antes de iniciarse el proyecto, con un momento tomado en los dos primeros años del proyecto.	Fecha inicial y final de acciones REDD+: no definido en este estudio. Corresponde a autoridades nacionales y locales. Reconstrucción de los mapas históricos de cobertura de la tierra para los años 2000, 2008 y 2014 considerando siete categorías de uso de la tierra. Análisis multitemporal de la dinámica de cambio de la cobertura de la tierra para el periodo 2000-2014. No se seleccionó imágenes previas a 2014 debido a que solamente en esta fecha, el sensor Landsat presentaba un set completo de imágenes sin problema de nubes.
Incertidumbre y límite de exactitud	Sin límites para las exactitud de los datos	Se identifican y evalúan las fuentes de incertidumbres. Se cuantifica la incertidumbre de datos relacionados con las actividades y factores de emisión.	El VCS requiere para la línea base y escenarios de proyecto, metodologías para cuantificar y contabilizar incertidumbre en la medición de cobertura forestal, depósitos de carbono y fuentes de GEI. Todas las metodologías deben estimar un intervalo de confianza utilizando +/-30% de incertidumbre de la media al 95% de confianza o +/-20% de incertidumbre de la media al 90% de confianza. Por otro lado, la precisión mínima de clasificación de imágenes (bosque/no bosque) debe ser del 90%.	A partir de la matriz de confusión para el mapa de uso/cobertura de suelo del año 2014, se calculó la exactitud global del mapa en 85,3%. El modelo realizado con DINAMICA-EGO simuló correctamente en el periodo 2000-2014 un 77,7% de los píxeles analizados (permanencias y transiciones).
Posibilidad de ajuste de los datos históricos	Siempre se ajustará a las circunstancias nacionales	Cuando los NREF/NRF no excedan el promedio anual de las emisiones en el periodo de referencia. Se hace una excepción cuando los países tienen alta cobertura forestal y baja deforestación histórica.	Se debe disponer al menos de tres puntos de mapeo en el tiempo en el periodo histórico de referencia (dos periodos) y que dichos puntos estén alejados más de dos años entre sí. El periodo histórico debe ser de 10 años finalizando dentro de los dos años anteriores a la fecha de comienzo (si una tendencia histórica es utilizada para establecer el nivel de referencia). Para la construcción de un mapa de cobertura del suelo se pueden combinar imágenes adquiridas en una ventana de tiempo no mayor a 14 meses.	En caso de que el gobierno de Nicaragua utilice los resultados de este estudio, este puede ser ajustado de acuerdo a las circunstancias nacionales.
Otros requerimientos	Consistencia con el inventario nacional GEI (incluyendo definición de bosque utilizada), según orientaciones metodológicas del IPCC y directrices aprobadas por la COP.	Consistencia con las directrices del CMNUCC: coherencia con el inventario nacional de GEI (incluyendo la definición de bosque). También implica la utilización de orientaciones del IPCC.		Bajo el marco de este estudio, se alinea con los requerimientos de la CMNUCC y el IPCC.



Los NRF deben estar vinculados a un Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques y a los datos e información que este aporta para el sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de emisiones antropogénicas por fuentes y remociones por sumideros, manteniendo consistencia de enfoques (metodologías, definiciones, amplitud e información suministrada) entre las emisiones estimadas y los NRF (CMNUCC 2010).

Para asegurar consistencia y armonización de los objetivos de este estudio con el establecimiento de un NRF acorde con la CMNUCC; se consideró:

- la consistencia con las orientaciones de la CMNUCC,
- el uso de las guías y orientaciones del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) para estimar cambios en las reservas de carbono, emisiones y remociones asociadas,
- el uso de datos de actividad (DA) consistentes (sistema de clasificación basado en las clases del IPCC, estratificación de los bosques, sistemas de corrección y clasificación de imágenes estandarizado) y
- el uso de factores de emisión (FE) determinados a nivel regional y valores predeterminados del IPCC.

Como se mencionó anteriormente, se procuró reforzar los resultados de este estudio mediante la aplicación de herramientas metodológicas internacionales sugeridas por el VCS, uno de los estándares para proyectos forestales de carbono más reconocido a nivel internacional. Con base en las condiciones de aplicabilidad y a la información disponible de la RACCN, se seleccionó la Metodología para la Estimación de Reducción de Emisiones de GEI a partir de Deforestación no Planeada (VCS 2012).

La metodología VM0015 permite el uso de un amplio rango de imágenes satelitales y es flexible en cuanto a áreas libres de nubes, permite la estimación de factores de emisión a partir de inventarios forestales y/o datos de literatura y además contempla posibilidades de identificación de patrones de deforestación (mosaico-frontera). La elección de esta metodología no implica ni garantiza acceso a los mercados; se escogió únicamente como marco metodológico por su alta rigurosidad técnica.

Ámbito y selección de actividades REDD+

De las cinco actividades REDD+ elegibles de acuerdo a la CMNUCC (Decisión 1/Cap. 16, párrafo 70), este estudio consideró la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, la conservación de las reservas forestales de carbono y el incremento de las reservas forestales de carbono. Para ser consistentes con los requerimientos de la CMNUCC y el IPCC, dentro del marco de trabajo del presente análisis, se siguió el enfoque de matriz desarrollado por Bucki et al. (2012), para relacionar las cinco actividades REDD+ con las tres categorías de conversión de usos de suelo del IPCC (Cuadro 3). En este enfoque, la categoría de tierras forestales del IPCC, se subdivide en tierras forestales naturales intactas e intervenidas y las diferentes conversiones obedecen a las potenciales actividades REDD+.

La degradación forestal y el manejo sostenible de los bosques se excluyen de este análisis porque al momento de realizar este estudio el país no está dando prioridad a estas actividades (FCPF 2015) y a potenciales limitaciones en los datos de carbono para distintas clases de edad de bosques nuevos y tierras no forestales.

Cuadro 3. Matriz de actividades de conversión para REDD+ según las categorías de uso del suelo del IPCC

Desde	Hacia		
	Natural/tierra forestal intacta	Tierra forestal intervenida	Otras tierras
Natural/tierra forestal intacta	Conservación forestal*	Degradación forestal	Deforestación*
Tierra forestal intervenida	Mejoras de los reservas de carbono (restauración)	Manejo sostenible de los bosques	Deforestación
Otras tierras		Mejora de las reservas de carbono (aforestación/ reforestación/regeneración)*	

*Las celdas sombreadas representan las actividades a considerar dentro de este estudio.

Definición de bosque

Cuando se presenta un NRF ante la CMNUCC, los países deben facilitar la definición de bosque utilizada en la elaboración del mismo. Las orientaciones del IPCC (2006), sobre la representación del territorio para su reporte en los inventarios nacionales de GEI (INGEI) facilitan una descripción de tierra forestal, definiéndola como todo territorio con una vegetación maderera consistente con los umbrales utilizados para definir la tierra forestal en el inventario nacional de GEI. Dentro del marco de este estudio, los umbrales para definir bosque fueron: 20% de cobertura de copas, área mínima de parche de 1 ha (siguiendo los requerimientos del Programa Jurisdiccional y Anidado REDD+ (JNR Program), 2013) y 4 m de altura mínima a madurez in situ. Estos parámetros siguen la definición utilizada para presentar las ideas preliminares de un programa de reducción de emisiones por REDD+ al Fondo de Carbono del Banco Mundial (FCPF 2015).

Datos de actividad (DA) y representación de tierra

Los datos de actividad (DA) se refieren a la información sobre la magnitud de las acciones antrópicas sobre la cobertura vegetal que dan lugar a emisiones y remociones (IPCC 2006). Para el caso del sector UTCUTS, es la cantidad de hectáreas en las cuales ha habido cambio de existencias de carbono debido a emisión o remociones de GEI. Los DA se estimaron mediante la elaboración de mapas de uso de la tierra utilizando imágenes Landsat⁴ (óptico) y ALOS-PALSAR/Sentinel 1a (radar⁵) para los años 2000, 2008 y 2014. Con base en estos mapas se determinó el área de tierras forestales y no forestales y el cambio entre ellas durante los años analizados.

El uso del suelo de la RACCN se clasificó en siete clases (Cuadro 4; en el Anexo 1 se detalla un conjunto de fotografías a modo de ejemplo). Dentro de la categoría “otras tierras”, se agruparon las clases pasturas, Sabanas Arboladas Temporalmente Anegadas (SATA) y tierras agrícolas. Las clases “otras tierras” y “cuerpos de agua” no fueron incluidas en el análisis de emisiones porque el área de cambio es debida a efectos de

error en la clasificación y no a la realidad del terreno (ej. un cuerpo de agua no puede cambiar a bosque).

El IPCC sugiere tres enfoques metodológicos para la representación de los usos de la tierra (IPCC 2006; Hewson et al 2014):

- El enfoque 1 identifica el área total de cada categoría de tierra. Esta información suele proporcionarse mediante estadísticas no espaciales del país y no suministran datos sobre la naturaleza ni el área de conversiones entre los usos de la tierra. Es decir, solo suministran cambios “netos” del área; por ejemplo, la deforestación menos la forestación, y por lo tanto no son adecuados para REDD+.
- El enfoque 2 tiene que ver con el seguimiento que se hace de las conversiones de tierra entre las categorías, dando como resultado una matriz de conversión de uso de la tierra que no es explícita desde el punto de vista espacial.
- El enfoque 3 amplía el enfoque 2 al usar la información de conversión de la tierra espacialmente explícita, obtenida mediante muestreo o técnicas exhaustivas de mapeo con sensores remotos.

Dado que REDD+ deberá ser monitoreado en el futuro y acciones de campo deberán llevarse a cabo en locaciones determinadas, el enfoque 3 es el sugerido para el caso de la deforestación y la recuperación de cobertura forestal (Hewson et al 2014, Pedroni et al 2015).

Factores de emisión (FE) y depósitos de carbono

Un FE es el valor que cuantifica las emisiones o absorciones de gases por unidad de actividad (IPCC 2006). Por ejemplo, si un bosque en el año inicial del inventario cuenta con 200 toneladas de carbono por hectárea ($t\ ha^{-1}$) y al siguiente año del inventario perdió todo este carbono, entonces el factor de emisión utilizado es $-200\ t\ ha^{-1}$.

Para definir el FE a utilizar, un paso importante es seleccionar los depósitos (“pools”) de carbono a incluir dentro de la construcción de los NRF. La decisión sobre cual depósito de carbono incluir depende de los recursos financieros, facilidad y costo de su medición,

4 Acceso a la página de Internet de Landsat <http://landsat.usgs.gov/>

5 Acceso a la página de Internet de RADAR <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eeo-missions/sentinel-1>

Cuadro 4. Descripción de las clases de uso de la tierra encontradas en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua

Clase IPCC	Clase para este estudio	Descripción
Tierras forestales	Tierras forestales	Bosque latifoliado: bosque en el que más del 70% de la cubierta arbórea está compuesta por especies de hoja ancha.
		Bosque de coníferas: bosque en el que más del 70% de la cubierta arbórea está compuesta por especies de coníferas (áreas dominadas por pinos en diferentes estados de desarrollo).
		Bosque mixto: bosque en el cual ni coníferas, ni latifoliadas, ni palmeras o bambúes representan más del 75% de la cubierta de copa.
		Plantación forestal: rodales forestales establecidos durante el proceso de forestación o reforestación. Pueden estar formados de especies introducidas o de especies nativas sometidas a manejo intensivo.
		Matorrales (tacotales): sitios que han estado en descanso por más de cuatro años y donde crecen plantas leñosas perennes con tallos persistentes Predominan arbustos y árboles, con poca o nula presencia de plantas espinosas.
		Manglar: bosque dominado por un grupo de especies que han desarrollado adaptaciones fisiológicas, reproductivas y estructurales que les permite colonizar sustratos inestables y áreas anegadas con alta salinidad, sujetas a los cambios de las mareas en las costas tropicales y subtropicales protegidas por el oleaje.
Humedales	Sabanas Arboladas Temporalmente Anegadas (SATA)	Sabanas de gramínoideas cortos con presencia de especies latifoliadas, coníferas y palmas aisladas, que por su condición topográfica, geopedológica, y régimen climático, pueden permanecer temporalmente anegadas.
Tierras agrícolas	Tierras agrícolas	Esta categoría incluye la tierra cultivada y los sistemas agrosilvopastoriles, donde la estructura de la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales.
Pastizales	Pastizales	Esta categoría incluye las tierras de pastoreo, hierbas, maleza, zonas de recreo, así como los sistemas silvopastoriles y los pastizales que no se consideran tierras de agrícolas.
	Cuerpos de agua	Superficie ocupada por ríos, lagos, lagunas y embalses importantes.
Otras tierras	Otras tierras	Esta categoría incluye el suelo desnudo, rocas expuestas, asentamientos humanos y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras categorías, o que no pudieron ser clasificadas en ninguna de las clases anteriores.

Fuente: IPCC (2006). Para la descripción de cada clase se utilizó las definiciones de la Evaluación de Recursos Forestales mundiales 2005 (FAO 2005), el Reglamento de la Ley 462 de conservación, fomento y desarrollo sostenible del sector forestal, las normas técnicas del manejo sostenible de bosques de pino y latifoliadas NTON 18 001-04.

la magnitud esperada de cambio, el aporte del depósito al total del *stock* de carbono y el principio de conservación (Cuadro 5). La biomasa arriba del suelo debería ser siempre estimada por la facilidad de su medición y porque siempre representa una significativa proporción del total de las reservas de carbono. En muchos casos la exclusión de un depósito de carbono será conservadora, y su inclusión dependerá de los requerimientos solicitados. El VCS recomienda (pero no exige) que el depósito a incluir represente una importante proporción del total de las reservas, atribuible a la actividad del proyecto que provoca cambios en el flujo (ej. >10%, VCS 2012).

Bajo el marco de este estudio, solo se consideró el carbono en la biomasa viva de los árboles arriba del suelo. A falta de datos locales, se usaron factores predeterminados para bosque tropical lluvioso, en

bosques de América del Norte y del Sur, de acuerdo a las directrices del IPCC (2006) y con datos de la literatura. El valor otorgado por el IPCC a la biomasa aérea en estos tipos de bosques es de 300 Mg ha⁻¹, siendo este el valor máximo de biomasa para toda el área sin estratificación (no se incluyen los humedales en esta definición). Los valores de carbono almacenado por las otras coberturas de la tierra fueron obtenidos de Jobse (2008), para pasto y tierras agrícolas, y Jones (s.f.) para las SATA (Cuadro 6), por ser estudios realizados para zonas similares a la que se está analizando. Cuando se encontró regeneración fue necesario aplicar un factor de crecimiento de la biomasa aérea. Se utilizó la ecuación de acumulación de carbono en bosque secundario húmedo tropical Atlántico, transición a basal (Cifuentes-Jara 2008), que considera la cantidad de años que el bosque regenerado se mantuvo como bosque.

Cuadro 5. Depósitos de carbono a ser considerados en el análisis de factores de emisión por tipo de actividad

Depósito		Actividad		
		Deforestación/degradación planeada o no con cultivos anuales en el escenario de línea base	Deforestación/degradación planeada o no con pasturas en el escenario de línea base	Deforestación/degradación planeada o no con cultivos perennes en el escenario de línea base
Biomasa	Biomasa aérea*	S	S	S
	Biomasa subterránea	O	O	O
Materia orgánica muerta	Madera muerta	O	O	O
	Hojarasca	N	N	N
Suelos	Materia orgánica del suelo	O	N	N

S= Depósito debe ser incluido en el análisis. N= el depósito no tiene que ser incluido porque no es sujeto de significantes cambios o potenciales cambios de naturaleza transitoria. El depósito podría incluirse si causa impactos positivos en la reducción o remoción de emisiones, de ser así, las metodologías deberían establecer criterios y procedimientos para que el proponente del proyecto pueda incluir el depósito. O= la inclusión del depósito es opcional y puede ser excluido del análisis.

*= Toda la biomasa de vegetación viva pero leñosa y herbácea sobre el suelo, incluyendo tallos, tocones, ramas, corteza, semillas y ramas.

Fuente: Adaptado de AFOLU Requirements: Versión 3 - 4.3. (VCS 2013)

Cuadro 6. Biomasa aérea de las coberturas del suelo y factores de emisión (Mg ha⁻¹) por actividad de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua

Cobertura año inicial		Cobertura año final			
		Tierra forestal	Pasto	SATA	Tierras agrícolas
	Tierra forestal *	300	115	168,3	182
	Pasto **		185		
	SATA ***			131,7	
	Tierras agrícolas **				118

En la diagonal y en color gris oscuro se observan los valores de biomasa aérea de cada categoría (Mg ha⁻¹), y en la primera fila están las diferencias entre la tierra forestal y las otras tres coberturas, utilizadas en el cálculo de los factores de emisión de las transiciones utilizadas en el análisis (Mg ha⁻¹). Fuente: * IPCC (2006), ** Jobse (2008), *** Jones (s.f.)

Escala, área de contabilidad y periodo de referencia

La contabilidad se refiere a las reglas para estimar y comparar emisiones y remociones a partir de la dinámica de UTCUT. Se reportan según diferentes marcos de trabajo, siendo los principales el de la CMNUCC y el del FCPF. La implementación de REDD+ bajo el marco de la CMNUCC debe ser a escala nacional, sin embargo, la Convención permite a los países establecer un nivel de referencia subnacional en periodo ínterin

o de transición mientras se avanza a la escala nacional, según las circunstancias nacionales⁶. El Fondo de Carbono y el VCS aceptan la escala subnacional, pudiendo ser esta jurisdiccional, ya sea en forma de programas de reducción de emisiones o de proyectos a nivel nacional, subnacional o una combinación de ambos (anidado). El enfoque subnacional, tal como se establece para la RACCN (FCPF 2015), propone que las actividades REDD+ sean llevadas a cabo en un área geográfica específica o bajo la modalidad de proyectos realizados por individuos, comunidades,

6 La Decisión 12/CO.17, párrafo 11



organizaciones no gubernamentales (ONG), empresas privadas o gobiernos nacionales o locales. Estos últimos son atractivos para los inversionistas privados, ya que sus resultados son tangibles y pueden funcionar en países que no están listos institucionalmente para implementar REDD+ a nivel nacional (Angelsen y Wertz-Kanounnikoff 2009).

El área de contabilidad se refiere a la ubicación geográfica donde se implementarán las actividades para reducir las fuentes de emisiones o aumentar las remociones. En el presente informe se considera como área de contabilidad la RACCN, dentro de un enfoque subnacional. Se incluyen los bosques latifoliados y de coníferas en la zona continental de la RACCN (Figura 3).

Para contabilizar las emisiones y remociones en el área de contabilidad, dada la disponibilidad de imágenes y datos de validación de campo, se estableció un período de análisis (serie temporal) entre el año 2000 y 2014 (14 años: 01.01.2000–31.12.2014⁷), con una fecha intermedia en 2008 para la evaluación de dos periodos (2000-2008-2014⁸).

Categorías principales de uso y cobertura del suelo

El IPCC define categorías principales para determinar la estimación tanto de datos de actividad como de factores de emisión (IPCC 2000). Una fuente o sumidero de categoría principal es una actividad y/o reservorio de carbono que contribuye significativamente a la magnitud y tendencia de las emisiones o remociones totales o a la incertidumbre total. Por esto, reciben tratamiento prioritario en el inventario de GEI. En cifras acumuladas, las fuentes y sumideros no principales pueden representar menos del 10% de la incertidumbre de un inventario, o menos del 5% del total de las emisiones.

El IPCC clasifica la tierra en seis diferentes usos de suelo y provee una guía metodológica para cada “uso de suelo que permanece o se mantiene como tal” (ej.

tierra forestal que sigue siendo tierra forestal) y para cada cambio de uso (ej. tierra forestal convertida en pasturas). En este estudio se definieron siete clases de uso (Cuadro 4), siguiendo los siguientes criterios:

- Se seleccionaron las seis clases del IPCC, como base para la estimación de emisiones y remociones, aplicables y completas, en el sentido de que todas las superficies existentes en el país pueden ser clasificadas bajo estas denominaciones. Las seis clases estándar son: tierras forestales, tierras agrícolas, pastizales, humedales, asentamientos humanos y otras tierras.
- El cálculo de emisiones se basa como mínimo en las clases de tierras forestales y otras tierras.
- Las tierras forestales de acuerdo al criterio de expertos en sensores remotos se subdividieron en bosque latifoliado, bosque de coníferas, bosque mixto, plantación forestal y manglar. Las tierras no forestales se subdividieron en tierras agrícolas, pastizales, Sabanas Arboladas Temporalmente Anegadas (SATA), cuerpos de agua y otras tierras⁹.
- La categoría de tierras forestales incluye toda tierra con vegetación boscosa coherente con los valores umbral utilizados por Nicaragua para definir bosque (ver definición de bosque en sección 4.1). El documento de ideas preliminares sobre el programa de reducción de emisiones sometido por el gobierno de Nicaragua al Fondo de Carbono de FCPC, también contempla dicha definición (FCPF 2015).

Cambios en las reservas o existencias de carbono

El IPCC (2006) sugiere dos métodos para estimar cambios en las reservas o existencias de carbono en diferentes reservorios de un ecosistema en diferentes momentos de tiempo, que se describen a continuación. La aplicación de uno u otro método se prioriza según los reservorios y los datos disponibles. Por ejemplo, el método de diferencia de existencias basado en un inventario nacional forestal (IFN) es la manera más práctica de estimar los cambios de carbono experimentados en la biomasa por encima del

7 Requerimiento mínimo del periodo de referencia histórico del VCS bajo metodología VM0015, Versión 1.1 Cap. 1.2.1

8 Se seleccionaron tres fechas de análisis y dos periodos históricos, según requerimientos del VM0015, Versión 1.1 Cap 2.1 / JNR Requirements: VCS Versión 3 – Cap 3.11.8-4

9 Donde sea apropiado incrementar la veracidad de las estimaciones de las reservas de carbono, puede ser necesario incorporar subclases según requerimiento del JNR VCS Versión 3 - Cap. 3.11.8

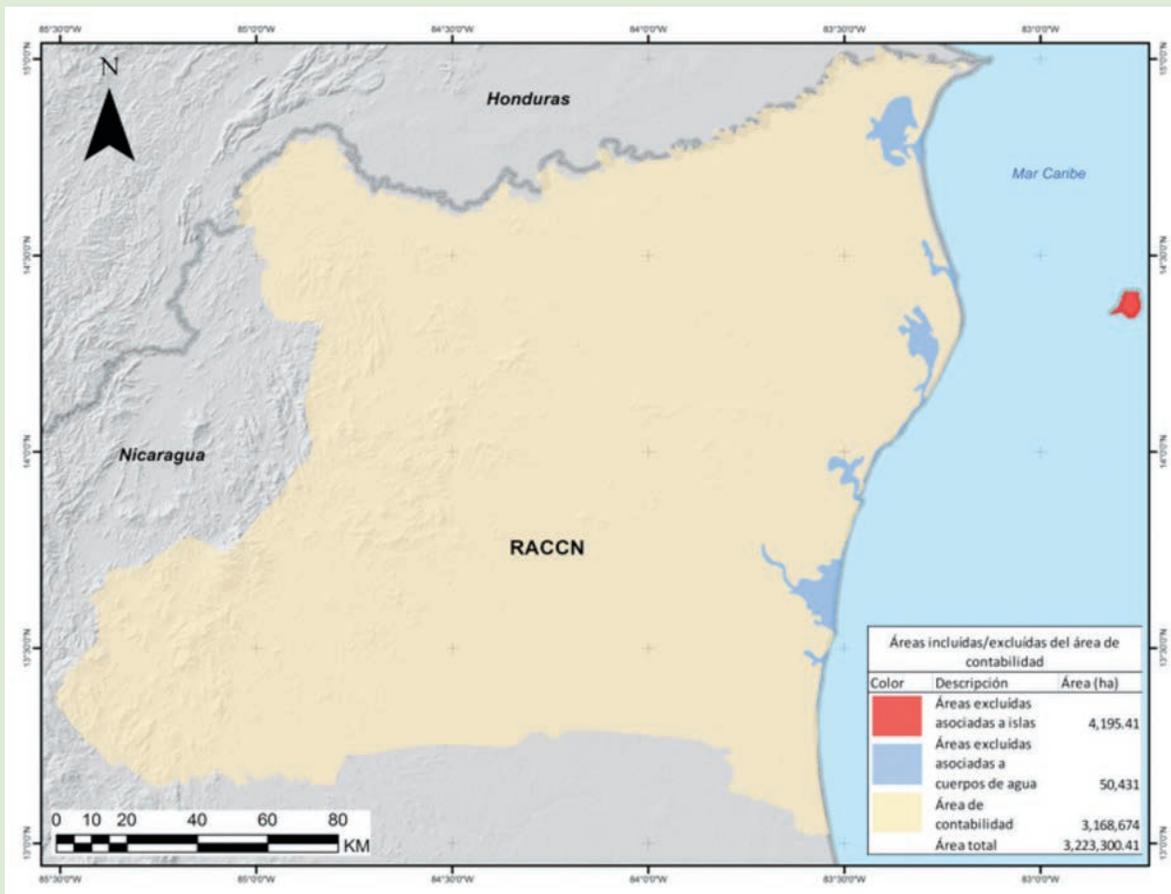


Figura 3. Área de contabilidad de emisiones y remociones del período 2000-2014 para los niveles de referencia forestales (NRF) de la Región Autónoma del Caribe Norte (RACCN), Nicaragua

suelo (Brown 2002; Qureshi et al. 2012). En cualquier caso, para aplicar cualquiera de ellos es necesario desarrollar primero una estratificación adecuada del paisaje y determinar qué actividades y reservorios requieren una contabilidad y cuáles pueden abordarse utilizando métodos de nivel 1. La elección de los dos métodos al nivel apropiado, será cuestión de criterio experto, teniendo en cuenta los sistemas nacionales de inventario forestal, la disponibilidad de datos y de información de sondeos ecológicos, las pautas de propiedad forestal y los datos de la actividad, los factores de conversión y de expansión, así como el análisis de costo-beneficio (Verchot et al. 2013).

Método de diferencia de existencias

Se puede utilizar cuando las existencias de carbono de depósitos pertinentes se miden en dos momentos diferentes. Bajo este método se asigna un FE a cada celda de la matriz de cambio de uso de suelo, calculado como la existencia de carbono promedio por hectárea, a partir de la categoría de uso del suelo antes del cambio, menos la existencia de carbono promedio estimada para la categoría después del cambio. La diferencia en la existencia total de carbono en la biomasa se estima en los momentos t_2 y t_1 de la siguiente manera (IPCC 2003):

$$\Delta C = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)}$$



Donde: ΔC = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito, ton C año⁻¹
 C_{t_1} = existencias de carbono del depósito en el momento t_1 , ton de C
 C_{t_2} = existencias de carbono del depósito en el momento t_2 , ton de C

Este enfoque fue utilizado para el análisis de cambio en las existencias de carbono en la RACCN porque es apropiado para estimar las emisiones causadas por la deforestación y por la degradación. Además, puede ser aplicado a todos los reservorios de carbono, siendo más apropiado para los niveles 2 y 3¹⁰. Esto se debe, en general, a que este método ofrece estimaciones más fiables para incrementos o reducciones de biomasa relativamente grandes o en los casos en que se llevan a cabo inventarios forestales (IPCC 2006).

Por lo general, los cambios en las existencias de carbono se estiman por unidad de área, y ese valor se multiplica por el área total de cada estrato (DA) para obtener la estimación de cambio total en las existencias de carbono de un reservorio dado. En algunos casos, los DA pueden registrarse como totales de cada país (ej. metros cúbicos de madera talada), en cuyo caso las estimaciones de cambios en las existencias para el reservorio de biomasa sobre el suelo se calculan directamente a partir de los DA, tras aplicar los factores que correspondan para convertirlos en unidades de masa de carbono.

Cuando se utiliza el método de diferencia de existencias para una categoría concreta de uso de la tierra, es importante verificar que el área total de estudio sea idéntica para evitar que las estimaciones de cambios en las existencias se confundan con cambios en la superficie (IPCC 2003).

Método de ganancias y pérdidas

Este método se basa en estimaciones del cambio anual en la biomasa a partir de estimaciones su pérdida y ganancia. Las ganancias pueden atribuirse al crecimiento (aumento de biomasa) y a la transferencia de carbono de otro depósito, mientras que las pérdidas pueden atribuirse a transferencias de carbono de

un depósito a otro, o las emisiones debidas a degradación, cosecha, quemadas, etc. (IPCC 2003). El cálculo se hace siguiendo la siguiente fórmula:

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$$

Donde: ΔC = cambio en las existencias anuales de de carbono del depósito, Mg C año⁻¹
 ΔC_G = ganancia anual de carbono, Mg C año⁻¹
 ΔC_L = pérdida anual de carbono, Mg C año⁻¹

Este método es usado cuando hay disponibilidad de datos anuales de tasas de crecimiento y aprovechamiento forestal. Se puede aplicar en todos los niveles de detalle del IPCC, requiriendo datos del crecimiento de la biomasa aérea; el factor de conversión y expansión de biomasa (BCEF); el BEF; y/o las densidades básicas de la madera según el tipo de bosque y la zona climática; los factores de emisión relacionados con la pérdida de biomasa, incluyendo las pérdidas debidas a recogidas de madera (ej. para combustible) y perturbaciones (IPCC 2006).

Bajo este sistema es importante tener en cuenta las transferencias de un reservorio a otro ya que representan una pérdida en el reservorio donante y una ganancia equivalente en el reservorio receptor. Por tanto, las remociones de CO₂ son transferencias desde la atmósfera a un reservorio de carbono (normalmente biomasa); las emisiones de CO₂ son transferencias desde un reservorio de carbono a la atmósfera (Verchot et al. 2013).

Principios de contabilidad para el reporte

Para lograr la confiabilidad en la construcción de los NRF, se buscó cumplir con los siguientes principios de contabilidad y reporte del IPCC, para inventarios nacionales de GEI (IPCC 2000):

- **Transparencia:** toda la información espacial sin procesar y procesada será entregada junto con el informe técnico y fuentes bibliográficas citadas,

¹⁰ El IPCC (2003) establece tres niveles para el cálculo de las reservas de carbono: nivel 1, el cual aplica factores de emisión predeterminados (estimaciones indirectas de emisiones basadas en la pérdida de la cobertura del dosel) a datos relativos a las actividades forestales (datos de actividad) recolectados a nivel global o de biomas; el nivel 2, que utiliza factores de emisión y datos de actividad específicos de cada país y el nivel 3, que usa métodos, modelos y sistemas de medición de inventarios que son repetidos en el tiempo, con datos de actividad de alta resolución y desagregados a nivel subnacional en una escala más precisa.



facilitando la eficacia del proceso de comunicación a partir de la reproducción y evaluación de los datos por parte de los usuarios.

- **Completo:** se reportan e incluyen todas las emisiones y remociones de GEI significativos y con información disponible dentro del área de contabilidad. Para el análisis de cambio de uso de suelo fue necesario completar los datos faltantes a partir del reemplazo del bandeado y cobertura de nubes para el periodo 2000 con los productos globales de cobertura de árboles (*tree cover*) de Hansen (2013) el cual está basado en imágenes Landsat. Además, para corregir el periodo 2008 se utilizó imágenes Radar ALOS-PALSAR y para el periodo 2014 imágenes Sentinel 1A.
- **Consistencia:** para los periodos de análisis 2000-2014 se utilizó la misma metodología de procesamiento y análisis, por lo que las diferencias entre estos son reales y no debidas a efectos causados por cambio de metodología.
- **Comparabilidad:** todos los métodos y datos utilizados para elaborar este estudio siguen las guías del IPCC y del estándar VCS.
- **Exactitud:** el análisis espacialmente explícito se realizó a partir de calibración geométrica y radiométrica lo cual permite estimar de manera precisa los cambios pixel a pixel. Los factores de emisión se estimaron bajo nivel 1. Se reporta la incertidumbre estimada en la clasificación de usos de suelo, así como en la proyección de escenarios futuros de deforestación.

Preparación de imágenes y elaboración de mapas de cobertura del suelo

El esquema metodológico del trabajo se ajustó a los protocolos de validación del VCS, bajo la metodología para deforestación evitada no planeada (VM0015) (Pedroni 2012). Los mapas base usados en el análisis se construyeron siguiendo las guías de buenas prácticas para el análisis de cambio de uso de la tierra y silvicultura especificadas por Pennman et al (2003) y Hewson, et al (2014).

En este capítulo se analiza la información espacial, forma de adquisición de las imágenes, su calidad y se determina errores o vacíos de información (ej. píxeles con errores, cubiertos por nubes o sombras) y cómo fueron corregidos.

Imágenes utilizadas y criterios para la selección de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes Landsat para realizar los análisis de cambio de uso de la tierra, apoyándose en Radar ALOS-PALSAR y SENTINEL para corregir problemas de bandeo y cobertura de nubes. El área de estudio fue cubierta por cuatro imágenes Landsat. El problema de bandeo (ocurrencia de bandas sin datos debido al mal funcionamiento del sensor) y cobertura de nubes (áreas cubiertas con nubes y sombras de las mismas sobre la superficie que impiden identificar la cobertura del suelo) fue corregido para el periodo 2000 con los productos globales “*tree cover*” de Hansen (2013), los cuales están basados en imágenes Landsat. Para corregir el periodo 2008 se utilizó imágenes Radar ALOS-PALSAR y SENTINEL para el

periodo 2014. En caso de existir imágenes de radar disponibles para las fechas en estudio, se priorizaron estas sobre el producto global de “*tree cover*” (ver de la sección 4.10 en adelante).

Las imágenes Landsat fueron adquiridas del catálogo de imágenes del USGS (United States Geological Survey; <http://glovis.usgs.gov>) y de Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Las imágenes Landsat utilizadas en el análisis histórico se detallan en el Anexo 2. Las imágenes Radar ALOS-PALSAR fueron obtenidas del catálogo ASF (Alaska Satellite Facility; <https://www.asf.alaska.edu/>) y las imágenes SENTINEL 1 del ESA (European Space Agency; <https://scihub.esa.int/dhus/>). Las imágenes Radar utilizadas en el análisis histórico se detallan en el Anexo 3.

Para garantizar una delimitación óptima del área de estudio, fue necesario seleccionar las imágenes según los siguientes criterios (en orden de prioridad) de disponibilidad y accesibilidad en los diferentes repositorios de datos:

- 1. Cobertura de nubes:** se escogieron imágenes con cobertura de nubes inferior al 20%.
- 2. Calidad:** imágenes con una resolución espacial que permitiera contar con un adecuado número de píxeles a clasificar cuando después de descartar

los píxeles de borde (píxeles no puros que generan distorsión en la clasificación final).

- 3. Fecha:** la selección de una fecha para el análisis debe reducir el periodo de tiempo cubierto por las imágenes utilizadas (entre la imagen más reciente y la más antigua) a un máximo de 14 meses según el estándar VCS¹¹.

Unidad Mínima de Mapeo (UMM)

La UMM se refiere al área mínima para la que se definirá una cobertura del suelo y es una de las principales especificaciones para definir los DA. La UMM fue designada de acuerdo a dos parámetros: la definición de “bosque” del país y la resolución espacial de las imágenes. Se optó por trabajar con una UMM de 1 hectárea para los mapas de uso y de cambio de uso de suelo, de acuerdo con recomendaciones del GOFC-GOLD (2013) y VCS-JNR (2014) para imágenes Landsat y acorde a la definición de bosque del país.

Definición de bosque

Como se mencionó en la Sección 3.3, cuando se presenta un NRF ante la CMNUCC, los países deben acordar previamente una definición de bosque. La definición de bosque usada en este estudio contempla un 20% de cobertura de copas, un área mínima de 1 ha¹² y 4 m de altura mínima a la madurez¹³.

De acuerdo con los propósitos de escala establecidos para el proyecto y la disponibilidad de imágenes satelitales aplicables en estudios de cobertura vegetal a escala nacional, se optó por usar imágenes del programa Landsat (sensores TM, ETM+, OLI y TIRS), las cuales tienen una resolución espacial de 30 m. El VCS-JNR recomienda que la resolución espacial fina no debe ser mayor a 100 m, independiente de la definición de bosque. Este sensor óptico provee imágenes gratuitas, disponibles en línea, con una frecuencia de 18 días y con resolución multiespectral sensible a los

cambios en el tipo de vegetación. Las características de los sensores utilizados se encuentran en el Anexo 2. Imágenes Landsat también fueron utilizadas para la elaboración del nivel de referencia presentado en el documento sobre ideas preliminares para un programa de reducción de emisiones por REDD+¹⁴, por lo que se mantiene consistencia en la fuente de imágenes.

Procesamiento imágenes satelitales

Esta etapa pretende pasar de los datos crudos de las imágenes, tal como las generó el sensor satelital, a imágenes corregidas geoméricamente/espectralmente y con cobertura completa para poder ser utilizadas en la clasificación de la cobertura del suelo.

Georreferenciación

Mediante el uso de hojas cartográficas, se seleccionaron puntos de referencia (sitios distinguibles en las hojas cartográficas y en las imágenes), para transformar las coordenadas de los píxeles de la imagen “en bruto” a los de la imagen final con coordenadas espaciales georreferenciadas por medio de una función polinómica (polinomio 1). Este proceso permitió trabajar con todas las imágenes en un mismo sistema de coordenadas.

Calibración de imágenes

Los datos (imágenes) registrados por un sensor satelital se colectan y almacenan de forma digital siendo transmitidos a estaciones receptoras en la tierra. Estas imágenes deben calibrarse para pasar de niveles digitales (ND) a valores de radiancia (Wm^{-2}) y corregirse por los efectos que tuvo la atmósfera sobre la energía reflejada por la superficie terrestre en su ruta al sensor satelital, de manera que se minimizan los efectos del vapor de agua (humedad), aerosoles (polvo atmosférico, volcanes, etc.) y así poder revelar información

¹¹ JNR Requirements: VCS Versión 3 Cap 3.11.8-5/a

¹² La mínima unidad de mapeo no debe ser mayor de 1 ha independiente de la definición de bosque según requerimiento del JNR: VCS Versión 3 - Cap. 3.11.8

¹³ Para el Inventario Nacional Forestal 2007, el término bosque hace relación a una asociación vegetal natural o plantada, en cualquier etapa del ciclo natural de vida, con árboles que alcanzan una altura superior a 5 m, con una cobertura de dosel mayor del 10%, que se extienden por más de 0,5 hectáreas y un mínimo de 20 m ancho.

¹⁴ https://www.forestcarbonpartnership.org/sites/fcp/files/2015/September/Nicaragua_ERPIN_Sept%2021%202015_final_Sp.pdf



sobre la reflectancia en la superficie terrestre. De esta forma además, se eliminan efectos variables entre imágenes que fueron tomadas en condiciones atmosféricas diferentes, facilitando su utilización en conjunto.

El proceso de calibración radiométrica, atmosférica, generación de cobertura fraccional y clasificación de la cobertura boscosa se hizo con el Sistema de Análisis de Landsat de Carnegie-Versión Lite (CLASlite en <http://claslite.ciw.edu>, ver detalles en secciones siguientes), el cual es un paquete de software diseñado para la identificación automatizada de deforestación y degradación forestal.

Calibración radiométrica

Para poder usar una imagen cuantitativamente, se procede a la calibración radiométrica. Esta consiste en emplear técnicas que calibran los ND de las imágenes sin procesar, acercándolos a los números que habría presentes en las imágenes ópticas en caso de una recepción ideal (unidades de energía reflejada) describiendo la proporción de flujo de energía electromagnética en cada longitud de onda que refleja cada punto de la superficie (Pérez y Muñoz 2006).

Con CLASlite se utilizaron factores de conversión para la calibración radiométrica (ganancia y compensación) suministrados en el metadato de cada imagen por los proveedores de sensores satelitales (ej. NASA). El resultado de la calibración radiométrica fue imágenes en unidades de radiancia (vatios por metro cuadrado por unidad de ángulo sólido), también conocida como la energía medida por el sensor satelital.

Calibración atmosférica

Una vez que se cuenta con los datos radiométricos, es necesario minimizar el efecto de la atmósfera (por sus contenidos de humedad, aerosoles y otros) y de esta manera tener datos de reflectancia de la superficie. Para aplicar la corrección atmosférica CLASlite se usa el modelo 6S de transferencia radiativa (Vermote et al. 1997), que simula la atmósfera de la tierra en cada imagen de satélite para obtener parámetros de corrección de la reflectancia de la superficie por efectos atmosféricos. El módulo 6S fue utilizado para la corrección de todas las escenas Landsat, resultando

en imágenes con valores de reflectancia en la superficie terrestre (es decir, unidades de porcentaje de reflectancia, representados por números enteros del 0 al 10 000, donde 10 000 corresponde al 100%).

Cobertura fraccional y clasificación de la cobertura boscosa

Posterior a la calibración radiométrica y atmosférica de las imágenes satelitales, se aprovechó el potencial de CLASlite para tener un mapeo automatizado de las características más importantes de los bosques como son la cobertura fraccional de la vegetación viva del dosel, vegetación muerta y superficie expuesta, las cuales son determinantes principales de la composición, estructura, biomasa, fisiología y procesos biogeoquímicos del bosque. CLASlite utiliza el método de descomposición AutoMCU¹⁵, el cual trabaja a partir de “bibliotecas” de caracteres espectrales puros derivados de extensas bases de datos de campo e imágenes de satélite y el cual reduce cada pixel de la imagen en tres fracciones de cobertura:

- *La vegetación viva, denominada técnicamente Vegetación Fotosintética (PV)*, mantiene propiedades espectrales únicas asociadas con los pigmentos fotosintéticos de la hoja, contenido de agua y cantidad de follaje en el dosel.
- *La fracción de vegetación muerta o senescente, denominada Vegetación No Fotosintética (NPV)*, se expresa en el espectro como material de superficie brillante con características espectrales asociadas con compuestos secos de carbono en hojas muertas, residuos de deforestación, pastos senescentes, etc.
- *El sustrato expuesto (S)*, generalmente dominado por suelos minerales expuestos, pero también por rocas o infraestructura de origen antropogénico (p.e. construcciones, vías, etc.).

Para garantizar que el algoritmo de AutoMCU se ajuste a los datos de las imágenes procesadas y como recomendación de los creadores de CLASlite, fue necesario modificar el umbral con el fin de obtener un mapeo de la cobertura boscosa bajo los siguientes rangos:

Bosque PV ≥ 80 y S $< 20/15/25$
No bosque PV < 80 y S $> 20/15/25$

¹⁵ El método AutoMCU, o Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo (Asner 1998, Asner y Heidebrecht 2002, Asner et al. 2004) ofrece un análisis cuantitativo de la cobertura fraccional o porcentual (0-100%) de la vegetación viva y muerta y el sustrato expuesto dentro de cada pixel satelital.

La capa de salida de cobertura fraccional se utilizó como banda adicional para combinarla con las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de Landsat y poder clasificar las escenas por el método de segmentación.

Restauración de píxeles perdidos y bandeado

En una imagen satelital aparecen píxeles perdidos (sin información), debido a errores del sensor a la hora de capturar las imágenes, la composición de la atmósfera o el bandeado específico de Landsat 7 ETM en su sistema SLC (*Scan Line Corrector*). Este sistema cumple la función de compensar el movimiento hacia adelante del sensor pero falló a partir del 31 de mayo de 2003 (SLC-off), siendo su efecto más pronunciado a lo largo del borde de la escena y afectando el 28% de los píxeles; este efecto disminuye gradualmente hacia el centro de la escena¹⁶.

Para la restauración de valores de píxeles perdidos de las escenas Landsat 7 ETM+, fue necesario utilizar imágenes que estuvieran perfectamente coregistradas (que dos escenas calcen perfectamente de manera espacial), asegurando el reemplazo de los píxeles perdidos. Para llenar los vacíos de información se hizo la combinación de datos ópticos con datos de cobertura forestal global¹⁷ y datos de radar¹⁸.

Restauración del periodo 2000 (Hansen et al 2013)

Las áreas con nubes y sombras de nubes del periodo 2000 no permiten clasificar el uso del suelo por lo que estas áreas fueron reemplazadas con la capa de cobertura de árboles (*tree cover*) de Hansen et al (2013), la cual está basada en imágenes Landsat, debido a la falta de imágenes de radar para esta fecha. Esta capa ha sido generada a partir del cierre del dosel de toda la vegetación con más de 5 m de altura y está expresada en rango de 0-100% de cobertura de copa en cada píxel. Para poder utilizar esta información fue necesario reclasificar como bosque los píxeles con $\geq 20\%$ de

cobertura de copa, de acuerdo con uno de los requerimientos para definir bosque de Nicaragua (Sección 4.3). La capa de cobertura de árboles fue descargada¹⁹ cubriendo toda la RACCN (fila 20N y columna 90W), bajo resolución espacial de 1 arco-segundo (30 m por píxel) y valores en 8 bit.

Restauración del periodo 2008 (ALOS PALSAR)

Para el relleno de vacíos de información (bandeado, nubes y sombras), se utilizaron los productos ALOS-PALSAR RTC (*Radiometrically Terrain Corrected*) de ASF. Toda el área de estudio fue cubierta por 324 escenas ALOS-PALSAR, sin embargo, para el periodo 2008 solo fueron usadas 27 escenas comprendidas dentro del periodo máximo de tiempo requerido por VCS (14 meses). La calidad de los productos RTC se da gracias al coregistro de las imágenes SAR con la imagen derivada del DEM para poder tener una imagen normalizada (sin efectos del terreno) y a partir de la relación entre los píxeles corregidos y no corregidos por la imagen SAR.

Los datos ALOS-PALSAR vienen en tres polarizaciones (FBS, FBD Y PLR). Se utilizaron los datos de FBD, los cuales tienen una banda HH (transmisión y recepción lineal de la polarización horizontal) y otra banda HV (transmisión horizontal y recepción vertical), lo cual permite determinar existencia de bosque, no bosque, agua y otras categorías. Todos los productos FBD requieren el uso de filtros especializados para evitar el ruido "speckle" causado por el radiómetro. Se hicieron varias pruebas con distintos tipos y tamaños de filtros (Raw, Lee Filter (5*5, 9*9), Gamma Filter (5*5, 9*9)). Se seleccionó y aplicó el filtro Lee 5*5 para las bandas HH y HV, por ser el que mejor eliminó el ruido (inspección visual) en las bandas y porque es recomendado en estudios similares (Wang et al. 2012). Posteriormente se incluyó combinaciones matemáticas de las bandas (HV/HH, (HV-HH) / (HH+HV)) como nuevas variables para la clasificación.

A pesar que la información brindada por las bandas HH y HV es consistente (permite el uso de los mismos

¹⁶ Aproximadamente 22 km de ancho en el centro de la escena tiene información útil.

¹⁷ Por ejemplo, los datos de *Global Land Cover Facility* de la Universidad de Maryland (Hansen 2013). JNR Requirements: VCS Versión 3 – Cap 3.11.8 5

¹⁸ Cuando los datos ópticos son inadecuados dentro de los 14 meses establecidos por VCS, los gaps pueden ser llenados por datos de radar (SAR) con una resolución espacial apropiada. JNR Requirements: VCS Versión 3 – Cap 3.11.8 5/d

¹⁹ http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.2.html



procedimientos para todas las escenas)²⁰, fue necesario incluir más bandas que aportaron información útil en la clasificación. Se utilizó para este fin un modelo de elevación digital *Shuttle Radar Topography Mission* Version 3.0 Global 1 arc second Data (SRTMGL1), obtenido del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS²¹); del que se derivó la pendiente en porcentaje. Finalmente, se utilizaron seis bandas para la clasificación: HH, HV, HV/HH, (HV-HH) / (HH+HV), SRTMGL1 y la pendiente.

Restauración del periodo 2014 (SENTINEL)

Los datos de SENTINEL 1A fueron descargados (Sección 4.1) en polarización dual (VV y VH). Los datos fueron importados en el formato específico de Sentinel (*SAFE Format*), usando el conjunto de herramientas de Sentinel *ESA Sentinel Toolbox (S1TBX)*²², que permite calibración, filtros, coregistro, ortorectificación, mosaicos, soporte de una gran cantidad de archivos y conversión de sus datos, polarimetría e interferometría.

Los datos fueron radiométricamente calibrados a partir de la opción *SAR Radiometry Processing*. La herramienta determina automáticamente cuál es el producto de entrada y qué tipo de correcciones necesitan ser aplicadas, basado en su metadato. La calibración radiométrica corrige una imagen SAR para que los valores de los píxeles representen verdaderamente la retrodispersión (“*backscatter*”) de la superficie reflectante. Este paso es muy importante para preparar mosaicos, ya que estos tienen productos con ángulos de incidencia y niveles relativos de brillo diferentes.

Fue necesario reducir el ruido de las imágenes causado por la interferencia a partir de *Lee filter 5*5*. Posteriormente se corrigieron los efectos de geometría de las imágenes SAR (relieve y sombras), a partir del DEM de SRTMGL1. La herramienta detecta automáticamente el DEM necesario para el área de estudio y lo descarga desde los servidores de Internet. Esta corrección del terreno, se generó a partir de *Range-Doppler Terrain Correction*, obteniendo una imagen con sistema de coordenadas dado en latitud y longitud (opción predeterminada). Los datos preprocesados fueron

exportados a formato .tif para ser usados posteriormente en el relleno de píxeles faltantes para el periodo 2014.

Clasificación de imágenes en categorías de uso de suelo

Existe gran cantidad de métodos para desarrollar mapas de uso/cambio de uso del suelo. La CMNUCC, el Marco Metodológico del Fondo de Carbono y la metodología VM0015 del VCS, no establecen una norma específica de cual método seguir. Sin embargo, por la calidad de los datos, su disponibilidad, resolución espacial, así como los usos de suelo a ser obtenidos, se establecieron los siguientes principios generales:

- preferencia de métodos de clasificación automática,
- la interpretación interdependiente debe ser más precisa; para esto una técnica efectiva es la segmentación seguida de clasificación supervisada (protocolo utilizado en este estudio),
- la UMM no debería ser mayor de 1 hectárea, independientemente de la definición de bosque del país²³,
- independientemente del método seleccionado, los resultados deben ser repetibles por diferentes analistas o expertos.

Siguiendo estos parámetros, se utilizaron los siguientes tres métodos de clasificación.

Clasificación de cobertura fraccional

Esta etapa permite separar las clases de cobertura de bosque y no bosque. Los diferentes tipos de cobertura de la tierra tienen propiedades de reflectancia (firma espectral) características, lo cual permite que CLASlite, a partir de AutoMCU o Segregación Espectral Automatizada Monte Carlo (Automated Monte Carlo Unmixing); (Asner 1998, Asner y Heidebrecht 2002, Asner et al. 2004), derive información de vegetación viva, vegetación muerta y sustrato expuesto para cada píxel (ver Sección 4.6.3) para generar las dos clases. A partir de esta clasificación automatizada, fue posible tener una banda adicional de bosque/no bosque que aporta información para la clasificación final con un mayor número de categorías.

²⁰ Las imágenes de Radar pueden ser afectadas por las sombras del terreno, deforestación y humedad del suelo, por lo tanto se requiere mayor información para clasificar el uso y cobertura del suelo

²¹ https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/measures/measures_products_table/srtmgl1n

²² S1TBX está siendo desarrollada por ESA en colaboración con DLR, Brockmann Consult y Ocean Data Lab

²³ VM0015 Versión 1.1 – 2.4.2

Segmentación (clasificación de objetos)

La segmentación es un proceso digital de agrupamiento de píxeles en segmentos (polígonos), los cuales guardan homogeneidad espectral entre sus píxeles (distancia espectral mínima) y el tamaño a agrupar (número mínimo de píxeles que conforman el segmento). Este proceso, se llevó a cabo con el programa ENVI 5.0 para la generación de áreas de entrenamiento de las cuales se conoce *a priori* la clase de cobertura a la cual pertenecen, siendo éstas la base para generar firmas espectrales de estas clases. Estas áreas fueron utilizadas para la clasificación a partir de árboles de decisión (*Random Forest*, explicados en la sección siguiente).

El proceso de segmentación se desarrolló considerando que:

1. La clasificación de objetos se hizo bajo el flujo de trabajo "*Example-Based Classification*", el cual permite usar datos de entrenamiento para asignar objetos a partir de los atributos seleccionados (algoritmo de segmentación y algoritmo de combinación).
2. El cálculo de los atributos de los segmentos se hizo ajustando los valores predeterminados del programa ENVI 5.0, de acuerdo a revisión de literatura, llegando a definir los siguientes parámetros adecuados para todas las escenas:
 - Algoritmo de segmentación: Edge²⁴
 - Nivel de escala: 35
 - Algoritmo de combinación: Full lambda Schedule²⁵
 - Nivel de combinación: 80
 - Textura Kernel: 3*3²⁶
3. Los datos de entrenamiento fueron seleccionados a partir de interpretación visual y análisis de cuatro fuentes de información disponible: mapa de ecosistemas 2000 (Vreugdenhil et al 2002; World Bank & CCAD. 2000), clasificación 2000 de MARENA (2007), mapas globales de cobertura (Hansen et al 2013) y Google Earth. No fue posible utilizar puntos de control del mapa de ecosistemas ni del mapa de clasificación del

2000, debido a errores no sistemáticos de ubicación espacial. Para evitar subjetividad en el análisis, los segmentos fueron analizados y clasificados independientemente por cuatro expertos en sensores remotos del CATIE²⁷, confirmando su veracidad. Un segmento es utilizado para clasificar cuando existe consenso entre al menos tres expertos ($\geq 75\%$). Los segmentos seleccionados como áreas de entrenamiento se designaron a las clases previamente establecidas. La selección de atributos (espectral, textural y espacial) se hizo de manera automática, permitiendo a ENVI 5.0 determinar los atributos más apropiados para la clasificación.

Árboles de clasificación (*Random Forest*)

Random Forest es un método computacional de clasificación rápido, efectivo y robusto en presencia de datos muy variables, que permite explicar datos y al que se pueden realizar estimaciones del error (Tsymbal et al. 2006). Es un método que presenta, en la mayoría de los casos, una mejor capacidad de predicción que los métodos de regresión clásicos.

El algoritmo de *Random Forest* está basado en la realización de múltiples árboles de decisión sobre muestras (o datos de entrenamiento, sección 4.11.2). Es muy efectivo para organizar grandes volúmenes de datos con exactitud y mejorar la precisión en la clasificación de la cobertura mediante la incorporación de aleatoriedad en la construcción de cada clasificador individual. Esta aleatorización puede introducirse en la partición del espacio (construcción del árbol), así como en la muestra de entrenamiento (Breiman 2001).

Una de las ventajas del algoritmo de *Random Forest* es que es un procedimiento no paramétrico muy útil cuando hay muchas variables correlacionadas y pocos datos, cuando hay interacciones complejas entre las variables predictivas o cuando hay muchos datos faltantes; siendo usado también como modo no supervisado para evaluar proximidades a lo largo de un set de puntos.

²⁴ Se seleccionó este algoritmo ya que detecta bordes de elementos donde los objetos de interés tiene bordes bien definidos.

²⁵ Se seleccionó este algoritmo ya que agrega pequeños segmentos dentro de áreas grandes y texturadas evitando la sobresegmentación.

²⁶ Se seleccionó este tamaño porque las áreas segmentadas son pequeñas y tienen alta variación espacial.

²⁷ Christian Brenes, Juan Carlos Zamora, Peter Schlesinger y Freddy Argotty



Algunas de las características adicionales del algoritmo Random Forest son (Breiman 2001):

- Es más preciso que otros algoritmos actuales.
- Funciona de manera eficiente con grandes bases de datos.
- Puede manejar miles de variables de entrada.
- Aporta estimaciones de qué variables son importantes en la clasificación.
- Se genera una estimación objetiva interna de la generalización de error a medida que avanza la construcción del bosque de clasificación.
- Tiene un método eficaz para estimar los datos faltantes y mantiene la precisión cuando una gran parte de los datos que faltan.
- Los bosques generados dan información acerca de la relación entre las variables y su clasificación.
- Se calcula proximidades entre pares de casos que se pueden utilizar en la agrupación, la localización de los valores atípicos o (por escala) dar interesantes vistas de los datos.
- Las características anteriores se pueden extender a los datos no etiquetados, que conducen a agrupamiento no supervisado, vistas de datos y la detección de valores atípicos.
- Ofrece un método experimental para la detección de iteraciones de variables.

Bajo el lenguaje de programación R (*R Development Core Team* 2008), se clasificaron las imágenes ópticas (Landsat) y de radar (ALOS-PALSAR y SENTINEL 1), utilizando el script desarrollado por Horning (2013). Este script sintetiza el protocolo de clasificación, generando además una capa que nos permite detectar píxeles con probabilidad (umbral del 75%) de ser clasificados correctamente y en caso contrario, reclasificarlos disminuyendo el error en la clasificación. Los insumos requeridos para poder clasificar las imágenes bajo esta rutina fueron:

- Polígonos de entrenamiento (segmentos)
- Tabla de atributos de los segmentos con las clases representadas por números enteros (este valor fue incluido en la capa de salida)
- Imagen satelital corregida atmosféricamente y combinada con la banda de cobertura fraccional de CLASlite (siete bandas).
- Imágenes de radar ALOS-PALSAR combinada (*stack*) con SRTMGL1 y pendiente en porcentaje.
- Imágenes de radar SENTINEL 1A combinada (*stack*) con SRTMGL1 y pendiente en porcentaje.

Las variables requeridas para la clasificación fueron:

- Shapefile: nombre y ubicación de los polígonos (áreas de entrenamiento)
- NumSamps: representa el número de muestras (píxeles) seleccionados al azar de cada clase de uso de suelo (200)
- Attname: nombre de la columna donde está la clasificación de usos de suelo expresado en valores enteros
- inImage: nombre y dirección de la imagen a ser clasificada
- outImageName: nombre y ubicación de la imagen clasificada en formato GeoTiff
- classImage: capa clasificada sin aplicar el umbral (threshold)
- threshImage: capa clasificada y set de píxeles con probabilidad menor que el umbral
- probThreshold: representa la probabilidad (en porcentaje) de que los píxeles correspondan a "X" clase de uso de suelo (75%)
- Trees: la cantidad de datos de entrada debe ser predicha al menos un par de veces (500 en este caso)

Validación del mapa de uso de la tierra y cobertura forestal 2014

De acuerdo con GOF-C-GOLD (2014) y Olofsson (2014), para una robusta evaluación de la exactitud temática de los mapas de uso/cobertura de suelo, que deriven en validaciones estadísticamente rigurosas se requieren tres elementos que incluyen el diseño de muestreo, diseño de respuesta y diseño de análisis.

El diseño de muestreo es un protocolo para la selección de ubicaciones en las cuales los datos de referencia son obtenidos. Un diseño de muestreo probabilístico es el enfoque preferido y típicamente combina ya sea un diseño aleatorio simple, sistemático, o estratificado con conglomerados. El protocolo del diseño de muestreo incluye especificaciones del tamaño, ubicación de las muestras, y las unidades de evaluación de referencia (píxeles, bloques de imágenes). En este estudio no se realizó un diseño de muestreo debido a limitaciones logísticas y la selección de ubicaciones correspondió a sitios accesibles en el campo. El proceso de selección de la fracción de observaciones utilizadas para la clasificación y validación se realizó siguiendo lineamientos del MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio; CDM



2012), de manera aleatoria estratificada que provee una cantidad de muestras para cada clase proporcionales al área de esta en una clasificación preliminar.

El diseño de respuesta consiste en los protocolos utilizados para concordar las clases de referencia y las clases predefinidas para el mapa clasificado. La información de referencia usada debe provenir de fuentes de información de mayor calidad de la que ofrecen otros mapas. Generalmente se considera información levantada directamente en campo, pero los datos de alta resolución derivados de sensores remotos también son utilizados mediante interpretación visual.

El diseño de análisis o validación incluye estimadores (formulas estadísticas) y procedimientos analíticos para la estimación de la precisión y su reporte. Los estimadores deben ser consistentes con el diseño de muestreo (la cantidad de datos de referencia deben ser proporcionales a las áreas de las categorías de uso del suelo). Las comparaciones de los mapas producidos contra los datos de referencia producen un conjunto de estimaciones estadísticas que incluyen matrices de error, la exactitud de la cada clase específica (errores de comisión y omisión), y área de cambio estimada. Adicionalmente, se puede acompañar de intervalos de confianza y varianzas asociadas.

El proceso de validación consiste en la comparación entre el valor asignado a un punto dado en el mapa y el valor observado en el mismo punto en el campo u otra fuente considerada “verdad” (puntos de control). Los valores estimados de exactitud de clasificación son determinados para un producto y permiten la comparación entre diferentes productos. Existen técnicas descriptivas que permiten derivar métricas para realizar estas evaluaciones que se basan en una matriz de confusión de la clasificación y se describen a continuación (Richard et al. 2006, Congalton et al. 2009, Eastman 2012):

La matriz de confusión es un arreglo tabular de filas y columnas en el cual se compara la clasificación temática

(estimado) contra las verdades de terreno (observado) según la cantidad de píxeles clasificados correctamente (diagonal) o incorrectamente (fuera de la diagonal) dentro de una o varias clases (usos/coberturas).

La matriz de confusión permite estimar los errores de comisión y omisión. Los errores de comisión ocurren cuando un píxel se incluye dentro de una categoría incorrecta, o sea, todas aquellos píxeles que se asignaron a dicha categoría y que no pertenecen a ella. Por ejemplo, el porcentaje de píxeles de no-bosque (reales) que se clasificaron como bosque y que sobrestiman el área que pertenece a la clase de bosque en la clasificación. Los errores de omisión se dan cuando un área es excluida de la categoría a la cual pertenece, es decir, todas aquellas parcelas que no fueron asignadas a las categorías que les corresponde. Por ejemplo, el porcentaje de bosque que se clasificó en otras categorías y que generan una subestimación del área de bosque.

La exactitud del productor es la relación entre el número de píxeles clasificados correctamente en el mapa y el total de verdades de terreno usadas. Expresa el porcentaje de verdades de terreno que se clasificaron acertadamente. La exactitud del usuario es la relación entre el número de píxeles correctamente clasificados y el total de píxeles de dicha categoría en el mapa. Explica el porcentaje de los píxeles que están asignados en la categoría a la que realmente pertenecen. La exactitud global es la proporción de píxeles clasificados de manera correcta, sobre el número total de verdades de campo utilizadas.

Los totales verdaderos son las verdades de terreno, este caso la cantidad de puntos de cada categoría utilizados como referencia para guiar la clasificación. Los totales clasificados son las clases de uso/coertura resultante de la clasificación que corresponden a los puntos de las verdades de terreno. Los puntos correctos corresponden a la diferencia entre totales verdaderos y totales clasificados de cada categoría.

Resultados de la preparación y procesamiento de las imágenes

Se presenta a continuación una descripción en cada paso metodológico y sus resultados.

Preprocesamiento de las imágenes de radar

Las imágenes obtenidas producto de este proceso de restauración (relleno de pixeles), son de buena calidad y permiten ser clasificadas por métodos automáticos y semiautomáticos. Encontramos que el filtro Lee 5*5 es el que presenta mejor resalte y eliminación del ruido (Figura 4). El “buen aspecto” que implica la desaparición total o casi total de las huellas del bandeo mejora la clasificación.

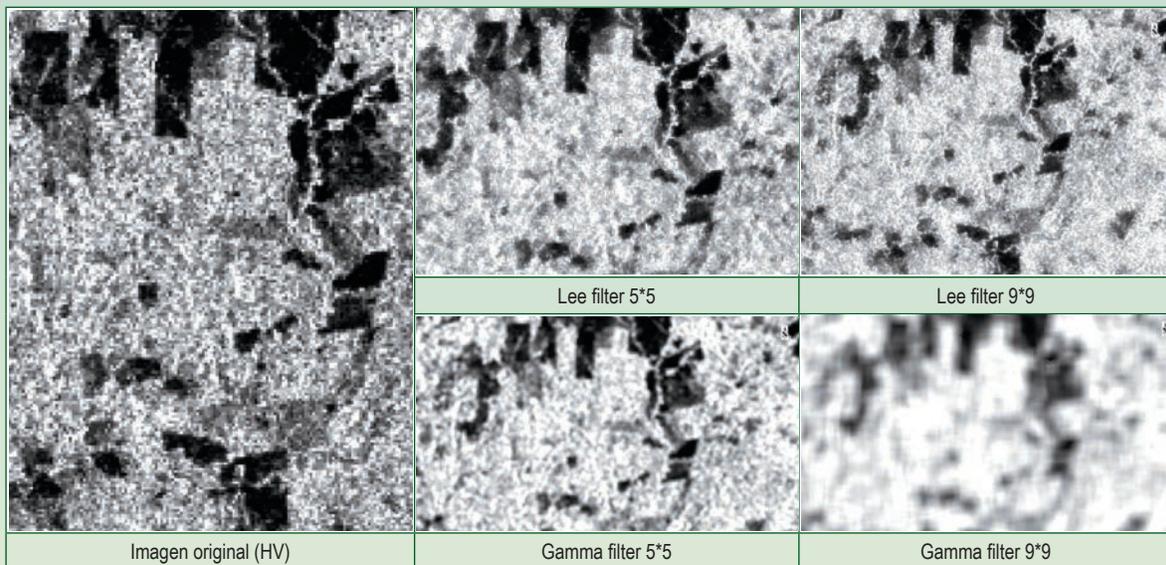


Figura 4. Eliminación de ruido en imágenes ALOS PALSAR (ejemplo tomado sobre el periodo 2008)

Cobertura fraccional y clasificación bosque/no bosque

A partir del árbol de decisión basado en la fracción de cobertura de vegetación y de sustrato expuesto, CLASlite convirtió estos resultados en una imagen con cuatro clases:

PV: vegetación fotosintéticamente activa

S: suelo expuesto (pixeles enmascarados)

Bosque: $PV \geq 80$ y $S < 20/15/25$

No bosque: $PV < 80$ y $S > 20/15/25$

Se encontró que los valores predeterminados de CLASlite (80/20 para PV y S, respectivamente) dieron buenos resultados para todas las escenas (Figura 5), lo que nos lleva a concluir que los bosques de la RACCN mantienen características similares con la amplia gama de firmas de la biblioteca espectral de bosques tropicales usada en CLASlite²⁸.

Enmascaramiento de imágenes Landsat

Las escenas Landsat de todos los periodos fueron combinadas con la banda de cobertura fraccional de CLASlite, obteniendo un stack de siete bandas para la clasificación de la cobertura del suelo. La banda de CLASlite, además de servir para discriminar bosque, también es útil para enmascarar nubes y agua. Esto permite eliminar el “ruido” o dudas en la clasificación, dando mayor peso a la información de bosque/no bosque. La Figura 6 permite visualizar la clasificación de

bosque/no bosque con el color natural de la cobertura; se detalla al lado izquierdo la combinación de bandas en color natural (bandas 3, 2 y 1) y al lado derecho la imagen de cobertura fraccional por CLASlite enmascarada en suelo expuesto (S), vegetación fotosintética (PV) y vegetación no fotosintética (NPV).

Clasificación

Las imágenes satelitales fueron clasificadas para cada periodo (2000-2008 y 2014), eliminando problemas de presencia de nubes y bandedo de las imágenes ópticas (Landsat) con el producto de cobertura de árboles de Hansen (2013) para el periodo 2000 y con imágenes de Radar (ALOSPALSAR y Sentinel 1A) para los periodos 2008 y 2014 respectivamente (Figura 7). Para la clasificación de todos los periodos se utilizó el algoritmo *Random Forest*. Las clases de uso/cobertura resultantes de la clasificación para cada fecha se muestran en el Cuadro 4 y permiten ver los grandes patrones de distribución de la cobertura del suelo a lo largo del tiempo.

Validación

Para la validación del mapa de uso/cobertura de 2014 se usaron 436 observaciones de campo, tomadas de los puntos de control suministrados por ICRAF (2015) y otra porción extraída de las parcelas del INF (INAFOR 2009). El convenio CATIE-ICRAF en la RACCN tuvo

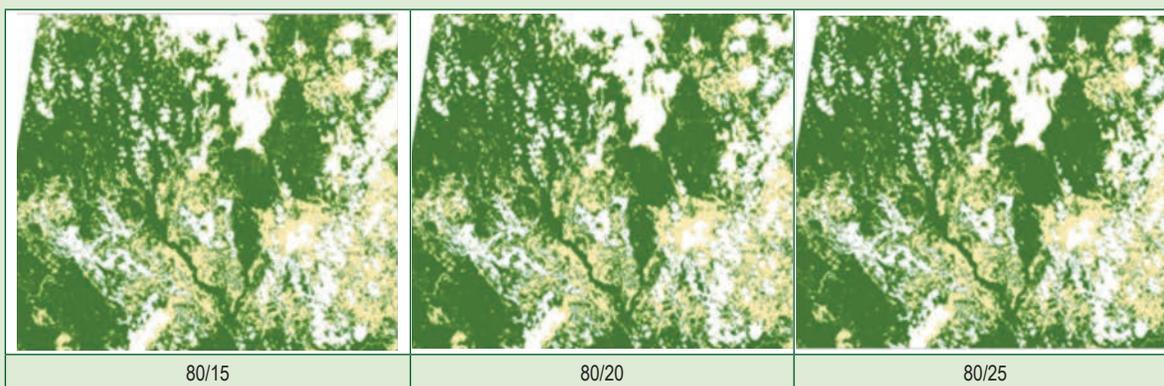


Figura 5. Cobertura fraccional de bosque bajo diferentes umbrales de ajuste de PV (vegetación fotosintéticamente activa) y S (sustrato expuesto)

²⁸ El algoritmo empleado en la separación de las clases se ajusta a una amplia variedad de bosques tropicales.

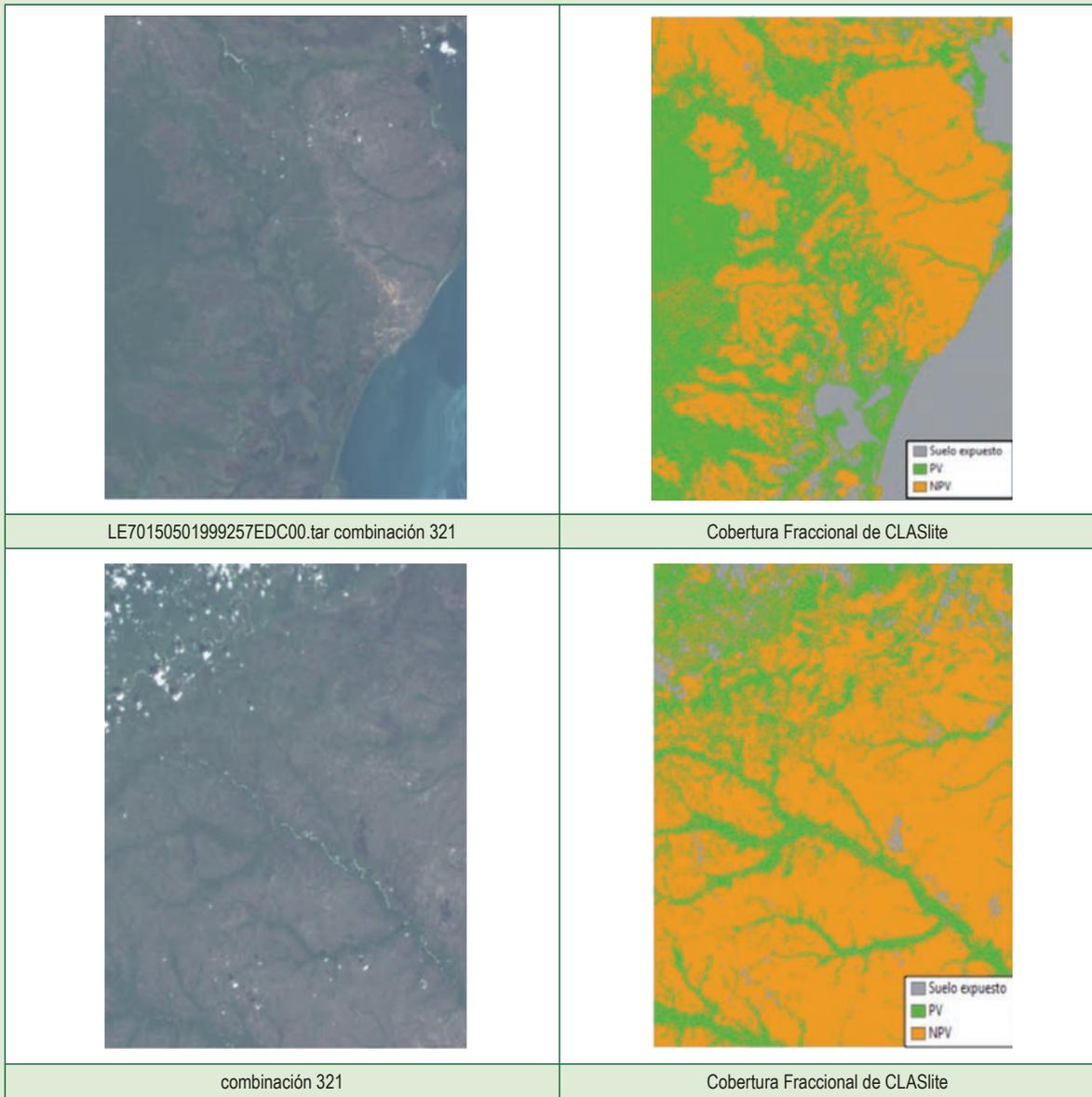


Figura 6. Combinación de imágenes Landsat en color natural y separación bosque/no bosque con CLASlite

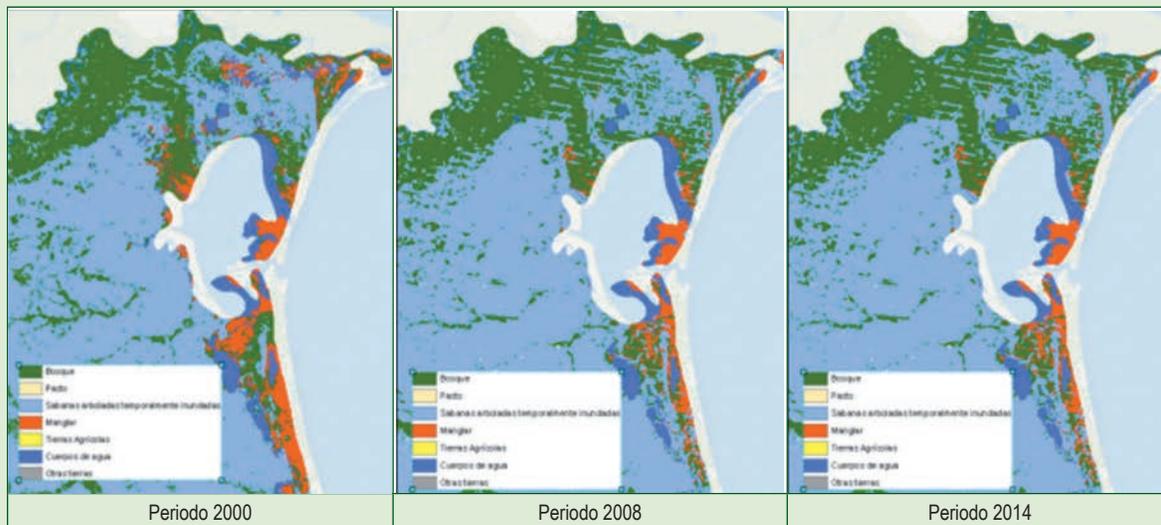


Figura 7. Cobertura del suelo para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, según clasificación de imágenes satelitales para los años 2000, 2008 y 2014

como objetivo principal apoyar la fase de campo y el procesamiento de información espacial. Gracias al apoyo de ICRAF fue posible además, obtener estudios e información documental específica de la zona, así como el contexto de la dinámica agropecuaria y forestal. La diagonal de la matriz de confusión (Cuadro 7) presenta la cantidad de observaciones de terreno correctamente clasificadas; el resto de los datos sobre las filas representan los errores de comisión, y sobre las columnas los errores de omisión. Se muestra a continuación la validación de las clases de bosques y pastos ya que son las categorías para las que se contó con un número suficiente (50 o más observaciones por categoría según Congalton et al. (2009) de verdades en el terreno.

Cuadro 7. Matriz de confusión de la clasificación del mapa de uso/cobertura 2014

Observados	Estimados (clasificación)		
	Bosque	Pasto	Total
Bosque	165	41	206
Pasto	23	207	230
Total	188	248	436

En el caso del bosque fueron clasificadas correctamente 165 de 206 muestras, en el pasto 207 de 230 (Cuadro 7) indicando una exactitud del “productor” del bosque es de 80,1%, es decir, que 8 de cada 10 pixeles de dicha categoría están correctamente clasificados (Cuadro 8). La métrica de la exactitud del usuario expresa la probabilidad de un pixel de bosque en el mapa clasificado sea bosque en el terreno. En el caso del bosque este valor es de 87,8%. La diferencia entre

Cuadro 8. Evaluación de la exactitud de la clasificación del mapa de uso/cobertura 2014

Clase	Totales verdaderos	Totales clasificados	Correctos
Bosque	206	188	165
Pasto	230	248	207
Total	436	436	372

Clase	Exactitud del productor %	Exactitud del usuario %	Errores de omisión %	Errores de comisión %
Bosque	80,1	87,8	19,9	12,2
Pasto	90,0	83,5	10,0	16,5
Exactitud global	85,3			

ambos valores radica en que la exactitud del usuario es afectada por los errores de comisión en tanto que la exactitud del productor por los errores de omisión. Se recomienda reportar la matriz de errores completa (Congalton et al. 2009).

Los errores de omisión y comisión para el bosque, también presentan valores similares: el 19,9% de los pixeles que son bosque en el terreno quedaron asignados en otra categoría en el mapa, mientras que el 12,2% de los pixeles bosque del mapa pertenecen a una categoría diferente en el terreno. Por último, la

exactitud global del mapa es de 85,3%, lo que implica una alta consistencia y robustez metodológica.

La relación *exactitud del productor/errores de omisión* indica el porcentaje de aciertos/desaciertos esperados del mapa de uso/cobertura cuando se compara contra el terreno. Por otro lado, la relación entre la *exactitud del usuario/errores de comisión* expresa el porcentaje de aciertos/desaciertos cuando se coteja la realidad del terreno contra el mapa. La Figura 8 ilustra los errores que resultan menores al 20%.

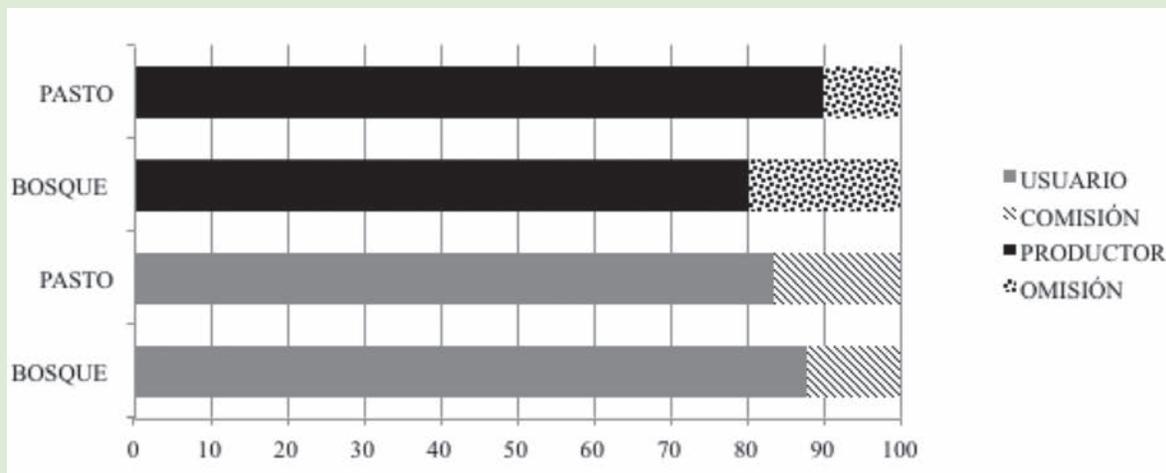


Figura 8. Métricas de desempeño de las clases evaluadas



Análisis de cambios históricos de los usos de la tierra

Después de preparar las imágenes se procedió a analizar cómo el uso de la tierra cambió durante las fechas bajo consideración. Este análisis se realizó en dos etapas: la primera calibra y valida la capacidad del modelo espacial para simular la deforestación pasada y define el potencial para simular escenarios futuros, cuantificando el efecto histórico de los determinantes en la deforestación de un periodo observado y luego validando el modelo con la deforestación histórica observada en una serie temporal de mapas de uso del suelo. En una segunda etapa se plantean escenarios hipotéticos de desarrollo para el país o región subnacional con el objetivo de evaluar cómo estos afectarían la dinámica de uso y cambio de uso de la tierra a futuro (escenarios futuros).

En la calibración del modelo se busca entender las relaciones entre la deforestación observada y una serie de determinantes que pueden explicarla (ej. una mayor deforestación en zonas planas y con mejor accesibilidad). La sección de validación consiste en comparar los resultados de la simulación hecha por el modelo, con la deforestación observada en los mapas de uso de la tierra en periodos similares, para cuantificar el desempeño del modelo. Ambas secciones requieren de mapas de uso y cobertura del suelo en diferentes

periodos de tiempo, así como un análisis de los determinantes de la deforestación. Se describen en esta sección las fuentes de datos utilizadas y el análisis del cambio de uso del suelo histórico de la RACCN.

Información utilizada para estimar los determinantes de cambio de uso de la tierra

Los determinantes de cambio de uso de la tierra evaluados son 28 variables explicativas, obtenidas de diferentes fuentes. Este listado de variables incluye 14 evaluadas como categóricas, seis evaluadas como distancia euclídea, cinco categóricas que también fueron evaluadas como distancia euclídea y tres evaluadas como variables continuas (Cuadro 9).

Para obtener la información anterior se presentó, en marzo de 2015, la propuesta de trabajo de esta consultoría ante técnicos y autoridades del Consejo Consultivo Forestal y Ambiental (CCF-A). Esta visita sirvió además para conseguir datos geoespaciales y socializar objetivos y actividades de la consultoría y conseguir aprobación para el manejo de información en el Laboratorio de Modelado Ambiental (LMA), del CATIE. Una visita posterior involucró una serie de entrevistas con funcionarios de diferentes instituciones (MARENA, MAGFOR, INAFOR, URACCAN, RainForest Alliance, UICN, etc.) a quienes se les entregó solicitudes oficiales para la adquisición de datos.

Cuadro 9. Determinantes del uso y cambio de uso de la tierra evaluados para explicar la deforestación de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2000-2011

Variable explicativa	Descripción	Tipo de variable	Fuente
Amenaza inundación	Zonas con amenazas por inundación	Categoría	INETER
Aprovechamiento forestal	Planes de aprovechamiento forestal	Categoría (también distancia euclídea)	INAFOR
Áreas protegidas	Límites de áreas protegidas de la RACCN	Categoría (también distancia euclídea)	SIG BOSAWAS
Amenaza de inundación	Áreas con amenaza de inundación debido a desbordamiento de ríos	Categoría	SERENA
Aprovechamiento forestal	Zonas con permisos de aprovechamiento forestal	Categoría	SERENA
Áreas protegidas	Límite de las áreas protegidas	Categoría (también distancia euclídea)	SERENA
Biósfera Bosawás	Límite de la Reserva de la Biósfera Bosawás	Categoría	SIG Bosawás
Ciclones	Trayectoria de los ciclones tropicales en la RACCN	Distancia euclídea	NHC-NOAA
Concesiones petroleras	Ubicación de las concesiones petroleras	Categoría (también distancia euclídea)	SERENA
Cuencas y subcuencas	Delimitación de las cuencas y subcuencas en la RACCN	Categoría	MARENA - INETER - MAGFOR
Cuerpos de agua	Lagos, lagunas, ríos navegables y ríos no navegables.	Distancia euclídea	SIG BOSAWAS
Elevación	Elevación sobre el nivel del mar (30 m)	Continúa	MDT Misión SRTM, NASA 2003
Hidroeléctricas	Ubicación de proyectos hidroeléctricos	Distancia euclídea	Desconocido
Incendios	Puntos de calor medidos por medio de satélite, entre el año 1996 y 2011.	Distancia euclídea	FIRMS
Minería	Solicitudes y concesiones mineras	Categoría (también distancia euclídea)	SEPLAN GRAAN
Poblados	Comunidades pertenecientes a la RACCN	Distancia euclídea	MAGFOR
Precipitación	Precipitación anual histórica (periodo de referencia 1950-2000)	Continúa	Worldclim
Red vial	Infraestructura vial (calles principales y secundarias)	Distancia euclídea	MAGFOR
Temperatura	Temperatura promedio anual histórica (periodo de referencia 1950-2000)	Continúa	Worldclim
Territorios indígenas	Límites de territorios indígenas	Categoría	CONADETI
Textura del suelo	Textura de la capa superficial del suelo	Categoría	MARENA
Tipo de bosque	Tipo de bosque según el mapa de ecosistemas (año 2000)	Categoría	CATIE
Unidad geomorfológica	Clasificación de los accidentes geográficos	Categoría	MARENA
Uso potencial	Uso potencial del suelo (año 2010)	Categoría	MARENA - MAGFOR - INAFOR - INETER
Zonas de recarga	Potencial de zonas de recarga acuífera	Categoría	Metodología CATIE
Zonificación Bosawás	Zonificación de la Reserva de la Biósfera Bosawás	Categoría	SIG Bosawás
Zonificación CBA	Propuesta de zonificación para la RACCN	Categoría	CBA 2004
Zonificación INAFOR	Zonificación del Plan de Ordenamiento Forestal	Categoría	INAFOR 2009

Resultados sobre el análisis histórico del cambio de uso

Con los mapas de uso/cobertura del suelo de los años 2000, 2008 y 2014 (Anexo 5), se generó un análisis de dirección, magnitud y localización espacial de los cambios en los usos de la tierra del paisaje de la RACCN.

Como parte del proceso se crearon matrices de transición para cuantificar los cambios entre las diferentes clases de uso/cobertura.

Se observó un aumento de la superficie de tierras forestales, pasando de 49,3% en 2000, a 58,1% en 2014. Esta dinámica es producto de la reducción de

coberturas como el pasto y las tierras agrícolas, que pasaron de 22,9% a 18,3% y del 2,9% al 1,2%, respectivamente. La cobertura de Sabanas Arboladas Temporalmente Anegadas (SATA) y el resto de las categorías se ha mantenido estable a lo largo del tiempo (Figura 9).

La cobertura de tierras forestales creció 10,7% en el primer periodo y un 6,4 % en el segundo; asimismo, el pasto experimentó un decrecimiento del 15,3% del

2000 al 2008 y del 5,7% del 2008 al 2014. De igual forma, las tierras agrícolas experimentaron una contracción del 59,2% y 1,2% en el primer y segundo horizonte, respectivamente (Cuadro 10).

Entre los años 2000 y 2014, las tierras forestales y el manglar aumentaron en 277 251 ha y 3 846 ha, respectivamente. Por el contrario, los pastos, SATA y tierras agrícolas perdieron 146 464 ha, 69 342 y 52 629 ha, respectivamente (Figura 10).

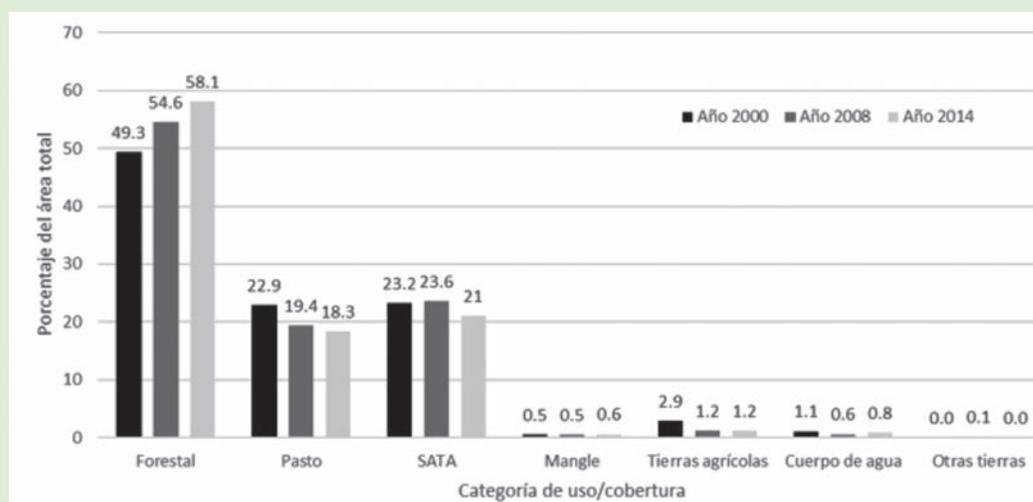


Figura 9. Distribución relativa de la cobertura de la tierra de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en 2000, 2008 y 2014

Cuadro 10. Distribución relativa, absoluta y cambios de uso/cobertura, según tipo de uso/cobertura, RACCN, 2000, 2008, 2014

Uso	2000		2008		% cambio 00-08	2014		% cambio 08-14
	Área (ha)	%	Área (ha)	%		Área (ha)	%	
Forestal	1 563 440,6	49,3	1 730 271	54,6	10,7	1 840 692,1	58,1	6,4
Pasto	727 129,2	22,9	615 600	19,4	-15,3	580 665,3	18,3	-5,7
SATA	735 270,8	23,2	747 876	23,6	1,7	665 929,2	21,0	-11,0
Mangle	15 076,7	0,5	14 892	0,5	-1,2	18 922,8	0,6	27,1
Tierras agrícolas	90 636,9	2,9	37 016	1,2	-59,2	38 007,9	1,2	2,7
Cuerpos agua	35 666 0	1,1	18 270	0,6	-48,8	24 347,1	0,8	33,3
Otras tierras	1 453,4	0,0	4748	0,1	226,7	109,3	0,0	-97,7
Total	3 168 674	100	3 168 674	100		3 168 674	100	

* Los porcentajes de cambio se estimaron con base en el área total de clase al inicio de periodo. La categoría SATA corresponde a las sabanas arboladas temporalmente anegadas.

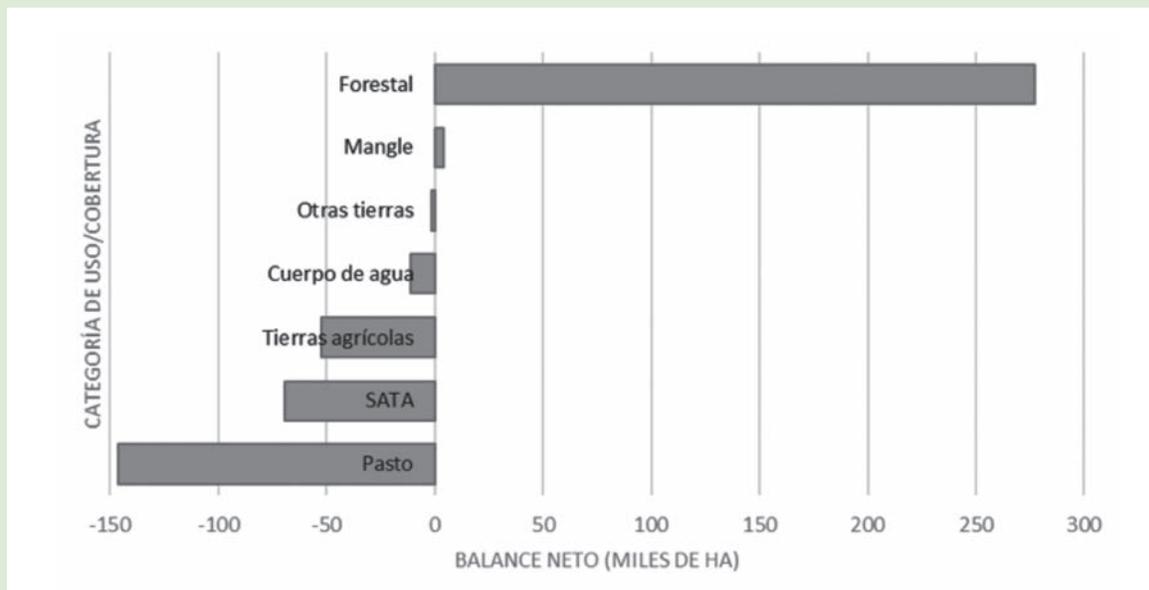


Figura 10. Balance neto en la dinámica de cambio de uso/cobertura del suelo de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2000-2014

La matriz de transición 2000-2014, a partir de un arreglo tabular de filas y columnas, expresa la persistencia (diagonal), pérdidas y ganancias para cada uso/cobertura del suelo evaluado (Cuadro 11). La deforestación para el periodo se estimó en 337 824 ha, persistiendo en 2014 un 80,3% de la superficie original de las tierras forestales del 2000. La reducción de esta categoría se da principalmente por la conversión a pastos (71,8%), a SATA (21,7%) y, en menor grado, a tierras agrícolas (4,6%). Por otro lado, se observó un incremento de las tierras forestales de 584 576 ha, lo que significa un 15% de aumento respecto al 2000; el 67,8% de la superficie ganada por las tierras forestales proviene de la categoría pastos.

Por medio de la matriz de transición de uso/cobertura del suelo (Cuadro 11) se analizó el cambio total (la suma de pérdidas y ganancias), la pérdida o ganancia neta (resta de pérdidas y ganancias) y el intercambio (cambio total menos la pérdida o la ganancia neta). En términos generales, dentro del periodo 2000-2014 se observó una *ganancia neta* de las tierras forestales de 277 251 ha. El *intercambio* de las tierras forestales fue de 614 649 ha, lo que representa un 39,3 % del total de tierras forestales del año 2000.

La distribución espacial de la deforestación en la RACCN es diferente entre los dos periodos analizados (2000-2008, 2008-2014). Los sectores más afectados por la deforestación en el primer periodo son la sección central y los sectores Norte y Noreste, además la frontera con Honduras, mientras que en el segundo periodo la deforestación se distribuye principalmente hacia el Sur de la región (Figura 11). Entre 2000 y 2008 se perdieron aproximadamente 266 750 ha de tierras forestales (17% de la cobertura del 2000). Mientras tanto, entre 2008 y 2014 se perdieron 295 063 ha, lo que representa un 16,5% de la superficie presente en 2008. Las matrices de cambio de uso para los periodos 2000-2008 y 2008-2014, se encuentran en el Anexo 6.

En la Figura 12 se observan diferentes grados de afectación del huracán Félix sobre el área de estudio. La mayor concentración de deforestación coincide con el área de alta afectación del huracán, por lo que se puede suponer que esta pérdida de tierras forestales se debe, en mayor medida, a una perturbación natural producto del huracán. Las emisiones y remociones de GEI debidas a perturbaciones naturales son reportadas en los resultados, pero no son contabilizadas como créditos de carbono disponibles para los participantes REDD+, debido a que no son eventos frecuentes (VCS 2014).

Cuadro 11. Matriz de transición de uso/cobertura del suelo de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, 2000-2014

Uso/cobertura	Forestal	Pasto	SATA	Mangle	Tierras agrícolas	Cuerpos agua	Otras tierras	Total 2014	Ganancia	Cambio total	Intercambio	Ganancia neta	Pérdida neta
Forestal	1 256 117	396 545	139 810	4608	36 061	6765	786	1 840 692	584 576	891 900	614 649	277 251	
Pasto	220 814	305 286	2573	0	51 770	63	159	580 665	275 380	697 223	550 760		146 464
SATA	66 924	5425	580 388	298	279	12 357	259	665 929	85 541	240 425	171 083		69 342
Mangle	4116	317	3408	10 008	0	1055	19	18 923	8915	13 983	10 137	3846	
Tierras agrícolas	14 219	19 123	2100	0	2505	13	48	38 008	3 5503	123 634	71 005		52 629
Cuerpos agua	1221	406	6979	160	18	15 381	182	24 347	8966	29 251	17 932		11 319
Otras tierras	30	27	14	3	3	32	0	109	109	1562	218		1344
Total 2000	1 563 441	727 129	735 271	15 077	90 637	35 666	1453	3 168 674	998 989	998 989	717 892	281 098	
Pérdida	307 324	421 844	154 883	5069	88 132	20 285	1453	998 990					

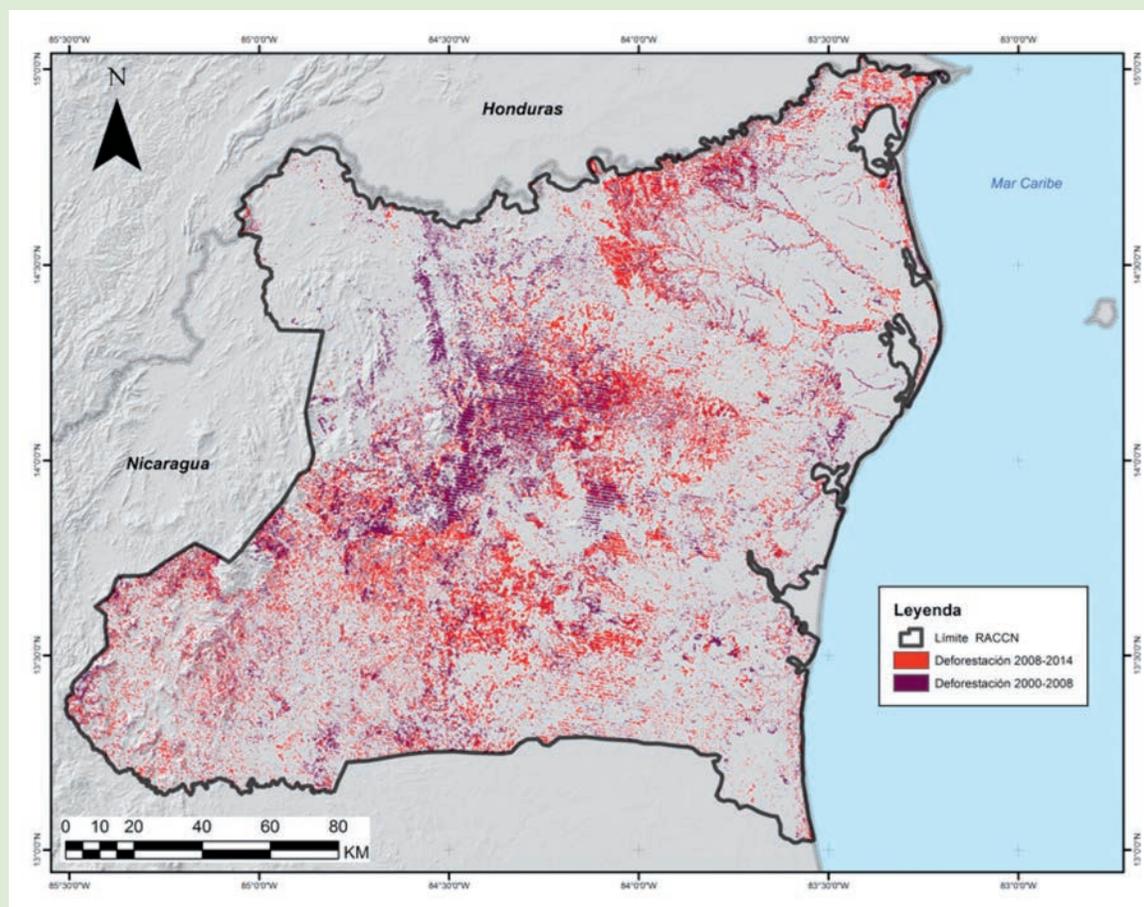


Figura 11. Distribución espacial de la deforestación en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua. Periodo 2000-2014

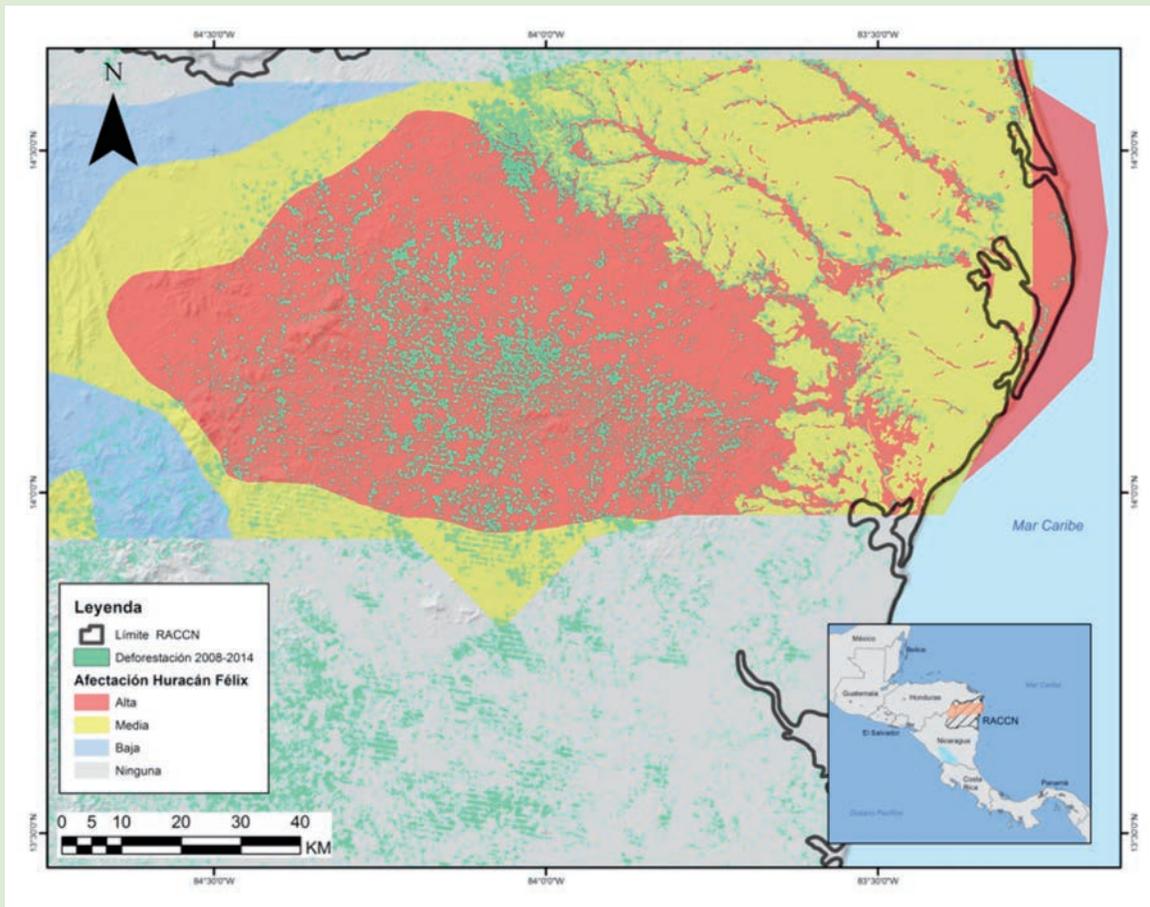


Figura 12. Grados de afectación del huracán Félix 2007 (MARENA e INAFOR 2007) y deforestación estimada 2008-2014 para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua



Proyección de la deforestación a futuro

Posterior al análisis histórico de la deforestación de la RACCN, se proyectó la deforestación futura. Para desarrollar una proyección, se define primero un escenario hipotético o situación futura. Un escenario lo definen una serie de supuestos (ej. cambio en políticas, nueva infraestructura, nuevas tasas de cambio de uso de la tierra, etc.) que afectarán la dinámica de deforestación. Un escenario de este tipo puede ser definido según criterio de expertos, tomando en cuenta futuros desarrollos, cambios en políticas que afecten el sector forestal y/o agropecuario, tendencias globales para el sector agropecuario, entre otros.

Una vez definido el escenario, se debe calibrar y validar un modelo de cambio de uso de la tierra. Un modelo lo conforman las variables o determinantes que explican el cambio de uso de la tierra y la tasa de cambio y se construye mediante el uso de programas computacionales.

Tras lo anterior, se procede a la simulación futura de los cambios de uso de la tierra (deforestación). La simulación futura consiste en introducir los supuestos del escenario futuro, al modelo ya validado. Esto nos da como resultado un mapa donde se muestran áreas críticas o amenazadas por deforestación o áreas potenciales para la recuperación de cobertura forestal.

Para realizar este proceso en el presente estudio, el trabajo se apoyó en el uso del programa de modelación DINAMICA-EGO (Soares-Filho et al. 2002; referido como DINAMICA de ahora en adelante), por sus ventajas en cuanto a la localización de los cambios de uso/cobertura de la tierra y su facilidad de uso. Para la calibración también se utilizó el módulo *Land Change Modeler* (LCM) del programa TerrSet (Clark Labs 2015), debido a sus robustas técnicas de discriminación de determinantes de cambio de uso de la tierra.

Modelado del escenario futuro de deforestación

Se formuló un posible escenario o “camino” de desarrollo futuro que podría afectar el cambio de uso de la tierra en la RACCN, el cual consistió en continuar con la misma tendencia en el cambio de uso de tierra que se observó en el periodo 2008-2014. Al escenario se le denominó *Escenario de referencia*, y proyecta la deforestación para el periodo 2014-2034, usando la tasa histórica de cambio de uso del suelo observada para el periodo 2008-2014. Se utiliza el primer periodo de datos (2000-2008) para la calibración del modelo (donde DINAMICA “aprende” el proceso de deforestación) y el segundo periodo (2008-2014) para la validación del modelo (donde se corrobora que DINAMICA “aprendió” cómo se da el proceso de deforestación). Una vez que se ajusta el modelo de cambio de uso de la tierra, el siguiente paso es la simulación para el periodo futuro (2014-2034)²⁹.



Es importante hacer notar que potenciales perturbaciones naturales se deben eliminar o descontar de las áreas de pérdida de tierras forestales de la tasa histórica de deforestación (VCS 2014). El huracán Félix ocurrido en la RACCN en 2007 es un evento no usual que afectó la cantidad de emisiones de GEI en el área de estudio. Para definir la tasa de deforestación dentro del escenario futuro, no se tomó en cuenta la pérdida de tierras forestales en las categorías alta y media de afectación del huracán Félix (de acuerdo al área de afectación definida mediante un análisis en campo³⁰; Figura 12).

El modelo realizado con DINAMICA se calibró utilizando el periodo 2000-2008 y fue validado en el periodo 2008-2014, comparando el mapa simulado por el modelo DINAMICA (de acuerdo al proceso aprendido en la calibración) y el mapa observado para el año 2014. Luego se proyectaron esas tendencias de cambio hasta el año 2034. Se escogió ese año para que sea compatible con la duración de otros proyectos forestales de carbono (ej. proyectos GEF).

Modelado de deforestación con DINAMICA-EGO

Este programa de modelación es un “autómata celular” usado para el modelado espacial de dinámicas de cambio de usos de la tierra de un paisaje basado en probabilidades de transición de los píxeles (Soares-Filho et al. 2002). A diferencia de otros programas de cómputo similares, como por ejemplo CLUE-S (Verburg et al. 2002), que define las probabilidades de estado de un píxel (de pertenecer a cada una de las clases de uso de la tierra del mapa, ver descripción más adelante), DINAMICA se basa en las relaciones entre los determinantes de cambio de uso de la tierra y los píxeles que tuvieron transiciones entre dos fechas de estudio (ej. píxeles deforestados). El cálculo de las probabilidades de transición para cada píxel se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$G_{ij}(V) = \beta_{0,ij} + \beta_{1,ij}V_{1,xy} + \beta_{2,ij}V_{2,xy} + \dots + \beta_{n,ij}V_{n,xy}$$

Donde:

- i = i-ésimo tipo de uso del suelo
- j = j-ésimo tipo de uso del suelo
- n = n-ésimo factor explicativo del uso del suelo (variable que determina el cambio)
- V = es un vector de n variables espaciales, medidas en la localidad x,y.
- G_{ij} = probabilidad de ocurrencia de la transición ij de acuerdo a un conjunto de vectores V
- β = factor explicativo

El efecto de las variables explicativas sobre cada transición se cuantifica mediante el cálculo de los “pesos de evidencia”. Estos pesos se basan en las probabilidades condicionales de que un cambio suceda dado que ciertos cambios o condiciones hayan también ocurrido (Mas y Sandoval 2011). Por ejemplo, el peso w⁺ evalúa la probabilidad de que ocurra deforestación dada cierta cercanía a la carretera y se estimó de la siguiente forma:

$$w^+ = \ln \left[\frac{P(C|D)}{(C|\bar{D})} \right]$$

Donde:

- (C|D) = la probabilidad de estar cerca de la carretera dado que hubo deforestación (ej. la cantidad de píxeles deforestados cercanos a la carretera) y
- (C| \bar{D}) = la probabilidad de estar cerca de la carretera dado que no hubo deforestación (ej. la cantidad de píxeles no deforestados cercanos a la carretera).

El peso es positivo si la cercanía a las carreteras aumenta la probabilidad de que exista deforestación y negativo si aumenta la probabilidad de que no exista deforestación (Mas y Sandoval 2011). Los pesos condicionales de cada determinante para una transición se suman, por lo que se asume que las variables son independientes. Se estima entonces la probabilidad de

²⁹ El proceso consideró la metodología VCS VM0015 v1, Párrafo 2, paso 4. Esta metodología se ajusta a las condiciones encontradas en la RACCN y define el procedimiento que debe ser llevado a cabo para una correcta estimación de la línea base de emisiones de GEI.

³⁰ <http://www.nicaraguatriunfa.com/documentos2007/OCTUBRE/INFORME%20EVALUATIVO%20AL%20BOSQUE%20Octubre%202007%20Final.pdf>



una transición dadas las condiciones de todos los determinantes utilizados. En la práctica, estos pesos se estiman sobre las clases de las variables categóricas o sobre la categorización de las variables continuas, mediante la evaluación de pesos sobre rangos predefinidos de cada variable.

El modelo de cambio de uso de la tierra utilizando DINAMICA permite tomar en cuenta el efecto del vecindario de los píxeles sobre las probabilidades de transición mediante las funciones “*patcher*” y “*expand*”. El primer proceso permite formar nuevas “áreas” de transición en el paisaje, en tanto que el segundo se enfoca en contraer o expandir parches de uso de la tierra ya existentes. Ambos efectos actúan sobre el porcentaje de transiciones simuladas bajo uno u otro efecto y por lo tanto se complementan. La proporción entre ambos factores se puede evaluar con base en la dinámica histórica de las transiciones, de manera que refleje la estructura del paisaje (Soares-Filho et al. 2002). El modelo ejecuta las transiciones estocásticamente sobre los píxeles con mayores probabilidades de transición, primero para la fracción de transiciones asignadas al “*expand*” y luego para el “*patcher*”. Como resultado, dos simulaciones con la misma configuración no serán idénticas a nivel de píxel individual, sin embargo, conservarán la estructura del paisaje (Soares-Filho et al. 2002).

Con DINAMICA la comparación entre determinantes solo puede hacerse visualmente sobre los valores de los pesos de evidencia. Esto es una desventaja del modelo de probabilidad de cambio de uso de la tierra de DINAMICA, dada la subjetividad del método para la escogencia de las variables que explican los cambios de uso de la tierra. Esta falencia, se puede solucionar mediante el uso del módulo *Land Change Modeler* (LCM) del programa TerrSet (Clark Labs 2015). Este es un módulo de simulación de cambio de uso de la tierra que permite evaluar la importancia de una variable en la transición simulada mediante análisis estadístico. El estadístico “V” de Cramer es utilizado para medir el poder explicativo de cada variable en la transición y el método Multi-Layer Perceptron (MLP) combina las variables indicando cual combinación explica de mejor manera la transición (Eastman 2016). Este método fue aplicado para separar las variables significativas en cada una de las transiciones simuladas. De este modo, se seleccionaron las variables determinantes explicativas que posteriormente serían utilizadas por

el modelo DINAMICA para calcular el archivo de pesos de evidencia (significancia de cada variable en la transición simulada).

Consideraciones sobre el uso de DINAMICA versus otros programas

Los modelos DINAMICA, CLUE-S y las técnicas econométricas son herramientas comúnmente utilizadas en otros análisis y de fácil acceso por ser gratuitas. En el Cuadro 12 se muestra una comparación entre técnicas, basada en su probabilidad espacial, el método de estimación, pesos y cómo ocurre el cambio, entre otras características.

A continuación, se detalla una lista de las ventajas de usar el programa DINAMICA, respecto a otros programas con el mismo uso:

- El tipo de probabilidad espacial puede ser analizado como un píxel del uso “X” que cambia a otro uso, o el píxel del uso “X” que se mantiene como tal. El modelo DINAMICA simula la deforestación basado en la probabilidad que un píxel cambie (ej. la probabilidad de una transición de bosque a otro uso del suelo).
- El método de estimación del archivo de probabilidad espacial en DINAMICA se conoce como “pesos de evidencia”. Este método no permite evaluar interacciones entre las variables (a menos que se construyan previamente los determinantes que combinan las variables). En este caso, es importante verificar previamente la independencia entre las variables y es conveniente prever que las relaciones entre las variables varían espacialmente entre diferentes zonas del país (Mas et al. 2011). Este problema puede ser solucionado por medio de la opción de simulación por regiones, contenida en el programa DINAMICA.
- El método de pesos de evidencia permite modelar funciones complejas de efecto de los determinantes en la deforestación, en tanto que las técnicas basadas en regresiones logísticas solo pueden representar funciones sigmoideas (Mas et al. 2011). Se requiere evaluar la transformación de las variables para solventar esta limitante exclusiva del método de regresiones logísticas.
- DINAMICA es un programa con una interfaz gráfica amigable que permite formular diferentes configuraciones de simulaciones de manera eficiente (ej. entre modelar todo el país o hacerlo por diferentes zonas).

Cuadro 12. Comparación entre modelos para simular espacialmente cambios en el uso de la tierra

	CLUE-S	DINAMICA-EGO	Econometría
Tipo de probabilidad espacial	Probabilidad de estado (permanencias)	Transiciones -> determinantes -> probabilidad de transición	Transiciones -> determinantes -> probabilidad de transición
Método de estimación	Regresión logística (todas las variables)	Pesos de evidencia (categoriza las variables, independientes)	Regresión logística (todas las variables)
Pesos	Control por otras variables (permite la interacción entre variables)	Sin control (supuesto de no correlación, sin interacción entre variables)	Control por otras variables (permite la interacción entre variables)
¿Cómo ocurre el cambio?	Probabilidad más alta + azar	Selección estocástica + umbral de probabilidad	Basado en la probabilidad más alta
Métricas de fragmentación de bosques	No	Patcher + expandir (+ métricas de paisaje)	Implícito en determinantes
Velocidad de transición	Sí	Sí	Sí
Bloqueo de zonas	Sí	Sí	Sí
Simulación por zonas	No (pero puede ser hecha de manera manual)	Sí	Sí
Facilidad de implementación	Tutoriales, software, limitado número de determinantes	Tutoriales, software, comunidad en línea	Estadística, sus herramientas son programables en lenguaje computacional sencillo

- DINAMICA posee diferentes métodos para designar los píxeles deforestados, simulando la aleatoriedad asociada a los procesos de deforestación, por lo que dos simulaciones con los mismos parámetros no resultan idénticas a nivel de píxel, pero sí mantienen la consistencia a nivel de paisaje, como se discutió anteriormente.
- DINAMICA permite parametrizar en las simulaciones el nivel de fragmentación con el que ocurre la deforestación. Con este modelo se pretende replicar el tamaño y forma de los parches resultantes de la deforestación histórica.
- En DINAMICA se pueden automatizar velocidades de transición entre diferentes usos del suelo (ej. la transición de tierras abandonadas a bosque después de cierto periodo de años en abandono).
- Es posible plantear y evaluar escenarios en los que en ciertas zonas del mapa se detiene el proceso de deforestación, permitiendo estudiar el efecto de potenciales acciones sobre la dinámica de uso del suelo.

Resultados sobre la proyección futura de la deforestación

Esta sección describe los escenarios de deforestación futura incluyendo la evaluación de los determinantes de la deforestación y validación del modelo.

Definición de los determinantes o causas de deforestación en la RACCN

Para el caso de la RACCN, el análisis de determinantes de deforestación corresponde a las variables que explican las transiciones o cambios de uso de tierra entre tierras forestales y pasto, SATA, o tierras agrícolas. Las transiciones de tierras forestales a manglar, cuerpos de agua y otras tierras no fueron consideradas para la construcción y validación del modelo, por no considerarse deforestación debida a causas antropogénicas. En el caso de la deforestación a causa de SATA, a pesar de ser este un uso natural, la deforestación se tomó en cuenta debido a la extracción de especies forestales en estas zonas. Por otro lado, el área de las transiciones de pasto, SATA, o tierras agrícolas hacia tierras forestales (recuperación de cobertura forestal), representa el 15% del área total deforestada por esos usos, por lo tanto, en la calibración del modelo también se utilizaron esas transiciones (VCS 2014).

Se evaluaron 28 variables identificadas como determinantes potenciales del cambio de uso de la tierra. El modelo DINAMICA, con la ayuda del módulo LCM de TerrSet, permitió encontrar nueve distintas variables que explican la deforestación en la RACCN (separadas en tres transiciones). Este grupo de variables son una combinación entre variables de distancia, elevación, climáticas, y categóricas (cuencas hidrográficas, unidades geomorfológicas, textura del suelo, zona de



recarga acuífera y zonificación agroecológica). Las categóricas son las más abundantes en las tres transiciones para toda el área de estudio. Las variables de cuencas hidrográficas y textura del suelo son las más frecuentes, al estar presentes en dos de las tres transiciones analizadas. Las variables de distancia muestran coeficientes de pesos de evidencia con una relación positiva (mayor cambio) entre la cercanía al elemento analizado (carreteras principales y borde de la deforestación previa) y la deforestación.

Los determinantes con mayor peso en la transición de tierras forestales a pasto (establecimiento o abandono de potreros) son la distancia a calles principales (puede usarse como un aproximado de la distancia a los mercados), la textura del suelo, la geomorfología, el potencial de recarga acuífera, y la zona agroecológica. Todas estas variables están relacionadas a la aptitud de las zonas para desarrollar la actividad ganadera, lo cual implica que tierras forestales en zonas con mayor aptitud para la ganadería serán más propensos a ser deforestados.

En la transición de tierras forestales a SATA, solo se seleccionó la cercanía a las tierras que previamente cambiaron hacia ese uso. Esto puede verse como un aproximado al avance de frontera, lo cual sugiere que los fragmentos de tierras forestales cercanas a la frontera tendrán mayor probabilidad de deforestarse. A pesar de ser un uso considerado natural, la deforestación se da al extraer los árboles presentes en esa cobertura de la tierra.

La transición de cobertura forestal a tierras agrícolas es debida a las variables textura del suelo, precipitación anual, temperatura promedio anual y la cuenca hidrográfica a la cual pertenezca. Estas variables tienen que ver con la aptitud de los suelos para soportar la actividad agrícola, así como las condiciones ambientales que permiten o limitan el establecimiento de cultivos agrícolas. Entonces, las tierras forestales situadas sobre suelos con alta aptitud para la actividad agrícola serán los más amenazados por la deforestación.

Waspán es el municipio que conserva la mayor cantidad de bosque remanente y, con un 18,7% del total de áreas recuperadas, es un municipio de alto valor para

la conservación y manejo de las tierras forestales. Los municipios de Bonanza, Rosita y Puerto Cabezas, por otro lado, presentarán áreas con deforestación, así como recuperación de tierras forestales. Esta dinámica de cambio de cobertura de la tierra los convierte en zonas de alto valor para el manejo de las tierras forestales.

El análisis de los coeficientes de pesos de evidencia para la transición de tierras forestales a pasto seleccionó seis variables como las de mayor importancia (Figura 13): distancia a calles principales (el comportamiento de los coeficientes de pesos de evidencia indica un efecto positivo en la deforestación, de los 0 a 500 m lineales y luego se vuelve negativo), cuencas hidrográficas, textura del suelo, unidad geomorfológica, potencial de recarga acuífera y zonificación agroecológica. Todas estas variables son categóricas, y puede observarse el efecto de cada una de sus categorías en la deforestación, contando efectos positivos y negativos en la misma variable.

El comportamiento de los coeficientes de pesos de evidencia de la transición tierras forestales a SATA, seleccionó solamente la variable distancia al borde de fragmentos de SATA (Figura 14). El análisis indica que mientras más cercano al borde de los fragmentos (entre 0 y 510 metros), será positivo y más fuerte el efecto sobre la deforestación. Luego de 510 m, el efecto se vuelve negativo, por lo tanto, se inhibe la deforestación.

El análisis de pesos de evidencia de la transición de tierras forestales a tierras agrícolas, seleccionó cuatro determinantes que explican el cambio (Figura 15). Estas variables son la precipitación anual (el comportamiento de los coeficientes indica un efecto positivo sobre la deforestación en las áreas donde la precipitación ocurre entre 2300 y 2600 mm anuales, siendo negativo en el resto de los valores), la temperatura promedio anual (con un efecto positivo en las zonas con temperaturas promedio de 25 °C, y se vuelve negativo cuando el promedio aumenta), las cuencas hidrográficas y la textura del suelo. Estas son variables categóricas que tienen distintos comportamientos en el peso de evidencia para cada una de sus categorías.

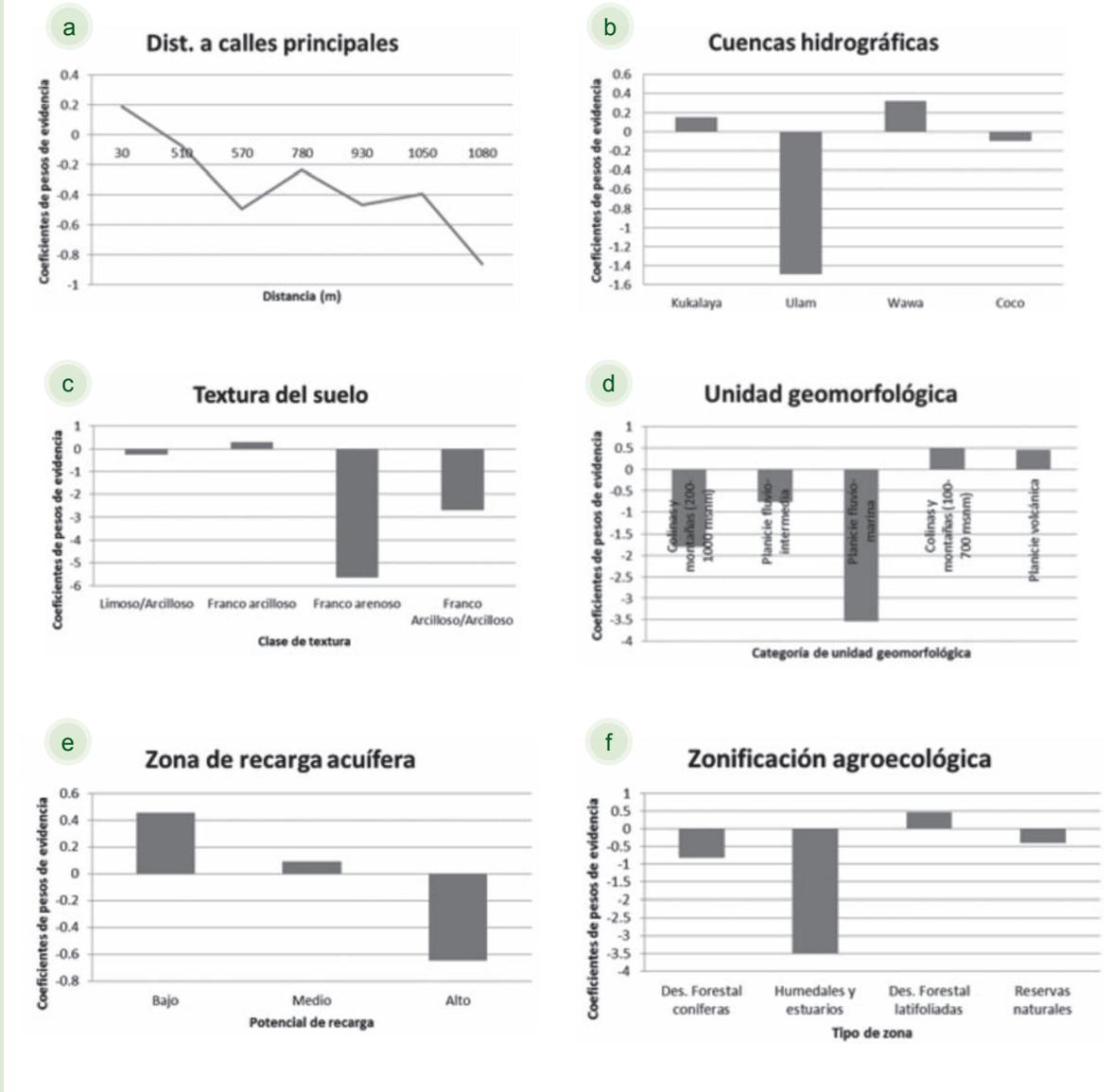


Figura 13. Comportamiento de los coeficientes de pesos de evidencia para la transición tierra forestal a pasto en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua (se muestran las variables más importantes que explican la deforestación)

Validación de la simulación de la deforestación con el modelo DINAMICA

La simulación de la deforestación se validó en el periodo 2008-2014 con base en la construcción de pesos de evidencia (método de simulación fuera de la muestra). La evaluación del desempeño de las simulaciones se realizó para toda la RACCN. Se cuantificaron dos métricas de desempeño a nivel de la unidad mínima de mapeo (pixel). Una métrica estimó la fracción de pixeles “bien simulados” como tierra forestal y deforestación (suma de ambas clases) del total de pixeles clasificados como bosque y deforestación en la observación (según mapas de uso del suelo). La otra métrica estimó la fracción entre el número de pixeles donde la deforestación se observó y simuló correctamente, a partir del número total de pixeles deforestados según los mapas de uso de la tierra.

La evaluación espacial permite analizar visualmente los mapas de validación de la deforestación, identificando zonas con mejor desempeño (donde el modelo simuló correctamente la deforestación). Esta evaluación puede ser mostrada en mapas que comparan pixeles donde la deforestación simulada fue también observada, o no. El valor de ajuste total del modelo se obtiene de la división del total de pixeles simulados correctamente como bosque y deforestación, entre el total observado en ambas categorías. Por tanto, la fracción de pixeles de tierras forestales correctamente clasificados tiene buen desempeño en ambos modelos, en parte porque la fracción de tierras forestales es

relativamente grande respecto a los pixeles deforestados (Cuadro 13).

El valor de ajuste en la simulación de la deforestación, ubica la simulación de DINAMICA entre el cuarto y quinto lugar de desempeño (38% y 28% respectivamente) comparado con otros 13 estudios de deforestación sistematizados por Pontius et al. (2008). En esos estudios hay un rango entre 1% (el peor) y 59% (la mejor modelación); las simulaciones con un ajuste de 21% o superior, son mejores que un modelo nulo (se simula persistencia en todos los pixeles). Nuestros resultados indican que tenemos un poder predictivo del sitio en que ocurrirá la deforestación del 33% y del bosque del 87% en un periodo de ocho años, lo cual es alto dada la complejidad del proceso y el periodo de tiempo considerado.

El mapa de ajuste del modelo DINAMICA (Figura 16), presenta áreas con aciertos (simulaciones correctas) principalmente hacia el Suroeste y Centro de la RACCN (color rojo), mientras que los mayores problemas de simulación se notan en el Norte, donde el modelo no es capaz de simular correctamente la deforestación debido a la falta de determinantes adecuados. Las áreas subestimadas por el modelo se centran sobre los frentes de deforestación de la zona Centro-Este y Sur (color verde), mientras que las áreas sobreestimadas por el modelo se encuentran ligadas a nuevos bloques de deforestación, principalmente en el sector Noroeste (color azul).

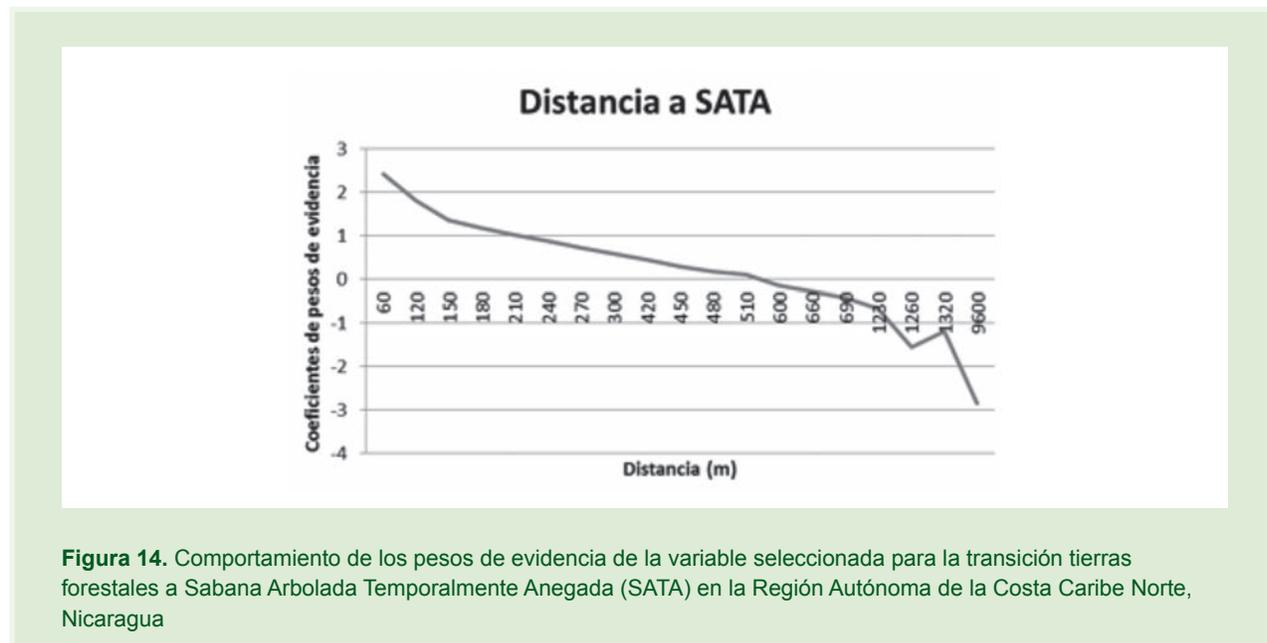


Figura 14. Comportamiento de los pesos de evidencia de la variable seleccionada para la transición tierras forestales a Sabana Arbolada Temporalmente Anegada (SATA) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua

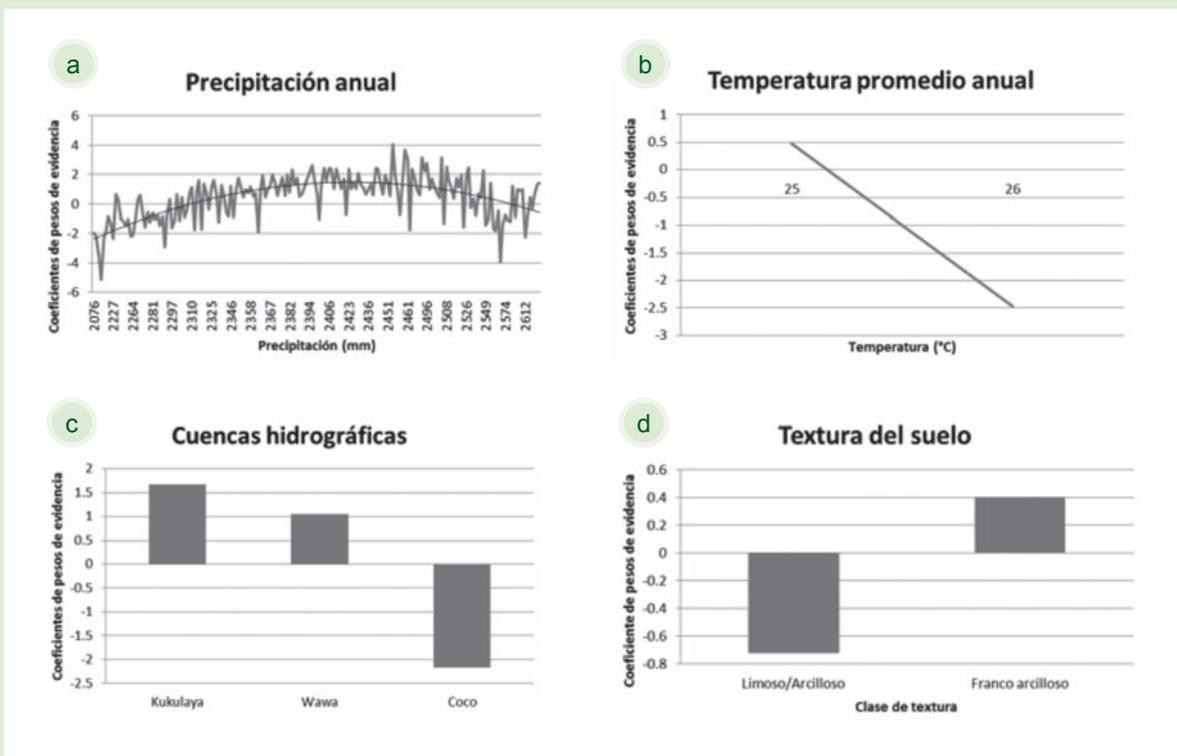


Figura 15. Coeficientes de pesos de evidencia para la transición tierras forestales a tierras agrícolas en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, (se muestran todas las variables que fueron utilizadas por el modelo DINAMICA)

Cuadro 13. Desempeño general del modelo DINAMICA para la simulación de uso y cambio de uso de la tierra en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2000-2014

Porcentaje de pixeles simulados correctamente en el año 2014		
Tierras forestales	Deforestación	Total
86,7%	33,3%	77,7%

Este estudio además evaluó el desempeño del modelo a escala regional dentro de la RACCN. Para esto, se realizó un análisis espacial agregado (no pixel a pixel) para un polígono de análisis al que se le denominó “paisaje” (en este caso un cuadrado de tamaño variable desde 30 m² hasta 15 ha). El objetivo fue capturar la capacidad del modelo de generar deforestación en las zonas donde ocurrió (frentes de deforestación)

y así recuperar el valor de simular deforestación en pixeles cercanos (dentro de la ventana de análisis) a los que se observó la deforestación.

Esta evaluación muestra que el porcentaje de ajuste del modelo en los pixeles deforestados mejora conforme aumenta el tamaño del cuadrado. Este ajuste va desde 39% a nivel de pixel (30 m²), hasta 88% en una ventana de 1 ha y se mantiene estable con cuadrados mayores (Figura 17). Esto muestra que el modelo DINAMICA tiene un buen desempeño a nivel de pixel y captura adecuadamente los frentes de deforestación. El análisis visual hecho sobre los mapas que muestran esta comparación destaca que dentro de un frente de deforestación se encuentran balanceadas las zonas con sobreestimación o subestimación de la deforestación (colores rojo, azul y verde, Figura 16).

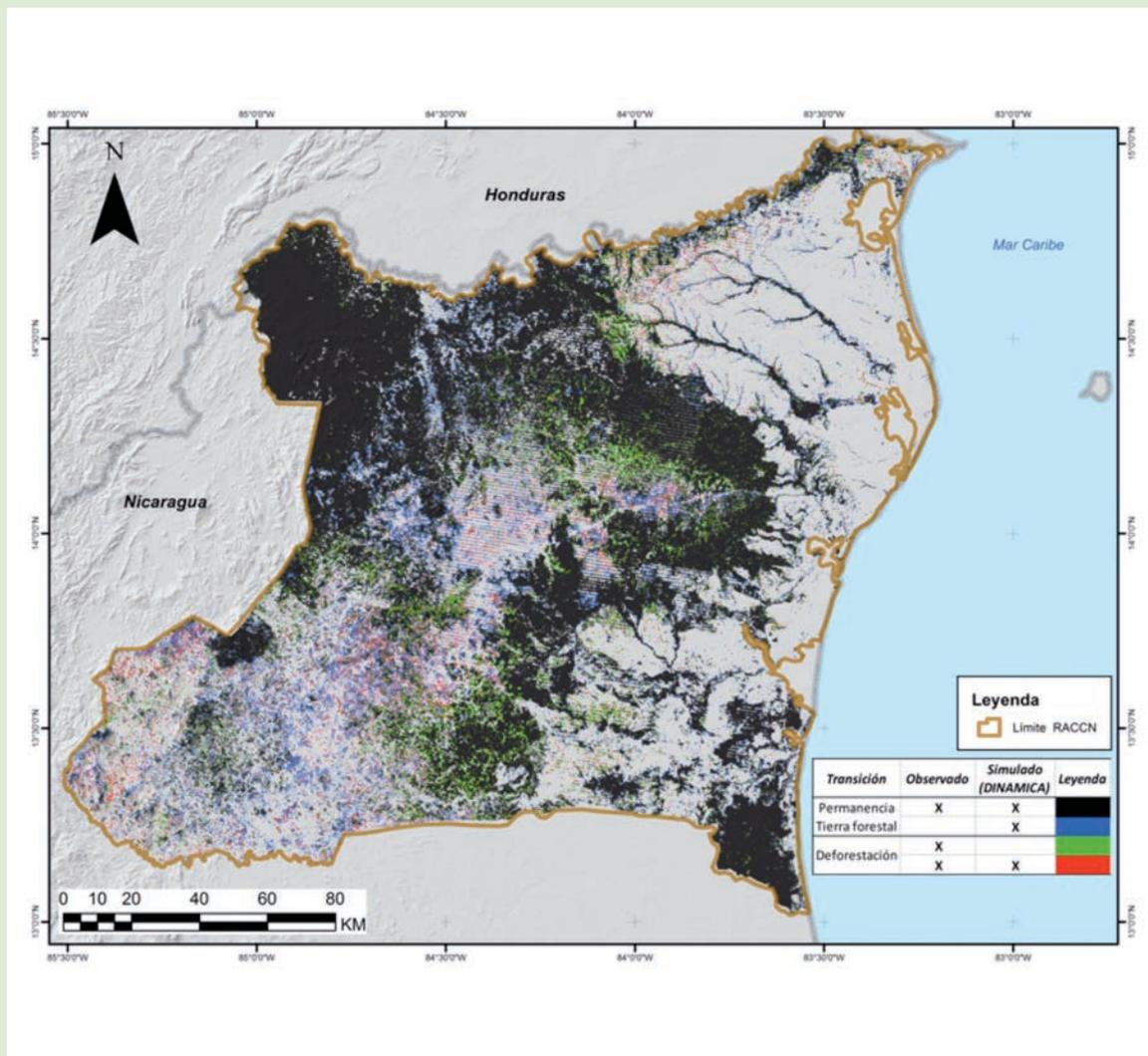


Figura 16. Ajuste comparativo de la deforestación y tierras forestales remanentes, realizado mediante DINAMICA y la cobertura observada en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2008-2014. El color rojo indica píxeles de deforestación donde la simulación y observación concuerdan. El color negro muestra píxeles donde se observó y se simuló tierras forestales remanentes de manera correcta. El azul representa las zonas donde se simuló la deforestación, pero no se observó (sobrestimación). El verde corresponde a las zonas donde se observó la deforestación, pero no se simuló (subestimación)

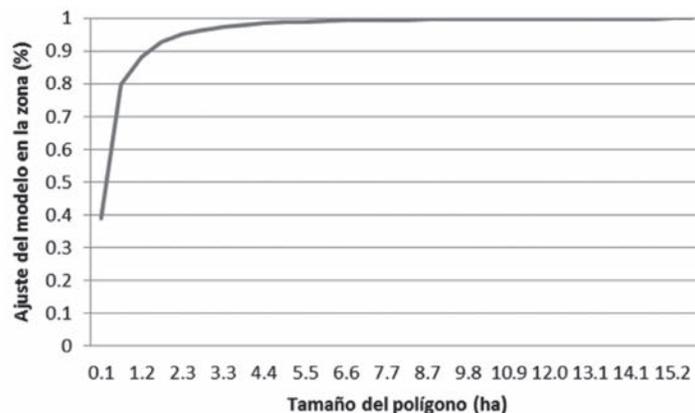


Figura 17. Desempeño del modelo DINAMICA en polígonos de diferentes tamaños en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, para el periodo 2008-2014

Futuro de deforestación y recuperación de bosque en la RACCN (2034)

La relación entre los determinantes y el cambio de uso de la tierra permitió simular escenarios futuros de cambio de uso de la tierra. A partir de estas nuevas capas de información, se obtuvieron las zonas donde el modelo determinó áreas deforestadas o con recuperación de bosque, asumiendo que el efecto de los determinantes se mantuvo durante el periodo de validación y hasta el año 2034 (Figura 18 y Figura 19). Es necesario recordar que se escogió ese año para que sea compatible con la duración de otros proyectos forestales de carbono (ej. proyectos GEF). Para la simulación futura se analizó un escenario de cambio de uso de la tierra y bajo esa misma simulación se calcularon las emisiones de carbono debido al cambio de tierras forestales a otras tierras, además de las remociones producto del cambio de otros usos a tierras forestales.

Como resultado, el modelo generado con DINAMICA, muestra que la deforestación futura se concentrará sobre el sector central de la RACCN, en los municipios de Mulukuku, Siuna, Bonanza, Rosita y Puerto Cabezas

(71% del total de deforestación), lo cual es consistente con la tendencia que se observó durante el periodo histórico analizado. Los municipios de Prinzapolka y Waspan tienen grandes áreas de deforestación (25,1% del total de deforestación), pero más dispersas que en los municipios antes mencionados. Waspan a su vez, es el municipio que conserva la mayor cantidad de bosque remanente. Las áreas protegidas ejercen una función de freno ante la deforestación, por lo tanto, pueden observarse grandes fragmentos de bosque remanente (Figura 18).

En el caso de la recuperación de tierras forestales, el modelo generado con DINAMICA muestra una distribución dispersa en casi todo el territorio de la RACCN. Los municipios de Prinzapolka, Waspán, Rosita y Puerto Cabezas poseen las mayores áreas de potencial recuperación (34,7%, 18,7%, 13,9% y 13,5%, respectivamente). Las áreas con deforestación también presentan recuperación de tierras forestales (principalmente en los municipios de Rosita y Bonanza), lo cual evidencia una intensa dinámica de cambio de cobertura de la tierra (Figura 18 y Figura 19).

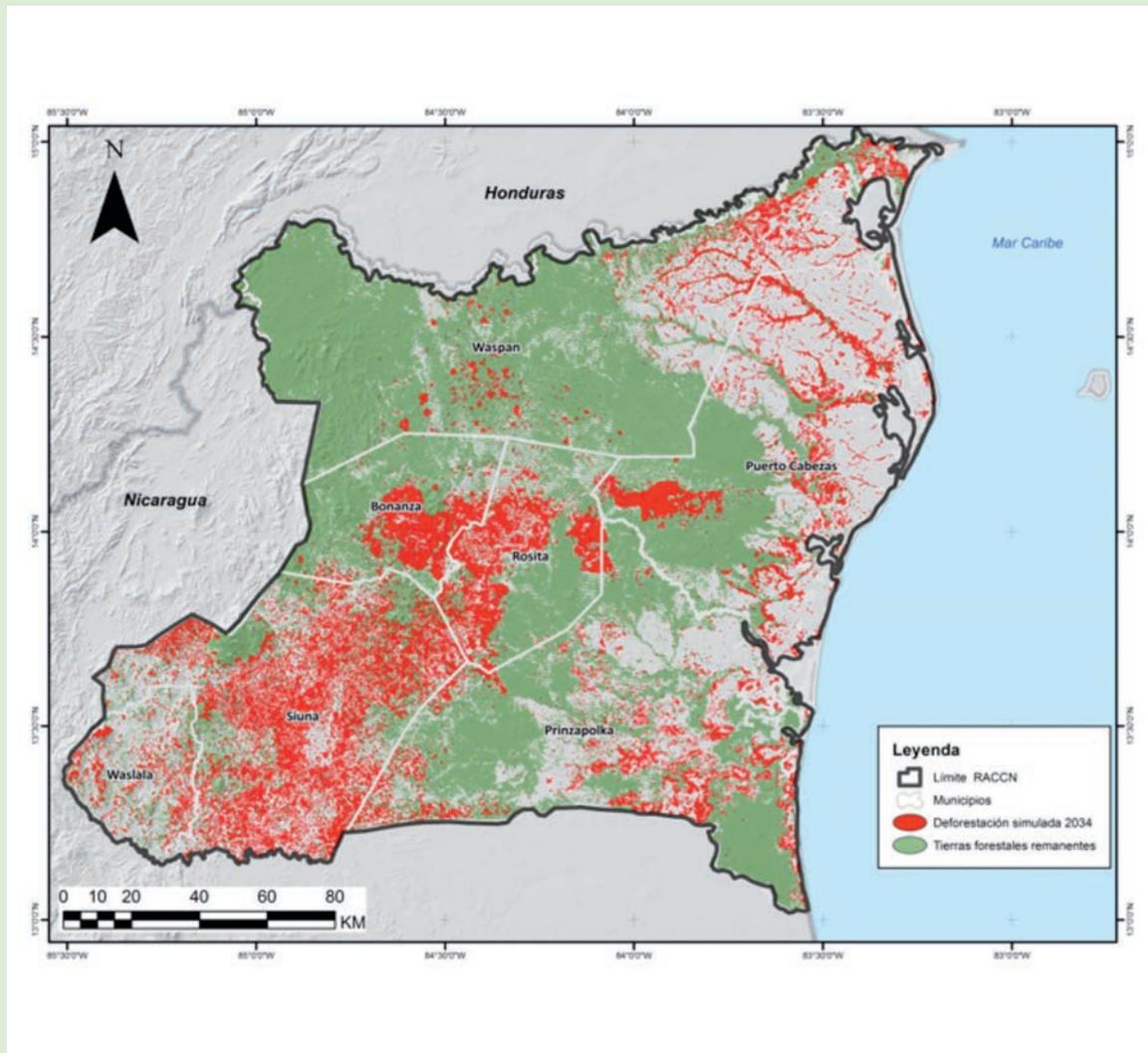


Figura 18. Cambio de tierras forestales a otras tierras (deforestación) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, entre los años 2014 y 2034. En color rojo se presenta la deforestación, y en color verde las tierras forestales remanentes

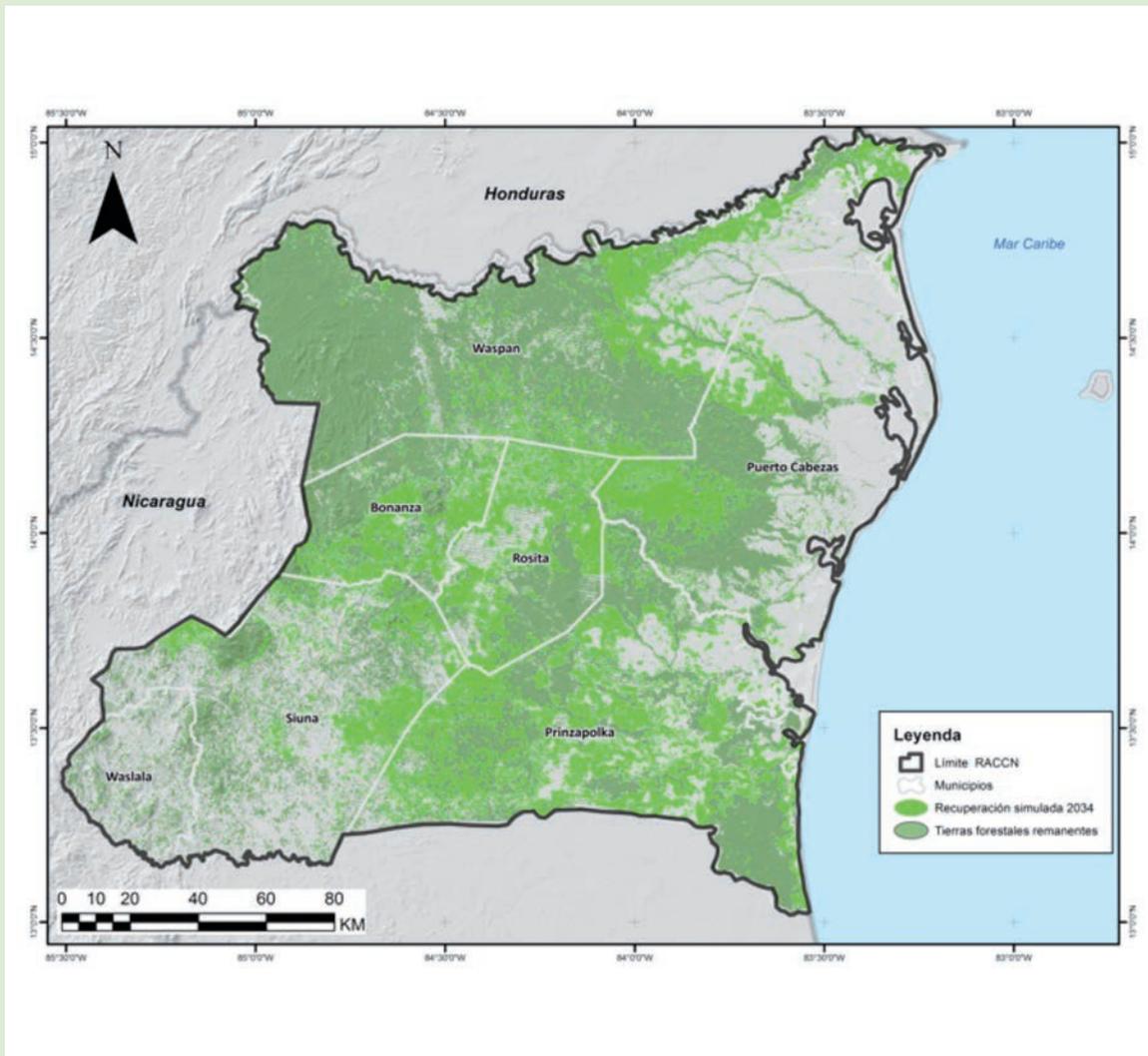


Figura 19. Cambio de otras tierras a tierras forestales (recuperación) en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, entre los años 2014 y 2034. En color verde claro se presenta recuperación, y en color verde oscuro las tierras forestales remanentes

Estimación de emisiones y remociones de CO₂ en la RACCN

En este capítulo se proporciona información metodológica y resultados sobre la estimación de emisiones y remociones de GEI debido a cambios en las reservas de biomasa viva arriba del suelo. Las emisiones de carbono derivadas de la deforestación y degradación son calculadas con base en los cambios experimentados en dos variables importantes: 1) el área afectada por la deforestación (“datos de actividad”, DA); y 2) el cambio en la densidad de las reservas de carbono en la biomasa por unidad de área (“factores de emisión”, FE). Las tecnologías de percepción remota, combinadas con las mediciones en el terreno, desempeñan un papel vital en el monitoreo de estas dos variables y han sido el insumo principal para el cálculo de emisiones en este análisis.

El inventario nacional forestal de bosques de Nicaragua fue evaluado como fuente para los valores de biomasa aérea de tierras forestales. Sin embargo, se encontraron inconsistencias en su información (principalmente en la relación diámetro/altura de las especies y las ecuaciones alométricas utilizadas para calcular la biomasa), razón por la cual esos datos no fueron tomados en cuenta en este análisis. En su lugar se utilizaron los datos que se mencionan en el Cuadro 14.

Metodología para el cálculo de emisiones y remociones

El método presentado en esta sección corresponde a una metodología para el cálculo de emisiones por deforestación desarrollada por el equipo del Laboratorio de Modelado Ambiental (LMA) del CATIE, basado en las definiciones del IPCC y sus métodos de cálculo. Las estimaciones se basan en los resultados del modelo de cambio de uso de la tierra (datos de actividad) y factores de emisión del tipo “Tier 2” encontrados en la literatura (Cuadro 14). Las ecuaciones para estimar emisiones y remociones usadas en el análisis se tomaron de las directrices del IPCC (2006) y los valores de los parámetros (ej. datos de actividad) fueron obtenidos de los resultados de este estudio. La estructura básica de los cálculos para la estimación de las emisiones o remociones gira en torno a una ecuación sencilla:

$$E = DA * FE$$

Donde:

E = emisiones o remociones (MgCO₂)

DA = datos de actividad (ha)

FE = factores de emisión (MgCO₂)

Cálculo de emisiones

Se contabilizaron las emisiones provenientes de la deforestación y las remociones provenientes del aumento de las reservas de carbono. En esta metodología se identificó el área de cambio de un tipo de cobertura de la tierra a otra y las diferencias en las reservas de



carbono entre esos dos tipos de cobertura, estimado por unidad de área, así como el área que permaneció como tierra forestal. Posteriormente, se aplica un factor de emisión (o de remoción en el caso de áreas de recuperación o conservación de existencias) que expresa el valor en MgCO₂eq.

Estimación de datos de actividad (DA)

El exhaustivo trabajo realizado en la clasificación de imágenes para obtener mapas de cobertura de la tierra consistentes en los tres años que conforman los periodos de análisis (2000, 2008 y 2014) permitió utilizar un enfoque espacialmente explícito para calcular los DA (enfoque 3 del IPCC). Con base en los mapas de cobertura se determinó el área de tierras forestales y no forestales y el cambio entre ellas durante los años analizados por medio del traslape de mapas. En el Capítulo 5 del presente documento, se pueden leer los valores de DA de las transiciones utilizadas para el análisis de emisiones y remociones. Cabe destacar que las tierras forestales experimentaron la deforestación de 337 824 ha, siendo principalmente el cambio a pasto (71,8%), la principal transición de deforestación observada en el periodo 2000-2014.

Nivel de factores de emisión

En esta metodología se utilizan valores generales a nivel global definidos por el IPCC por dominio climático, zona ecológica y continente. La ubicación de la RACCN y sus tipos de bosque permiten ubicarla en el bosque tropical lluvioso y continente americano (de acuerdo a la clasificación del IPCC 2006), con una biomasa aérea promedio de 300 Mg ha⁻¹ (IPCC 2006). No

Cuadro 14. Valores de biomasa aérea para las coberturas utilizados en el cálculo de los factores de emisión para las transiciones

		Cobertura año final			
		Tierra forestal	Pasto	SATA	Tierras agrícolas
Cobertura año inicial	Tierra forestal *	300	115	168,3	182
	Pasto **		185		
	SATA ***			131,7	
	Tierras agrícolas **				118

En la diagonal y en color gris oscuro se observan los valores de biomasa aérea de cada categoría (Mgha⁻¹), y en la primera fila están las diferencias entre la tierra forestal y las otras tres coberturas, utilizadas en el cálculo de los factores de emisión de las transiciones utilizadas en el análisis (Mg ha⁻¹). Fuente: * IPCC (2006), ** Jobse (2008), *** Jones (s.f.)

se incluyen los humedales ni manglares en esta definición. Nicaragua cuenta con un Inventario Nacional Forestal, sin embargo, las estimaciones de biomasa aérea, producto de estas mediciones, presentaban valores inconsistentes con lo esperado para los tipos de bosque correspondientes por lo que se decidió no utilizarlos en el análisis. Los valores de carbono almacenado por las otras coberturas de la tierra fueron obtenidos de Jobse (2008), para pasto y tierras agrícolas, y Jones (s.f.) para las SATA (Cuadro 14), por ser estudios realizados para zonas similares a la que se está analizando. Cuando se encontró regeneración fue necesario aplicar un factor de crecimiento de la biomasa aérea. Se utilizó la ecuación de acumulación de carbono en bosque secundario húmedo tropical Atlántico, transición a basal (Cifuentes-Jara 2008), que considera la cantidad de años que el bosque regenerado se mantuvo como bosque. En el caso de estas coberturas no se encontraron datos nacionales que pudieran ser utilizados.

Posteriormente, se transformaron los valores de biomasa aérea en valores de MgCO₂eq, para estimar correctamente las emisiones/remociones para el factor de emisión. Para ello, fue necesario aplicar la fórmula:

$$FE = (FEB * FC) * 3,67$$

Donde:

- FE = Factor de emisión
- FEB = Factor de emisión de biomasa
- FC = Factor de conversión de biomasa aérea a carbono (0,47; IPCC 2013)
- 3,67 = Factor de conversión de carbono a CO₂ equivalente

Resultados de la estimación de la cantidad de emisiones y remociones de CO₂eq en el periodo 2000-2014 y proyecciones al 2034 para las tierras forestales de la RACCN

La cantidad de emisiones para el periodo 2008 a 2014 fue de -45 526 975,9 MgCO₂eq, lo cual puede ser expresado en una tasa anual de -7 587 829,3 MgCO₂eq en un periodo de seis años. En contraste, durante el primer periodo del análisis (2000-2008) la tasa de emisiones fue menor (-7 201 760,2 MgCO₂eq, en un periodo de ocho años). Por otro lado, las remociones representaron el 80% del total de las emisiones en el

primer periodo y 50% en el segundo, lo cual implica una disminución en la tasa de remociones de carbono. Estos estimados servirán de base para el cálculo de las emisiones futuras y la definición de los potenciales NRF/NREF para la región (Cuadro 15).

En el periodo 2008-2014 las emisiones, contabilizando el área de afectación del huracán Félix, son 41,6% más altas que si no se toma en cuenta esa área. En el caso de las existencias y las remociones es una amplia diferencia también entre incluir el área de afectación del huracán y no incluirla (55,1% y 47,9% más altas respecto al total reportado en la zona fuera de la afectación del huracán, respectivamente; Figura 20).

La modelación futura de las tasas de cambio de tierras forestales a otras tierras (deforestación) en la RACCN nos indica que la deforestación continuará aumentando, lo cual conlleva al mismo comportamiento en las emisiones. La tendencia del balance neto entre emisiones y remociones tiende a aumentar de manera negativa, ya que la cantidad de absorciones no compensa la cantidad de emisiones en la RACCN (Figura 21).

Las emisiones de carbono entre 2014 y 2034 tienden a aumentar anualmente un 35%, debido a la tendencia de aumento de la deforestación en tierras con alto contenido de carbono. En contraste, las remociones disminuyen anualmente un 38% (Cuadro 16). Este comportamiento también puede estar relacionado con la deforestación en la RACCN, ya que las tierras forestales en regeneración no están alcanzando edades maduras para remover grandes cantidades de carbono.

Análisis espacial de las emisiones y remociones de carbono en los bosques de la RACCN (2014-2034)

La herramienta para el cálculo de emisiones y remociones permite hacer un análisis espacialmente explícito, lo cual se convierte en una herramienta útil para definir sitios de proyectos REDD+ o de restauración de bosques. El área de la RACCN presenta los sitios con mayores emisiones en tierras forestales cercanas a los lugares poblados y las carreteras. Los municipios de Siuna, Bonanza, Rosita y Puerto Cabezas muestran los focos de emisiones más grandes respecto al área total y estos se muestran de manera agrupada, siendo el límite Sur con El Cuá-Boca la zona de mayor intensidad (tonos amarillos, Figura 22). En el resto de los municipios, la ubicación de los sitios de emisiones es más dispersa. Los sitios de remociones de carbono se presentan principalmente en el Norte de Rosita y Bonanza, así como el Noroeste de Waspan y el municipio de Prinzapolka (color azul oscuro, Figura 22). Es importante notar que también existen áreas donde las existencias de carbono se mantendrán (las zonas definidas como tierras forestales remanentes en la Figura 22). La diferencia en las formas de los fragmentos con emisiones y remociones es un elemento que puede ser utilizado para proponer diferentes tipos de proyectos REDD+ en la RACCN. Formas irregulares, de tamaño pequeño y de distribución dispersa pueden propiciar proyectos pequeños, por ejemplo, pago por servicios ambientales. Por otro lado, áreas de mayor tamaño y aglomerados, pueden tener el potencial para proyectos de protección/restauración a gran escala como áreas protegidas, por ejemplo.

Cuadro 15. Existencias, emisiones y remociones de GEI para el periodo histórico de referencia para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, en el periodo 2000-2014

	2000-2008			2008-2014		
	Área (ha)	Tasa anual (MgCO ₂ eq)	Total para el periodo (MgCO ₂ eq)	Área (ha)	Tasa anual (MgCO ₂ eq)	Total para el periodo (MgCO ₂ eq)
Tierras forestales que se mantienen como tierras forestales (existencias)	1 280 413		662 575 356	911 515		471 681
Tierras forestales que cambia a otro uso (emisiones)	255 770	-7 201 760	-57 614 081	200 121	-7 587 829	-45 526 975
Otro uso que cambia a tierras forestales (remociones)	418 042	5 905 583	47 244 671	262 618	3 810 383	22 862 302

Los valores en este cuadro no consideran el área de afectación del huracán Félix en la RACCN.

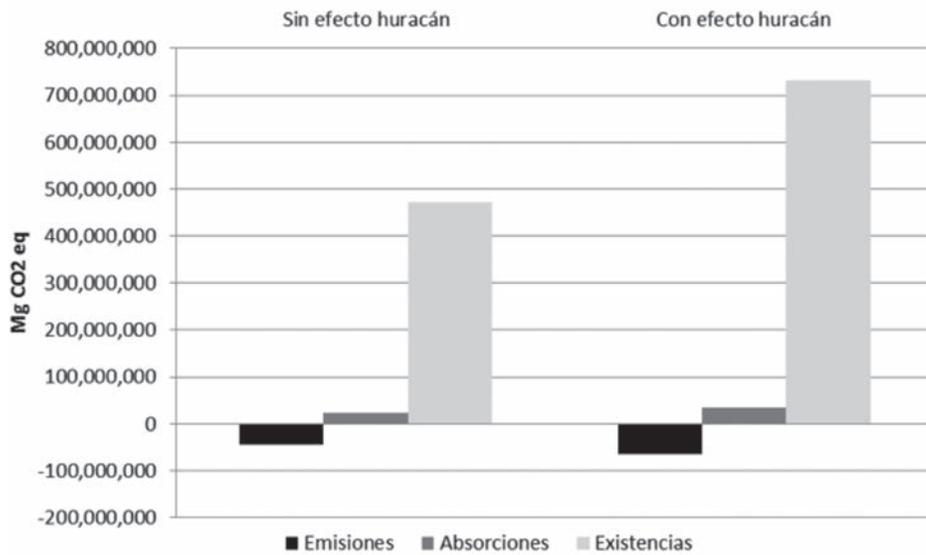


Figura 20. Emisiones de CO₂eq en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, tomando en cuenta el efecto del huracán Félix, y sin este, en el área de tierras forestales

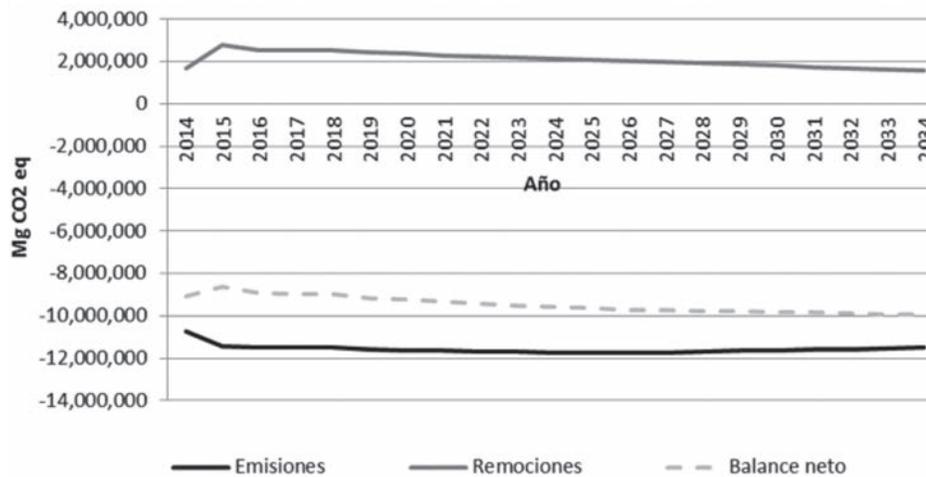
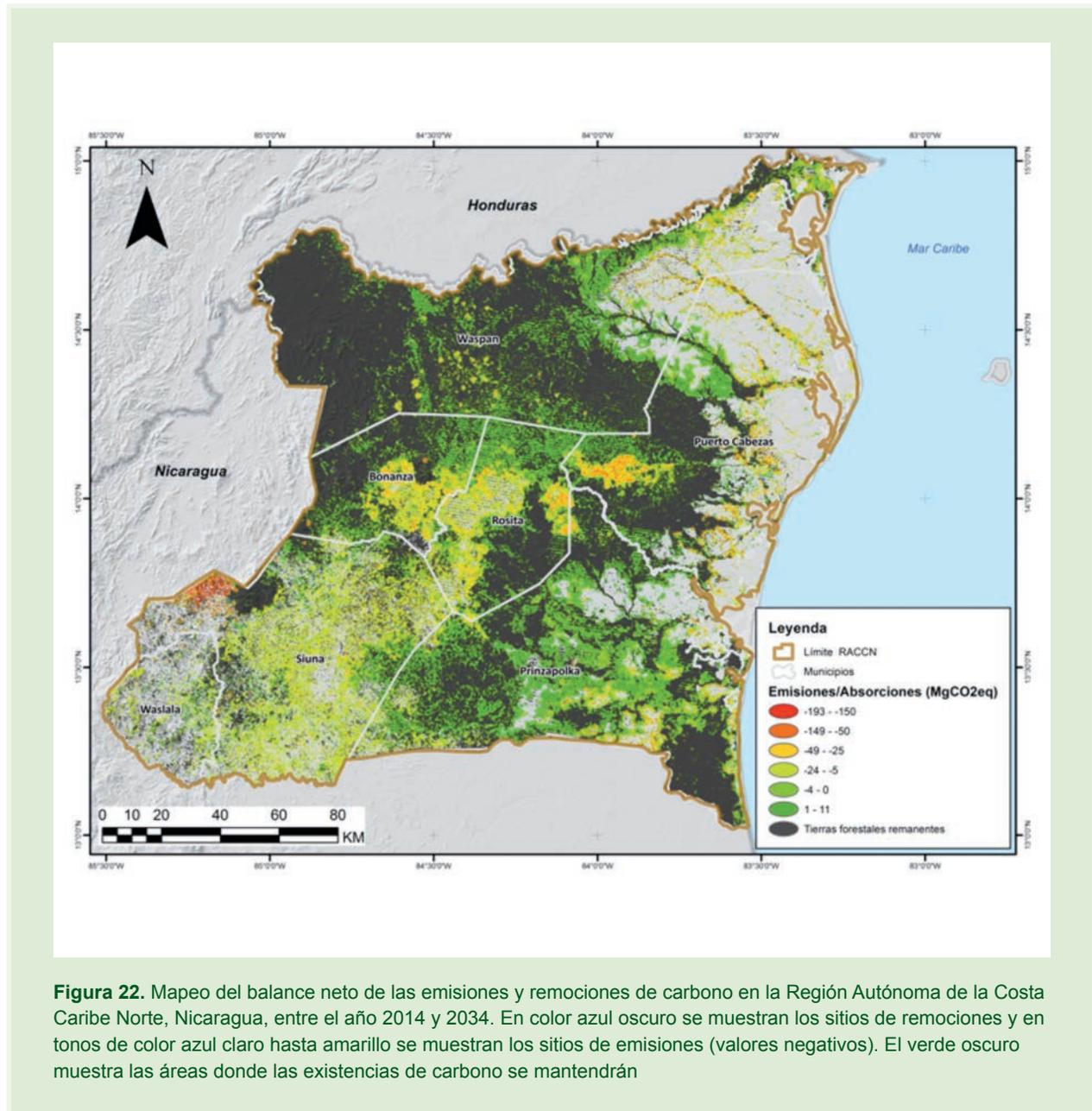


Figura 21. Emisiones y remociones futuras para las tierras forestales de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua (se muestran los valores para el periodo 2014-2034)

Cuadro 16. Balance de emisiones y remociones de GEI para el periodo futuro en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte, Nicaragua, 2014-2034

Transición	Tasa anual periodo 2014-2034 (MgCO ₂ eq)
Tierras forestales que cambian a otro uso (emisiones)	-11 611 348,96
Otro uso que cambia a tierras forestales (remociones)	2 348 138,38





Conclusiones sobre la dinámica de emisiones y remociones de la RACCN

- En el periodo histórico de referencia se estimaron emisiones de $-45\,526\,975,9$ MgCO₂eq y un total de $22\,862\,302,3$ MgCO₂eq de remociones, para un periodo de seis años. En términos generales se puede decir que el balance de emisiones de CO₂ en la RACCN es negativo, por lo tanto, los proyectos REDD+ pueden ser una alternativa ante esta situación.
- Al año 2034, los municipios de Siuna, Puerto Cabezas, Prinzapolka, y Rosita y tienen un alto potencial de convertirse en sitios de emisiones (representan un 65,6% del área total con emisiones), porque son municipios con grandes áreas de tierras forestales (y almacenes de CO₂), las cuales tienen alta probabilidad de deforestación.
- Los municipios de Prinzapolka, Waspán y Puerto Cabezas también tienen un alto potencial de convertirse en sitios de recuperación de tierras forestales y remociones de carbono en la RACCN (representan 72,3% del área total con remociones).

El manejo de estas áreas (restauración, reforestación, conservación) es recomendable para aumentar las remociones y la recuperación de tierras forestales.

- La cantidad de emisiones en la RACCN aumentará con una tasa anual de $-11\,611\,348,96$ MgCO₂eq desde 2014 hasta 2032. La tasa anual fue de $-7\,201\,760,2$ MgCO₂eq entre el año 2000 y el año 2008, y posteriormente creció a $-7\,587\,829,3$ MgCO₂eq a partir de 2008. Esto implica que las tierras forestales de la RACCN se verán amenazadas por la deforestación en este escenario futuro.
- Existe una mayor área de otros usos que cambian a tierras forestales, que tierras forestales que cambian a otros usos (31% más en el periodo 2008-2014), sin embargo, las tasas de absorción de CO₂ de la regeneración no compensan las emisiones de la deforestación. Por lo tanto, es necesario aumentar las tasas de remociones en la RACCN mediante los proyectos de reforestación o restauración en zonas deforestadas actualmente y la conservación de almacenes de carbono en las áreas amenazadas por la deforestación.

Consideraciones finales

El desarrollo de metodologías que describan puntualmente el establecimiento y contabilidad de los niveles de referencia para REDD+ (NREF/NRF) es un campo técnico aún en desarrollo por lo que no existen guías o estándares internacionales únicos. El presente esfuerzo constituye una importante contribución para América Latina, pues brinda una serie de herramientas y pasos metodológicos robustos, armonizados con estándares y guías internacionales de buenas prácticas conforme requerimientos de la CNMUCC, FCP y considerando las tecnologías disponibles actualmente. La aplicación apropiada de los lineamientos incluidos en este documento brindará la oportunidad a los países de la región de contar con niveles de referencia consistentes y compatibles con los marcos metodológicos del FCPF y el VCS como elementos críticos para apoyar a la implementación de las Estrategias Nacionales de REDD+. De forma relevante, los procesos descritos son compatibles con los marcos metodológicos del FCPF y el VCS.

Las principales contribuciones fruto de este esfuerzo son:

- Un proceso metodológico que permite eliminar la pérdida de información por nubes o sombras de nubes y/o montañas. De esta forma se supera uno de los retos técnicos perennes en las regiones

tropicales: la presencia de nubes y vapor de agua que impiden la clasificación de usos de la tierra y su dinámica de cambio.

- Una solución robusta para el problema del “bandeado” de las imágenes del sensor Landsat 7, el cual es recurrente en la región. Esto permite completar información faltante en periodos distales e intermedios del análisis de simulación de cambio de uso de la tierra.
- Se demuestra, además, que la adquisición y procesamiento de series temporales de datos Radar es útil y recomendable para análisis de cambio de uso de suelo, porque la señal capturada contiene información potencial sobre la vegetación en diferentes épocas del año, sin presencia de nubes y bajo cualquier condición de la atmósfera.
- Se muestra que es valioso incluir expertos locales que identifiquen los diferentes usos y coberturas de la tierra en campo y que puedan verificar a través de imágenes satelitales la correspondencia con las clases de los mapas resultantes. Integrar la experiencia local es determinante para mejorar la clasificación de la cobertura del suelo y asegurar su consistencia. Además, integrar equipos locales de trabajo permite fortalecer las capacidades de los técnicos y fortalece la apropiación del conocimiento.
- Los determinantes que provocan los cambios de uso y cobertura de la tierra en la RACCN son principalmente relacionados a características biofísicas (tipo de suelo, temperatura promedio anual, precipitación anual, entre otros), costos de transporte (distancia a carreteras) y avance de la



frontera agrícola. Esta información es de gran valor en el planeamiento de acciones de manejo que ayuden a controlar la deforestación y/o fomenten la recuperación de tierras forestales. Por ejemplo, encontramos que los bosques de los municipios de Siuna, Puerto Cabezas, Prinzapolka, y Rosita y tienen un alto potencial de perderse, mientras que el 72% de las áreas de los municipios de Prinzapolka, Waspán y Puerto Cabezas podrían someterse a estrategias de restauración de la cobertura forestal.

- La dinámica de usos y coberturas de la tierra en la RACCN está influenciada no solamente por características geofísicas, costos de transporte y avance de frontera agrícola, sino también por eventos naturales como huracanes. Esta configuración a su vez afecta la cantidad y ubicación de los sitios con emisiones y remociones de carbono y tiene implicaciones sobre el potencial de manejo y de respuesta de estos ecosistemas. Por ejemplo, la naturaleza estocástica de los huracanes presenta un desafío para garantizar la estabilidad y permanencia de la cobertura y el carbono forestal y, también para la implementación de programas de manejo sostenible del recurso.
- En comparación con otras técnicas y paquetes informáticos, el software DINAMICA-EGO es una herramienta robusta en la simulación de los

cambios de uso y cobertura de la tierra y escenarios futuros. Entre sus principales fortalezas encontramos su interfaz gráfica de usuario y la flexibilidad que ofrece para simular cambios históricos y para plantear opciones futuras de la dinámica de la cobertura. Es recomendable, sin embargo, el uso de otras alternativas cuando se pretende comparar los resultados y disminuir la incertidumbre asociada.

- Los escenarios futuros de cobertura forestal sugieren que estas tierras seguirán siendo amenazadas por procesos de conversión a otros usos y se proyectan, en general, como una fuente de emisiones a la atmósfera. Esta información es útil como un elemento de contexto para diseñar medidas de manejo y restauración a nivel de paisaje, que procuren revertir las tendencias actuales y esperadas y más bien tengan impactos positivos sobre la cobertura forestal, la estabilidad en la provisión de servicios ecosistémicos y el bienestar social en la región.
- Además de los elementos metodológicos desarrollados en este trabajo, análisis adicionales de los costos de oportunidad para las transiciones de cambio de uso de la tierra son necesarios para tener una mejor idea, en términos económicos, de cuál sería el costo de llevar a cabo estrategias de manejo del paisaje que provean impactos positivos y relevantes para el contexto socioambiental de la región.



Glosario

Adicionalidad: la adicionalidad es el requisito de que una actividad o un proyecto REDD+ genere beneficios como la reducción de emisiones o el aumento de remociones, que no se habrían dado de no realizarse la actividad (es decir, en el escenario habitual).

Biomasa: la masa total seca de materia orgánica viva.

Bosque: la FAO define el bosque como una zona con una cobertura de dosel mínima del 10%, altura mínima de los árboles in situ de 5 metros, superficie mínima de 0,5 ha y donde la agricultura no es el uso predominante de la tierra. La CMNUCC permite una definición del bosque más flexible: cobertura de dosel mínima de 10 a 30 %, altura mínima de los árboles de 2 a 5 m y superficie mínima de 0,1 ha. Cada país tiene su propia definición.

Business-as-usual (BAU): es una referencia, neutral desde el punto de vista de políticas, de emisiones futuras; representa una proyección de los niveles de futuras emisiones en ausencia de actividades REDD+.

Captura de carbono: es la extracción de carbono de la atmósfera para su almacenamiento a largo plazo en sumideros mediante procesos físicos o biológicos, como la fotosíntesis.

Cobeneficio: beneficios derivados de REDD+ pero distintos de los relacionados con el carbono, como mejora de la biodiversidad, mejoras en la adaptación al cambio climático, alivio de la pobreza, mejoras en los medios de vida locales, mejora de la gobernabilidad de los bosques y protección de derechos.

Datos de actividad: la magnitud de cambio en área entre categorías de uso de la tierra a través del tiempo.

Deforestación: es la conversión de tierra con bosque a tierra sin bosque. En los Acuerdos de Marrakech la deforestación se define como “la conversión directa, producida por la mano del hombre, de tierra forestal en tierra no forestal”. La FAO define la deforestación como “la conversión de bosque a otro uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cobertura arbórea por debajo del umbral mínimo del 10%”.

Degradación: la degradación se refiere a los cambios en el bosque que afectan negativamente a la estructura o funcionamiento del rodal, por lo tanto, reducen su capacidad para suministrar productos o servicios. En el contexto de REDD+, la degradación se mide en términos de reservas de carbono

reducidas en los bosques que permanecen como tales. Todavía no se ha adoptado una definición formal de la degradación, porque muchas reservas de carbono forestal fluctúan debido a causas cíclicas naturales o a prácticas de manejo.

Enfoque anidado: enfoque híbrido que incluye elementos de los enfoques a REDD+, tanto a nivel sub-nacional como nacional.

Estándar voluntario de carbono: esquemas de certificación para la emisión de créditos que no está regulada por el Protocolo de Kyoto.

Factor de emisión: factor que cuantifica las emisiones o remociones de GEI por unidad de datos de actividad, por ejemplo por hectárea de deforestación.

Forestación: la forestación es la conversión directa, producida por la mano del hombre, de tierra forestal que durante al menos 50 años no ha tenido cobertura de bosque, mediante la plantación, siembra y/o fomento por el hombre de fuentes naturales de semillas.

Fugas: en el contexto del cambio climático, las fugas de carbono se producen cuando las intervenciones destinadas a reducir emisiones en una zona (nacional o sub-nacional) causan un aumento de emisiones en otra zona. El nombre oficial que les da la CMNUCC es “desplazamiento de emisiones”.

Mercado de carbono: mercado en el que se comercia con reducciones de emisiones de carbono, generalmente en forma de créditos de carbono (reducciones verificadas o certificadas de emisiones). Los mercados de carbono son de dos tipos: 1) mercados voluntarios (los que no están regulados por acuerdos de la CMNUCC o el Protocolo de Kyoto); o 2) mercados de cumplimiento (en los que se comercia con créditos de carbono para cumplir los objetivos fijados en mecanismos de la CMNUCC). El mayor mercado actual de carbono es el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (ETS).

Mitigación: acciones que previenen la acumulación adicional de GEI en la atmósfera reduciendo los montos emitidos o incrementando el almacenamiento de carbono en sumideros.

Nivel (“Tier”, en inglés): los niveles definidos en las directrices de buenas prácticas del IPCC son niveles de complejidad metodológica para medir las emisiones de GEI: el nivel 1 es el más básico y emplea valores globales predeterminados para las existencias de carbono. El nivel 2 es el nivel intermedio y utiliza valores nacionales. El nivel 3 es el más exigente en cuanto a complejidad y necesidad de datos y usa valores procedentes de mediciones repetidas en el tiempo y modelado.

Nivel de referencia (NR): se pueden distinguir dos significados diferentes y usos diferenciados de los NR. Primero, NR se refiere al *escenario BAU o línea de base* de los cambios en las reservas de carbono, que se emplea como punto de referencia para medir el impacto de las políticas y acciones de REDD+ y para definir las reducciones en las emisiones. En este sentido, el nivel de referencia puede referirse a los niveles de emisiones brutas de la deforestación y la degradación de los bosques (NRF) y a los niveles de emisiones netas del total de emisiones y remociones de la deforestación, la degradación de los bosques, la conservación, el manejo sostenible de los bosques y el aumento de las existencias de carbono forestal (NREF). Segundo, en un sistema en función de resultados, el nivel de referencia se utiliza como punto de referencia para estimar los pagos a realizar a países, unidades subnacionales o proyectos, a cambio de reducciones en las emisiones.

Pagos por servicios ambientales (PSA): un usuario que valora los servicios ambientales efectúa un pago al proveedor o administrador del uso de la tierra que rinde esos servicios; a cambio, el vendedor continúa prestándolos. En REDD+, el PSA se refiere a un sistema basado en resultados en que se realizan pagos por reducciones de las emisiones o incrementos en las remociones en relación con un nivel de referencia acordado.



Países del Anexo I y no Anexo I: en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), los países se agrupan en dos categorías: países desarrollados (países del Anexo I) y países en desarrollo (países no pertenecientes al Anexo I). De acuerdo con el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, los países del Anexo I han adquirido mayores compromisos de elaboración de políticas e informes que los países no pertenecientes al Anexo I. La mayoría de los países del Anexo I se han comprometido a reducir sus emisiones de GEI de acuerdo con el Protocolo de Kioto.

Protocolo de Kioto: acuerdo firmado en 1977 bajo la CMNUCC. Los países del Anexo I que ratificaron el protocolo se comprometieron a reducir sus emisiones de dióxido de carbono y otros cinco GEI en un 5,2 % entre 2008 y 2012, tomando como referencia su nivel en 1990. El Protocolo de Kioto ahora comprende 191 países, pero representa menos del 64% de las emisiones GEI. En abril de 2012, EE.UU. era la única nación firmante que no había ratificado el protocolo y Canadá renunció al protocolo en diciembre de 2011. El primer periodo de compromiso del Protocolo de Kioto finalizó el 31 de diciembre de 2012.

Reducción de emisiones por la deforestación y la degradación forestal y aumento de las reservas de carbono forestal en los países en

desarrollo (REDD+): REDD+ es un mecanismo de gestión forestal asociado a la CMNUCC que incluye principalmente acciones para reducir las emisiones causadas por la deforestación y por la degradación de los bosques. El símbolo “+” representa la conservación de las existencias de carbono, el manejo forestal sostenible y la mejora de las reservas de carbono forestales asociada a la restauración.

Reforestación: la reforestación es la conversión directa (mediante actividad humana) de tierra no arbolada en tierra arbolada, con plantaciones, siembras y/o la promoción humana de fuentes de semillas naturales dentro de tierras que ya habían contenido bosques pero que fueron convertidas en tierras no forestales.

Existencia de carbono: la cantidad de carbono contenida en un reservorio de carbono.

Reservorio o sumidero de carbono: es un depósito que acumula o libera carbono. Los Acuerdos de Marrakech reconocen cinco reservorios de carbono principales en los bosques: biomasa sobre el suelo, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y materia orgánica del suelo.

Verificación: evaluación independiente, realizada por terceros, de las reducciones actuales o proyectadas de una actividad de mitigación específica.

Literatura citada

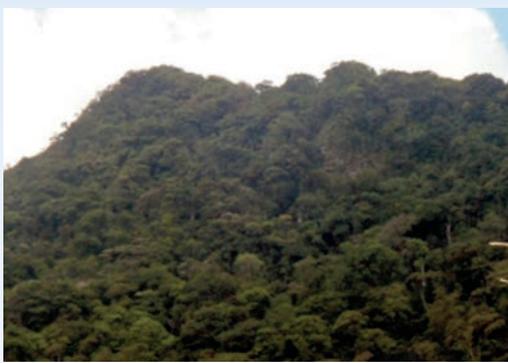
- Achard, F.; De Fries, R.; Eva, H.; Hansen, M.; Mayaux, P.; Stibig, H.-J. 2007. Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters*. 2 (2007) (045022.): 11.
- Angelsen, A.; Wertz-Kanounnikoff, S. 2008. ¿Cuáles son los temas clave en el diseño REDD y cuáles los criterios para evaluar las opciones? En: Angelsen, A. (ed.) *Avancemos con REDD: problemas, opciones y consecuencias*. Bogor, Indonesia. Center for International Forestry Research (CIFOR). pp. 11-22.
- Angelsen, A. (ed.) 2008. *Moving ahead with REDD: Issues, options and implications*. Bogor, Indonesia. CIFOR. 155p.
- Asner, G.P. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64:234–253.
- Asner, G.P.; Heidebrecht, K.B. 2002. Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon in arid regions: Comparing multi-spectral and hyperspectral observations. *International Journal of Remote Sensing*. 23:3,939–3,958.
- Asner, G.P.; Warner, A.S. 2003. Canopy shadow in IKONOS satellite observations of tropical forests and savannas. *Remote Sensing of Environment* 87:521–533.
- Asner, G.P.; Keller, M.; Pereira, R.; Zweede, J.C.; Silva, J.N.M. 2004. Canopy damage and recovery following selective logging in an Amazon forest: Integrating field and satellite studies. *Ecological Applications*. 14(4):280–298.
- Asner, G.P.; Knapp D.E.; Broadbent, E.N.; Oliveira, P.J.C.; Keller, M.; Silva, J.N. 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*. 310:480–482.
- Asner, G.P. 2008. Hyperspectral remote sensing of canopy chemistry, physiology and diversity in tropical rainforests. En: M. Kalacska and G.A. Sanchez-Azofeifa (eds.) *Hyperspectral remote sensing of tropical and subtropical forests*. Taylor, Kentucky, EUA. Taylor and Francis Group.
- Asner, G. P. 2009. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters*. 4(3):1748.
- Asner, G.P.; Knapp, D.E.; Balaji, A.; Páez-Acosta, G. 2009. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*. 3(033543):24.
- Bernstein, L.S.; Adler-Golden, S.M.; Sundberg, R.L. et al., 2005. Validation of the Quick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. *SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI*. 5806, pp.: 668-678.
- Breiman, L. 2001, *Random Forests*, *Machine Learning* 45(1): 5-32.
- Brown, S. 1997. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer*. FAO. Forestry Paper 134. Roma, Italia. 55 p.
- Brown, S. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116(3): 363-372.
- Bucki, M.; Cuyper, D.; Mayaux, P.; Achard, F.; Estreguil, C.; Grassi, G. 2012. Assessing REDD+ performance of countries with low monitoring capacities: the matrix approach. *Environmental Research Letters*. 7(10):1-13.
- Buzai D.G.; Baxendale, C.A. 2006. *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires, Argentina. Editorial GEPAMA.
- CCAD. 2012. Puntos de posicionamiento de los países SICA hacia Durban. Documento aprobado en la reunión de ministros de CCAD realizada en San Salvador, 22-23 noviembre 2011. Documento consultado en http://www.cambioclimaticochile.cl/pdf/SICA_posicion_hacia_COP_17_Durban_231111.pdf
- Chambers, J.; Asner, G.; Morton, D.; Anderson, L.; Saatchi, S.; Espirito-Santo, F.; Palace, M.; Souza, C. 2007. Regional ecosystem structure and function: ecological insights from remote sensing of tropical forests *Trends in Ecology and Evolution* 22(8):414-423.
- Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. 3a edición revisada. Alcalá, Madrid, RIALP. 568 p.
- Cifuentes-Jara, M. 2008. *Aboveground biomass and ecosystem carbon pools in Tropical secondary forest growing in six life zones of Costa Rica*. PhD Thesis, Oregon State University.
- Clean Development Mechanism. 2012. Best practices examples focusing on sample and reliability calculations. Disponible en https://cdm.unfccc.int/filestorage/N/G/P/NGPMF40672J3CBDVAYRTS8IXQZ5WKL/eb67_repan06.pdf?t=VGF8bnh5eTBwFDAdpLcraq3e3UNfiG_TmUMI
- Congalton, R.G.; Green, K. 2009. *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices*. 2 ed. Boca Raton, Florida. Taylor & Francis Group. 200p.
- de Almeida, C.M.; Batty, M.; Vieira, A.M.; Câmara, G.; Soares-Filho, B.S.; Coutinho, G.; Pennachin, C. 2003. Stochastic celular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers. Environment and Urban Systems*. 27: 481-509.
- DeFries, R.; Achard, F.; Brown, S.; Herold, M.; Murdiyarso, D.; Schlamadinger, B.; de Souza Jr., C. 2006. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries: Considerations for monitoring and measuring. *GOFC-GOLD Report No. 26. GTOS Report No. 46*. Roma, Italia. Global Terrestrial Observing System (GTOS) 22p.
- Eastman, J.R. 2012. *IDRISI SELVA, Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark University. Disponible en www.clarklabs.org.
- Eastman, J.R. 2016. *IDRISI TERRSET, Manual del usuario*. Clark University. Disponible en www.clarklabs.org

- Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). 2015. ER Program Name: REDD+ Program to Combat Climate Change and Poverty in Nicaragua. Carbon Fund Emission Reductions Program Idea Note (ER-PIN) VERSION 1.
- FUNICA (Fundación para el Desarrollo Tecnológico Agropecuario y Forestal de Nicaragua). 2009. Caracterización socioeconómica de la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN) de Nicaragua. FUNICA. 60 p.
- GOETZ, S.J.; Baccini, A.; Laporte, N.T.; Johns, T.; Walker, W.; Kelndorfer, J.; Houghton, R. A.; Sun, M. 2009. Mapping and monitoring carbon reserves with satellite observations: a comparison of methods. *Carbon Balance and Management* 4;(2): 7.
- GOFC-GOLD. 2013. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon reserves in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version COP19-2. Holanda. GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen. 243p.
- Gibbs, H.K.; Brown, S.O.; Niles, J.; Foley, J.A. 2007. Monitoring and estimating tropical carbon reserves: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2:1-13.
- Guevara, M. 2004. Informe Nacional Nicaragua. Ministerio Agropecuario Forestal (MAGFOR), Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Roma.
- Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.O.; Townshend, J.R.G. 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 342:850-853.
- Herold, M.; Skutsch, M. 2009. Measurement, reporting and verification for REDD+: objectives, capacities and institutions. En: Angelsen, A., with Brockhaus, M.; Kanninen, M.; Sills, E.; Sunderlin, W.D.; Wertz-Kanounnikoff, S. (eds) *Realising REDD+: national strategy and policy options*. Bogor, Indonesia. CIFOR. pp.85-100.
- Hewson, J.; Steininger, M.K.; Pasmajoglou, S. (eds.) 2014. Manual de Medición, Reporte y Verificación (MRV) de REDD+ Versión 2.0. Washington, DC, Estados Unidos. Programa de Carbono Forestal, Mercados y Comunidades (FCMC). 242p.
- Hijmans, R. J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G.; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25:1965-1978
- Horning, N. 2013. Training Guide for Using Random Forests to Classify Satellite Images - v9. American Museum of Natural History, Center for Biodiversity and Conservation. Disponible en <http://biodiversityinformatics.amnh.org/> (accessed on the date).
- INAFOR (Instituto Nacional Forestal, NI). 2008. Programa Forestal Nacional del Poder Ciudadano, PFN. Managua, Nicaragua. INAFOR. 126 p.
- INAFOR (Instituto Nacional Forestal, NI). 2009. Resultados del inventario nacional forestal: Nicaragua 2007 - 2008. Managua, Nicaragua. INAFOR. 232 p.
- IPCC. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. Penman, J.; Kruger, D.; Galbally, I.; Hiraishi, T.; Nyenzi, B.; Enmanuel, S.; Buendia, L.; Hoppaus, R.; Martinsen, T.; Meijer, J.; et ál. (eds.) Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Hayama, Japón.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry (GPGGLULUCF). Penman, J.; Gytarsky, M.; Krug, T.; Kruger, D.; Pipatti, R.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K.; Wagner, F. (eds.). Kanagawa, Japón. IPCC-IGES. Disponible en: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_contents.html
- IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (eds.) Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japón. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Jarvis, A.; Reuter, H.; Nelson A.; Guevara, E. 2008. Hole-filled seamless SRTM data, 4th edn., International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia.
- Jobse, J.C. 2008. Impacts of Forest-to-Agriculture conversion on aboveground and soil carbon and nitrogen reserves along a bioclimatic gradient in Costa Rica. PhD Thesis, Oregon State University. 186 p.
- Jones, J.R. s.f. Desarrollo de metodología para el monitoreo de las emisiones de CO₂ provocadas por deforestación y degradación de bosques: Propuesta metodológica para la cuantificación de carbono forestal. REDD-CCAD-GIZ (http://www.reddccadgiz.org/documentos/doc_1917235498.pdf)
- López, M. 2012. Análisis de las causas de la deforestación y avance de la frontera agrícola en las zonas de amortiguamiento y zona núcleo de la reserva de biósfera de Bosawas-RAAN, Nicaragua. 83 p.
- Luijten et al. 2006. Land use change modelling for three scenarios for the MAR region. Technical report. Washington, D.C. World Resources Institute (WRI) Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef Data CD.
- Lunetta, R.; Lyon, J. 2004. Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment. CRC PRESS. Boca Ratón, Florida. 326p.
- MacDicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. 91 p.
- MAGFOR (Ministerio Agropecuario y Forestal, NI). 2005. Potencial de plantaciones forestales y fijación de carbono en Nicaragua. Managua, Nicaragua. La Prensa. 178 p.
- MAGFOR (Ministerio Agropecuario y Forestal, NI). 2010. Compendio de mapas: uso potencial de la tierra. Managua, Nicaragua. MAGFOR. 148p.
- MARENA (Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, NI). 2007. Plan de manejo de la reserva de biosfera Bosawas PM-RBB. Secretaría Técnica de Bosawas SETAB, Nicaragua.
- MARENA (Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales, NI). INAFOR (Instituto Nacional Forestal, NI), 2007. Evaluación de daños al ecosistema forestal ocasionados por el huracán Félix, Nicaragua. 37 p. Disponible en <http://www.nicaraguatriunfa.com/documentos2007/OCTUBRE/INFORME%20EVALUATIVO%20AL%20BOSQUE%20OCTUBRE%202007%20Final.pdf>
- MARENA (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, NI). 2008. Segundo inventario nacional de gases de efecto invernadero: Resumen ejecutivo. Nicaragua. MARENA. 44 p.
- MARENA (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, NI). 2013. Informe sobre sistematización temprana de la experiencia ENDE-REDD+ en Nicaragua. Managua, Nicaragua. MARENA, Dirección General de Cambio Climático. 31p.
- Mas, J.F.; Flamenco, A. 2011. Modelación de los cambios de coberturas/ uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico* 5(1): 1-24.
- Mas, J.F.; Kolb, M.; Houet, T.; Paegelow, M.; Camacho, T. 2011. Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usage des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*. 21(3): 405-430.
- Ojeda, J.; Pita, M.F.; Vallejo, I. (eds.) 2010. Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Sevilla, España. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Olofsson, P.; Giles, M.D.; Herol, M.; Stehman, S.V.; Woodcock, C.; Wulder, M. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing for Environment*. 148:42-57.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2005. Evaluación de los recursos forestales a 2005 FRA 2005. Términos y definiciones. Roma, Italia. Departamento de Montes, OIMT. 54 p. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/ae349s/ae349s00.pdf>
- Penman, J.; Gytarsky, M.; Hiraishi, T.; Krug, T.; Kruger, D. 2003. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS Kanagawa. Japón. IPCC-IGES.
- Pedroni, L. 2012. Methodology for Avoided Unplanned Deforestation. Version 1.1. Sectoral Scope 14. Carbon Decisions International. 208 p. Disponible en <http://www.v-c-s.org/sites/v-c-s.org/files/V0015%20Methodology%20for%20Avoided%20Unplanned%20Deforestation%20v1.1.pdf>
- Pedroni, L.; Espejo, A.; Villegas, J.P. 2015. Nivel de referencia de emisiones y absorciones forestales de Costa Rica ante el Fondo de Carbono de FCPF: metodología y resultados Preparado para el Gobierno de Costa Rica bajo el Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF). Carbon Decisions International.
- Pérez, C.; Muñoz, A. (eds.) 2006. Teledetección: Nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca. 359 p.
- PNUM (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, NI). 2005. Informe de desarrollo humano 2005. Las regiones autónomas de la Costa Caribe: ¿Nicaragua asume su diversidad? Managua, Nicaragua. PNUM. 340 p.
- Pontius, R.G.; Boersma, W.; Castella, J.-C.; Clarke, K.; de Nijs, T.; Dietzel, C.; Duan, Z.; Fotsing, E.; Goldstein, N.; Kok, K.; Koomen, E.; Lippitt, C.D.; McConnell, W.; Sood, A.M.; Pijanowski, B.; Pithadia, S.; Sweeney, S.; Trung, T.N.; Veldkamp, A.T.; Verburg, P.H. 2008. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Ann. Reg. Sci.* 42:11-37.
- Posada, E. 2011. Manual de prácticas de percepción remota. Bogotá, Colombia, CIAF - IGAC. 130 p.
- Qureshi, A.; Pariva, Badola, R; Hussain, S.A. 2012. A review of protocols used for assessment of carbon stock in forested landscapes. *Environmental Science and Policy* 16:81-89.
- R Development Core Team. (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <http://www.R-project.org>.

- Richards, J.A.; Jia Xiuping. 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis. 4 ed. Hiedlberg, Alemania. Springer-Verlag Berling. 494p.
- Sarria, F. 2008. Técnicas de teledetección aplicadas a la gestión de los recursos hídricos. Apuntes de la maestría: Consultoría hidrológica y manejo de ecosistemas acuáticos. Universidad de Murcia, Facultad de biología, Programa de postgrado en tecnología, administración y gestión del agua (TAyGA). 162 p.
- Sentinel-1 Team. (2013). Sentinel-1 User Handbook. European Space Agency ESA. GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001. 80p. Disponible: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook
- Silver, W.; Ostertag, R.; Lugo, A. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of tropical agricultural and pasture lands. . Restoration Ecology 8:394-407.
- Sloan, S.; Pelletier J. 2012. How accurately may we project tropical forest-cover change? A validation of a forward-looking baseline for REDD. Global Environmental Change 22:440–453.
- Soares-Filho, B.; Coutinho-Cerqueira, G.; Pennachin, C. 2002. DINAMICA-a stochastic celular autómatas model designed to simulate the landscape dynamics in Amazonian colonization frontier. Ecological Modelling 154:217-235.
- Soares-Filho, B.S.; Alencar, A.; Nepstad, D.; Cerqueira, G.; Vera, M.; Rivero, S.; Solórzano, L.; Voll, E. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. Global Change Biology. 10:745-764.
- Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Lenney, M.P.; Macomber, S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? Remote Sensing of Environment. 75(2):230-244.
- Teixeira, A.; Soares-Filho, B.S.; Freitas, S.R.; Metzger, J.P. 2009. Modeling landscape dynamics in an Atlantic rainforest region: implications for conservation. Forest Ecology and Management. 257:1219-1230.
- Tsybalya A.; Pechenizkiy M.; Cunningham P. 2006. Dynamic Integration with Random Forest. En: Fürnkranz et al (Eds.) Proc. of 17th European Conf. on Machine Learning (ECML/PKDD'06), LNAI 4212, Heidelberg, Alemania. Springer Verlag. pp.801-808.
- Verburg et al. 2002. Modeling the Spatial dynamics of region land use: the CLUE-S model. Environmental Management. 30(3): 391-405. DOI:10.1007/s00267-002-2630-x.
- Verchot, et al. 2013. Factores de emisión. Conversión del cambio de uso de la tierra a estimaciones de CO₂. In: Angelsen, A. (ed.) Análisis de REDD+. Retos y opciones. Bogor, Indonesia. CIFOR. 295-315p.
- Verified Carbon Standard. 2012. Methodology for avoided unplanned deforestation. Approved VCS methodology VM0015. Version 1.1, 3 December 2012. Sectoral Scope 14. Disponible en: <http://database.v-c-s.org/sites/vcs.benfredaconsulting.com/files/VM0015%20Methodology%20for%20Avoided%20Unplanned%20Deforestation%20v1.1.pdf>
- Verified Carbon Standard. 2013. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) Requirements, version 3.4. 63 p.
- Verified Carbon Standard. 2014. Jurisdictional and Nested REDD+ (JNR) Requirements, version 3.2 of October 30, 2014, 57p. Disponible en <http://database.v-c-s.org/sites/vcs.benfredaconsulting.com/files/Jurisdictional%20and%20Nested%20REDD%2B%20Requirements.%20v3.2.pdf>.
- Vermote, E.F.; El Saleous, N.Z.; Justice, C.O.; Kaufman, Y.J.; Privette, J.L.; Remer, L.; Roger, J.C.; Tanre, D. 1997. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: back-ground, operational algorithm and validation. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 102(D14): 17131–17141.
- Vreugdenhil, D.; Meerman, J.; Meyrat, A.; Gómez, L.D.; Graham, D.J. 2002. Map of the Ecosystems of Central America: Final Report. Washington, D.C. Banco Mundial. 65 p.
- Wang, X.; Ge, L.; Li, X. 2012. Evaluation of filters for Envisat Asar Speckle suppression in pasture area. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 1-7: 341-346.
- World Bank and CCAD. 2000. Ecosystems of Central America (ArcView regional mapFiles at: 1:250,000). World Bank, Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), World Institute for Conservation and Environment (WICE), and the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Washington, D.C. (Disponible en: <http://www.worldbank.org/ca-env>)
- Ximenes, A.; Almeida, C.M.; Amaral, S.; Escada, M.I.S.; Aguiar, P.D. 2011. Spatial Dynamic Modelling of Deforestation in the Amazon. En: Alejandro Salcido (ed.). Cellular Automata - Simplicity Behind Complexity. Rijeka, Croacia. INTECH. pp. 47-66.
- Zhu, Z.; Woodcock, C.E. 2012. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery, Remote Sensing of Environment. 118: 83-94. doi:10.1016/j.rse.2011.10.028.

Anexos

Anexo I. Conjunto de fotos y descripción de las clases de uso encontradas en la RACCN

Clase	Descripción	Imagen de ejemplo*
Tierras forestales	Bosque latifoliado Bosque en el que más del 70% de la cubierta arbórea está compuesta por especies de hoja ancha.	
	Bosque de coníferas Bosque en el que más del 70% de la cubierta arbórea está compuesta por especies de coníferas (áreas dominadas por pinos en diferentes estados de desarrollo).	



Clase	Descripción	Imagen de ejemplo*
Tierras forestales	<p>Bosque mixto Bosque en el cual ni coníferas, ni latifoliadas, ni palmeras o bambúes representan más del 75% de la cubierta de copa.</p>	
	<p>Plantación forestal Rodales forestales establecidos durante el proceso de forestación o reforestación. Pueden estar formados de especies introducidas o de rodales de especies nativas sometidos a manejo intensivo.</p>	
	<p>Matorrales (tacotales) Fase que ha estado en descanso por más de cuatro años y donde crecen plantas leñosas perennes con tallos persistentes Predominan arbustos y árboles, con poca o nula presencia de plantas espinosas.</p>	
	<p>Manglar Bosque dominado por un grupo de especies que han desarrollado adaptaciones fisiológicas, reproductivas y estructurales que les permite colonizar sustratos inestables y áreas anegadas con alta salinidad, sujetas a los cambios de las mareas en las costas tropicales y subtropicales protegidas por el oleaje.</p>	

Clase	Descripción	Imagen de ejemplo*
Sabanas Arboladas Temporalmente Anegadas (SATA)	Sabanas de graminoides cortos con presencia de especies latifoliadas, coníferas y palmas, aisladas que por su condición topográfica, geopedológica, y régimen climático, pueden permanecer temporalmente anegadas.	
Tierras agrícolas	Esta categoría incluye la tierra cultivada y los sistemas agrosilvopastoriles donde la estructura de la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales.	
Pastizales	Esta categoría incluye las tierras de pastoreo, hierbas, maleza, zonas de recreo, así como los sistemas silvopastoriles y los pastizales que no se consideran tierras de cultivo.	
Cuerpos de agua	Superficie ocupada por ríos, lagos, lagunas y embalses importantes.	



Clase	Descripción	Imagen de ejemplo*
Otras tierras	Esta categoría incluye el suelo desnudo, rocas expuestas, asentamientos humanos y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras categorías, o que no pudieron ser clasificadas en ninguna de las clases anteriores	

*Fotografías proyecto CATIE-ICRAF 2015

Anexo 2. Sensores ópticos

Los sensores ópticos son sensores pasivos los cuales dependen de la luz del sol incidente sobre la superficie. Por consiguiente, necesitan la luz del día para captar las imágenes. Este tipo de herramientas han sido de gran utilidad en estudios ambientales y de cobertura del suelo, debido a la gran cobertura a nivel mundial, desarrollo de programas de procesamiento de las imágenes y disponibilidad de las mismas vía Internet. Mediante el uso de este tipo de sensores, se puede hallar una correlación entre los índices espectrales de la vegetación y la biomasa aérea, teniendo en cuenta las limitaciones frente a las condiciones de sombra, saturación del espectro y nubosidad (Chuvieco 1996). Los sensores utilizados en el análisis fueron:

Landsat 5

El sensor TM es un avanzado sensor de barrido multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS de Landsat 4 (Cuadro 17). La escena registrada por este sensor es de 185 km².

Landsat 7

Landsat 7 provee imágenes de alta calidad en el visible e infrarrojo, las cuales se están actualizando con una periodicidad de 16 días (Cuadro 18). Provee una colección global sistemática de datos multiespectrales de alta resolución ya que se encuentra en una órbita heliosincrónica. A diferencia de sus antecesores, viene

con mejoras en la calibración y tiene la capacidad de recolectar y transmitir el equivalente de 250 ETM+ escenas por día.

Landsat 8

Landsat 8 es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de imágenes multiespectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores. Incorpora dos sensores de barrido para la observación terrestre Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a las del sensor Landsat 7 ETM+, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre efectos de las nubes, agua y nieve (Cuadro 19).

Por otra parte, el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+.

Cuadro 17. Características espectrales y espaciales del sensor Landsat TM

Modo espectral	Espacial (m)	Espectral (micras)		Radiométrica	Temporal
Multiespectral	30	Banda azul	0,45 – 0,52	8 bits	16 días
		Banda verde	0,52 – 0,60		
		Banda roja	0,63 – 0,69		
		Banda infrarrojo cercano 1	0,76 – 0,9		
		Banda infrarrojo cercano 2	1,55 – 1,75		
		Banda infrarrojo medio	2,08 – 2,35		
Termal	120	Banda infrarrojo térmico	10,4 – 12,5		

Fuente: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/program/>

Cuadro 18. Características espectrales y espaciales del sensor Landsat ETM

Modo espectral	Espacial (m)	Espectral (micras)		Radiométrica	Temporal
Multiespectral	30	Banda azul	0,45 – 0,52	8 bits	16 días
		Banda verde	0,53 – 0,61		
		Banda roja	0,63 – 0,69		
		Banda infrarrojo cercano 1	0,78 – 0,90		
		Banda infrarrojo cercano 2	1,55 – 1,75		
		Banda infrarrojo medio	2,09 – 2,35		
Pancromática	15	Banda pancromática	0,52 – 0,9		

Fuente: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/program/>

Cuadro 19. Características espectrales y espaciales del sensor Landsat LDCM

Modo espectral	Espacial (m)	Espectral (micras)		Radiométrica	Temporal
Multiespectral	30	Banda aerosol costero	0,43 – 0,45	8 bits	16 días
		Banda azul	0,45 – 0,51		
		Banda verde	0,53 – 0,59		
		Banda roja	0,64 – 0,67		
		Banda infrarrojo cercano NIR	0,85 – 0,88		
		Banda SWIR1	1,57 – 1,65		
		Banda SWIR2	2,11 – 2,29		
		Banda Cirrus	1,36 – 1,38		
Pancromática	15	Banda pancromática	0,5 – 0,68		
Infrarrojo térmico TIRS1	100	Banda Infrarrojo térmico	10,6 – 11,19		
Infrarrojo térmico TIRS2	100	Banda Infrarrojo térmico	11,5 – 12,51		

Fuente: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/program/>



Anexo 3. Sensores Radar

Los sensores de Radar son sensores activos, los cuales emiten su propia luz, enviando señales de ondas que penetran hasta la superficie, atravesando las nubes y delineando el terreno y el dosel de la vegetación. A partir del retorno de la señal, se puede estimar la altura de cada una de las superficies percibidas, la cual puede ser utilizada para estimar la biomasa, desarrollando modelos alométricos entre la biomasa y la altura media de dosel (Goetz et al. 2009).

La principal ventaja que presenta el radar es su capacidad de penetrar las nubes por medio de las microondas con que impactan la superficie. Esto es de gran importancia en condiciones ambientales densas del bosque lluvioso tropical, cubriendo además áreas con suficiente frecuencia debido a la alta resolución temporal y sistema de radar polarimétrico que ofrece amplias posibilidades de monitoreo (Gibbs et al. 2007). Los sensores radar utilizados en el análisis fueron:

ALOS - PALSAR

Las imágenes capturadas por el satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) forman parte del programa satelital de monitoreo terrestre de la Agencia de Exploración Espacial Japonesa (JAXA) Y JAROS (*Japan Resources Observation System Organization*). Las imágenes fueron obtenidas de NASA Alaska Science Facility³¹ (ASF). ALOS trabaja con tres instrumentos: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*) y PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*). En su conjunto, es un sensor activo de microondas que cuenta con una antena que proporciona capacidades de observación de la tierra independiente del tiempo (lluvia/sol) o momento del día (día/noche). La banda L ofrece múltiples modos de toma con resoluciones espaciales entre los 7 y 100 m y diferentes modos de polarización vertical y horizontal.

Las imágenes de ALOS-PALSAR proveen una fuente de información global que permite documentar los cambios existentes en la cobertura forestal y ofrece la posibilidad para cuantificar la dinámica boscosa histórica y futura a través de la comparación de sus sets de datos (2007, 2008, 2009 y 2010).

La sensibilidad del sistema para calcular biomasa por encima del suelo se explica por la capacidad de la banda L de penetrar a través del dosel e interactuar con los troncos y ramas más grandes. Por otro lado, las áreas sin bosque exhiben una retro dispersión baja en la banda L, lo cual facilita el mapeo de áreas deforestadas en algunas regiones. Sin embargo, este efecto (principalmente en la polarización HH) a menudo incrementa los valores a partir de la apertura de claros, debido a la mayor dispersión de la energía de los tocones, restos de madera, y sobre todo después de eventos lluviosos. Los valores con el tiempo vuelven a declinar debido a la regeneración llegando a ser similares a los del bosque (Cuadro 20).

SENTINEL 1A

Los satélites Sentinel constituyen el núcleo de Copernicus, un programa que funciona como una red de vigilancia medioambiental europea. Copernicus proporciona información relativa a la superficie terrestre, incluidos los océanos, y a la atmósfera, siendo adecuado para la mayoría de aplicaciones incluyendo geología, geomorfología, humedad del suelo, cobertura del suelo y aplicaciones marítimas.

Sentinel-1 está diseñada como una constelación de dos satélites – Sentinel-1A y -1B. Este instrumento posee su propia fuente de energía y por tanto tiene la capacidad para capturar imágenes diurnas y nocturnas, y en todas las condiciones meteorológicas, de la superficie terrestre. Consta de un Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) de banda C (C-SAR), el cual ha sido diseñado y desarrollado por EADS Astrium GmbH de Alemania. C-SAR proporciona un escaneo rápido en elevación (cubre un amplio rango de ángulo de incidencia) y en azimut (para permitir el uso de TOPS para cumplir con los requisitos de calidad de la imagen).

El instrumento SAR emite señales de microondas a intervalos regulares sobre una región de interés, recibe parte de esta energía que es retrodispersada desde dicha región y detecta la intensidad y la distancia a partir del retardo en el tiempo de las señales de retorno. Estas mediciones son influenciadas por la estructura del terreno y la rugosidad de la superficie; existiendo generalmente mayor retro dispersión y características brillantes en áreas con mayor rugosidad,

31 <https://www.asf.alaska.edu/>

Cuadro 20. Características espectrales y espaciales de ALOS-PALSAR

Mode	Fine Scan		SAR	Polarimetric mode *1
Chirp Bandwidth	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
Polarization	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV+VH+VV
Incident angle	8 to 60 deg.	8 to 60 deg.	18 to 43 deg.	8 to 30 deg.
Range Resolution	7 to 44 m	14 to 88 m	100 m (multi look)	24 to 89 m
Observation Swath	40 to 70 km	40 to 70 km	250 to 350 km	20 to 65 km
Bit Length	5 bits	5 bits	5 bits	3 or 5bits
Data rate	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps,240 Mbps	240Mbps
NE sigma zero *2	< -23 dB (Swath Width 70km)		< -25 dB	< -29 dB
	< -25 dB (Swath Width 60km)			
S/A *2,*3	> 16 dB (Swath Width 70 km)		> 21 dB	> 19 dB
	> 21 dB (Swath Width 60km)			
Radiometric accuracy scene	1 dB / orbit: 1.5 dB			
size of Antenna	azimuth: 8,9 m x elevation: 3,1m			

*1 Vida operacional limitada.

*2 Válido para un ángulo off-nadir de 34,3 grados. (Fine mode), 34,1 deg. (ScanSAR mode), 21,5 deg. (Polarimetric mode)

*3 S/A posible deterioro debido a cambios ingenieriles en PALSAR.

Fuente: tomado de www.alos-restec.jp/

mientras que las superficies planas reflejan la señal con características oscuras; así mismo, objetos estructuralmente complejos (bosques) aparecen brillantes por la interacción de la señal con las hojas, ramas y troncos resultando en una alta proporción de señal retransmitida al sensor.

El sistema SENTINEL opera en cuatro modos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). Dispone capacidad de polarización dual, repetición de visitas muy cortas y rápida entrega de productos. Mediciones precisas de la posición y altitud están disponibles para cada observación. Los modos de adquisición de los datos son:

- **Stripmap (SM):** un modo de imagen estándar SAR, donde la franja de tierra es iluminada con una secuencia continua de pulsos, mientras que el haz de la antena está apuntando al azimut fijo y al ángulo de elevación.

- **Ancho de barrido interferométrico (IW):** los datos se adquieren en tres franjas que utilizan la observación del terreno con técnica de escaneo progresiva SAR (TOPSAR). En el modo IW, los impulsos están sincronizados paso a paso para asegurar la alineación de pares interferométricos. IW es el modo operativo principal del Sentinel-1 sobre la tierra.
- **Ancho de barrido extra (EW):** los datos se adquieren en cinco franjas utilizando la técnica de imagen TOPSAR. El modo EW proporciona cobertura de franja muy amplia a expensas de la resolución espacial.
- **Onda (WV):** los datos se adquieren en pequeñas escenas llamados "viñetas", situado a intervalos regulares de 100 km a lo largo del track. Las viñetas son adquiridas por alternancia, adquiriendo una viñeta en un ángulo de incidencia cercano mientras que la siguiente viñeta se adquiere en un ángulo de incidencia más lejano. WV es el modo de funcionamiento del SENTINEL-1 sobre el océano (Cuadro 21).



Cuadro 21. Características espectrales y espaciales de SENTINEL 1A

Característica	Valor
Ancho de barrido	250 km
Ángulo de incidencia	29,1° - 46°
Subbarridos	3
Ángulo de dirección del azimut	±0,6°
Azimut y aspecto de rango	Single
Opciones de polarización	Dual HH+HV, VV+VH Single HH, VV
Máximo ruido equivalente a sigma zero (NESZ)	-22 dB
Estabilidad radiométrica	0,5 dB (3 σ)
Confiabilidad radiométrica	1 dB 3 σ
Fase de error	5°

Fuente: Sentinel-1 Team (2013).

Anexo 4. Escenas utilizadas en el análisis histórico (2000-2014)

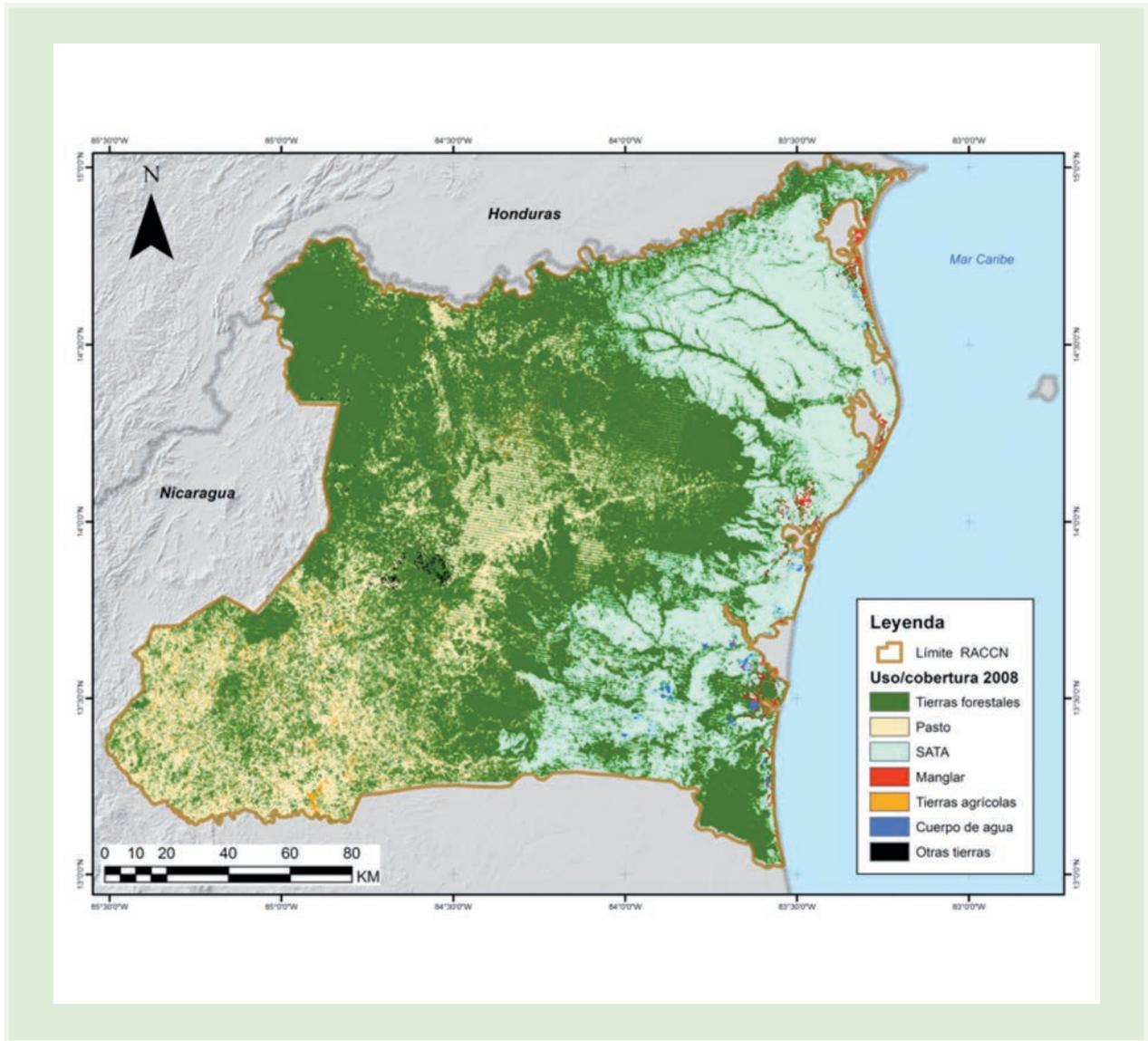
Año de análisis	Fecha toma	Satélite	Sensor	Path/Row	Fuente	Número
2000	1999	Landsat 7	ETM+	15/50	USGS	LE70150501999257EDC00.tar
	2000	Landsat 7	ETM+	16/51	USGS	LE70160512000027EDC01.tar
	2001	Landsat 7	ETM+	16/51	USGS	LE70160512001317EDC00.tar
	1999	Landsat 5	L4-5	16/50	USGS	LT50160501999320CPE06.tar
	2000	Landsat 5	L4-5	16/50	USGS	LT50160502000291AAA02.tar
	1999	Landsat 5	L4-5	15/50	USGS	LT50150501999329CPE05.tar
	1999	Landsat 5	L4-5	15/51	USGS	LT5015051999329CPE04.tar
	1999	Landsat 5	L4-5	15/51	USGS	LT5015051999361CPE03.tar
1999	Landsat 5	L4-5	16/51	USGS	LT50160511999256CPE00.tar	

Año de análisis	Fecha toma	Satélite	Sensor	Path/Row	Fuente	Número
2008	2008	Landsat 7	ETM	15/50	USGS	LE70150502008314ASN00
	2008	Landsat 7	ETM	15/51	USGS	LE70150512008314ASN00
	2007	Landsat 7	ETM	16/50	USGS	LE70160502007302ASN00
	2007	Landsat 7	ETM	16/51	USGS	LE70160512007350EDC00

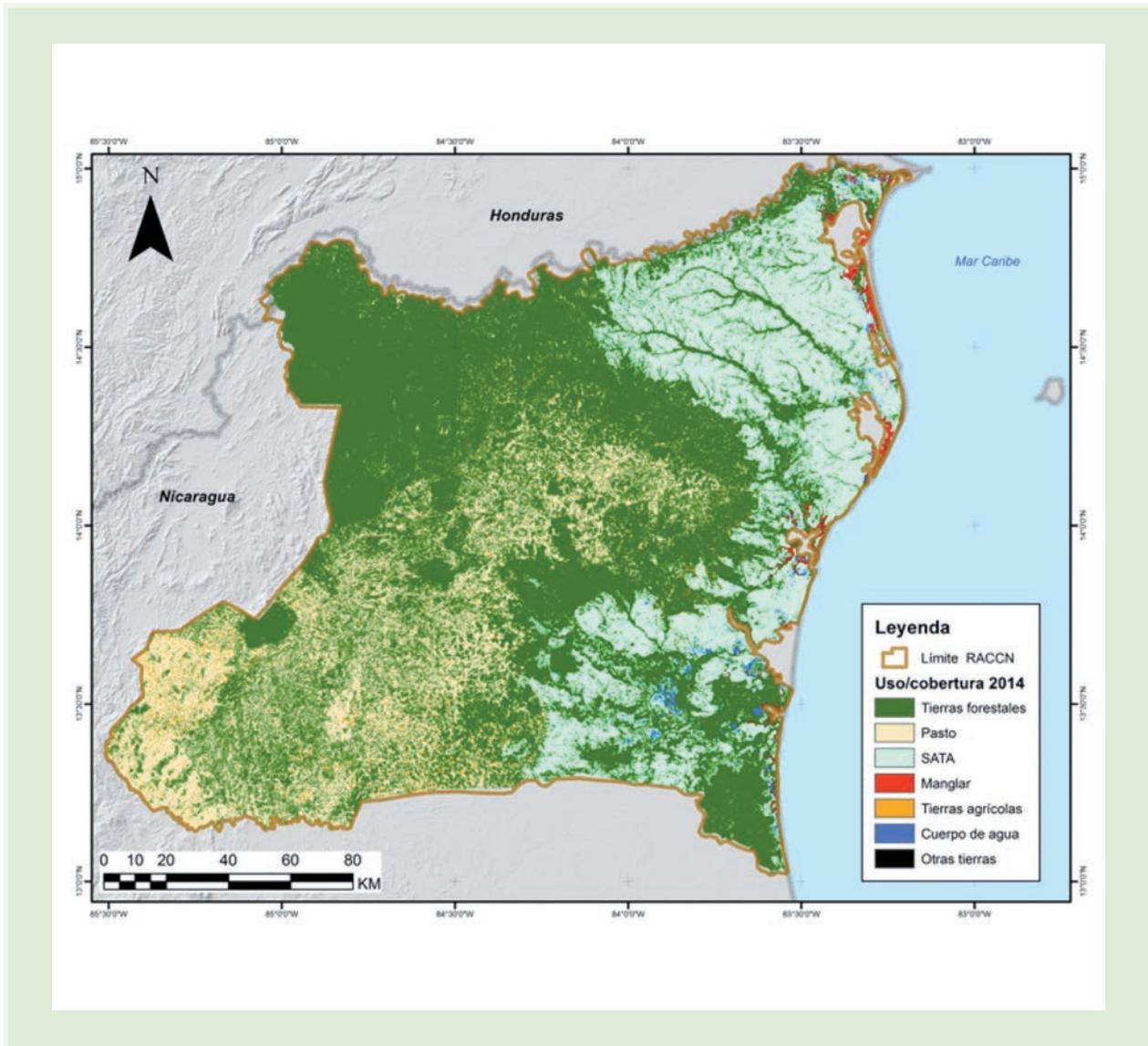
Año de análisis	Fecha toma	Satélite	Sensor	Path/Row	Fuente	Número
2013	2014	Landsat 8	OLI - TIRS	15/50	USGS	LC80150502014034LGN00.tar
	2014	Landsat 8	OLI - TIRS	15/50	USGS	LC80150502014082LGN00.tar
	2014	Landsat 8	OLI - TIRS	15/51	USGS	LC80150512014082LGN00.tar
	2013	Landsat 8	OLI - TIRS	15/51	USGS	LC80150512013255LGN00.tar
	2013	Landsat 8	OLI - TIRS	15/51	USGS	LC80150512013335LGN00.tar
	2013	Landsat 8	OLI - TIRS	16/50	USGS	LC80160502013310LGN00.tar

Fuente: <http://www.usgs.gov/>

Periodo 2008



Periodo 2014



Anexo 6. Matriz de cambio de uso de suelo

Matriz de cambio de uso del suelo para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte de Nicaragua, para el periodo 2000-2008

Uso/ cobertura	Forestal	Pasto	SATA	Mangle	Tierras agrícolas	Cuerpos agua	Otras tierras	Total 2008	Ganancia	Cambio total	Intercambio	Ganancia neta	Pérdida neta
Forestal	1 296 870	307 178	83 227	3372	34 380	4847	398	1 730 271	433 401	699 972	533 142	166 830	
Pasto	184 847	372 171	5790	0	52 199	354	240	615 600	243 429	598 388	486 858		111 529
SATA	62 035	23 542	644 142	3356	489	13 556	755	747 876	103 735	194 864	182 258	12 606	
Mangle	4159	154	1915	8317	0	327	19	14 892	6575	13 334	13 150		185
Tierras agrícolas	11 073	22 570	135	0	3223	0	15	37 016	33 793	121 207	67 586		53 621
Cuerpos agua	289	1125	62	31	172	16 581	10	18 270	1689	20 774	3378		17 396
Otras tierras	4168	389	1	0	173	2	16	4748	4732	6169	2874	3295	
Total 2000	1 563 441	727 129	735 271	15 077	90 637	35 666	1453	3 168 674	827 354	827 354	644 623	182 731	
Pérdida	266 571	354 959	91 129	6760	87 414	19 085	1437	827 354					

Matriz de cambio de uso del suelo para la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte de Nicaragua, para el periodo 2008-2014

Uso/ cobertura	Forestal	Pasto	SATA	Mangle	Tierras agrícolas	Cuerpos agua	Otras tierras	Total 2014	Ganancia	Cambio total	Intercambio	Ganancia neta	Pérdida neta
Forestal	1 435 207	236 055	142 673	6116	15 040	1400	4201	1 840 692	405 485	700 549	590 128	110 421	
Pasto	202 367	353 621	3462	0	19 985	720	510	580 665	227 044	489 022	454 088		34 934
SATA	72 491	5435	585 582	953	165	1295	9	665 929	80 347	242 641	160 694		81 947
Mangle	4768	0	6309	7645	0	202	0	18 923	11 278	18 526	14 495	4031	
Tierras agrícolas	13 619	20 296	2199	2	1825	39	27	38 008	36 183	71 374	70 382	992	
Cuerpos agua	1776	173	7636	173	1	14 587	0	24 347	9760	13 443	7366	6077	
Otras tierras	43	19	15	3	0	28	0	109	109	4857	219		4639
Total 2008	1 730 271	615 600	747 876	14 892	37 016	18 270	4748	3 168 674	770 206	770 206	648 686	121 521	
Pérdida	295 064	261 978	162 294	7247	35 191	3683	4748	770 206					

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y el Estado de Acre en Brasil.



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Contacto:

Miguel Cifuentes Jara, Ph.D.

Programa Bosques, Biodiversidad y Cambio Climático

Sede Central, CATIE

Cartago, Turrialba, 30501

Costa Rica

Tel: +(506) 2558-2393

e-mail: miguel.cifuentes@catie.ac.cr

ISBN: 978-9977-57-670-1

