

INFORME DE PROYECCIONES DE GEI DE LAS MEDIDAS Y ACCIONES DE MITIGACIÓN IMPLEMENTADAS Y/O COORDINADAS POR EL INFONA

Resultado N

Marzo 2026



DISCLAIMER

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted, in any form or by any means, electronic, photocopying, recording or otherwise, for commercial purposes without prior permission of Paraguay. Otherwise, material in this publication may be used, shared, copied, reproduced, printed and/or stored, provided that appropriate acknowledgement is given of Paraguay and ICAT as the source. In all cases the material may not be altered or otherwise modified without the express permission of Paraguay.

PREPARED UNDER

The Initiative for Climate Action Transparency (ICAT), supported by Austria, Canada, Germany, Ireland, Italy, and the Children's Investment Fund Foundation.

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag



MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

 **Federal Ministry
Republic of Austria**
Climate Action, Environment,
Energy, Mobility,
Innovation and Technology



**Environment and
Climate Change Canada**

**Environnement et
Changement climatique Canada**



**Rialtas na hÉireann
Government of Ireland**



ICAT is hosted by the United Nations Office for Project Services (UNOPS)

INFORME DE PROYECCIONES DE GEI DE LAS MEDIDAS Y ACCIONES DE MITIGACIÓN IMPLEMENTADAS Y/O COORDINADAS POR EL INFONA

Initiative for Climate Action Transparency – ICAT

Resultado N

AUTOR

ELVIO JOEL MERCADO VERA

Consultor de apoyo para la Generación de Proyecciones de GEI para evaluar el Impacto de Políticas y Medidas Forestales – Paraguay

MARZO 2026

TABLA DE CONTENIDO

1.	ANTECEDENTES	7
2.	RESUMEN	8
3.	OBJETIVOS	9
4.	ESTIMACIONES HISTORICAS DE GEI 2000-2024	10
4.1.	Panorama General del Sector Forestal	10
4.2.	Alcance Sectorial.....	10
4.2.1.	Categorías de Uso de la Tierra Incluidas	11
4.2.2.	Depósitos de Carbono Considerados	11
4.2.3.	Gases de Efecto Invernadero	12
4.3.	Marco Metodológico	12
4.3.1.	Directrices y Enfoque General.....	12
4.3.2.	Depósitos de Carbono y Niveles Metodológicos.....	13
4.3.3.	Tratamiento de las Transiciones de Uso de la Tierra para asegurar la consistencia temporal.	14
4.3.4.	Análisis de la Serie Temporal Histórica (2000-2024)	14
4.3.5.	Factores de Emisión (FE): Parámetros y Estratificación	23
4.3.6.	Estimación de Emisiones y Absorciones	26
5.	METODOLOGÍA DE PROYECCIÓN DE DATOS DE ACTIVIDAD	28
5.1.	Componente 1: Dinámica de Deforestación en la Región Oriental (RCU) .	28
5.1.1.	Evaluación de Drivers y Desacople Estructural.....	29
5.1.2.	Agrupación Funcional de Variables.....	29
5.1.3.	Selección y Ajuste de Modelos Prospectivos	30
5.2.	Componente 2: Dinámica de Deforestación en la Región Occidental (Frontera Agrícola Activa)	30
5.2.1.	Análisis de la Serie Histórica.....	30
5.2.2.	Evaluación de Modelos Prospectivos	32
5.3.	Componente 3: Extracción de Productos Forestales (Leña, Carbón y Rollizos)	33
5.3.1.	Leña: Modelo de Decaimiento Logarítmico Ponderado y Anclaje Metodológico.....	33

5.3.2.	Carbón Vegetal: Regresión Lineal Bivariada vinculada al Cambio de Uso de la Tierra.....	34
5.3.3.	Rollizos: Tendencia Lineal con Umbral Mínimo Estructural.....	35
5.4.	Componente 4: Expansión de Plantaciones Forestales (IPF).....	35
5.4.1.	Parámetros Base y Factores de Conversión	36
5.4.2.	Construcción de Escenarios Prospectivos de Demanda.....	36
5.4.3.	Modelo Logístico en los Escenarios	37
5.5.	Metodología para la Construcción de la Línea de Base y Escenarios en GEI	38
6.	RESULTADOS DE PROYECCIONES Y ESTIMACIONES DE GEI.....	39
6.1.	Resultados Consolidados estimaciones históricas GEI (2000-2024)	39
6.2.	Resultados de la Proyección del Componente 1: Dinámica de Deforestación en la Región Oriental (RCU).....	40
6.3.	Resultados de la Proyección del Componente 2: Dinámica de Deforestación en la Región Occidental.....	41
6.4.	Resultado de la Proyección del Componente 3: Extracción de Productos Forestales (Leña, Carbón y Rollizos)	42
6.5.	Resultado de la Proyección del Componente 4: Expansión de Plantaciones Forestales (IPF)	44
6.6.	Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Regulación de Cambio de Uso (RCU).....	44
6.7.	Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF)	45
6.8.	Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF)	46
6.9.	Balance Neto Sectorial Consolidado.....	47
7.	CONCLUSIONES	48
8.	ANEXO	51
8.1.	Datos de actividad utilizados.....	51
8.2.	Proyecciones DA - Deforestación Región Oriental	52
8.3.	Proyecciones DA - Deforestación Región Occidental	53
8.4.	Proyecciones DA – Consumo de rollizo y madera combustible.....	54

8.5.	Proyecciones DA – Plantaciones forestales acumuladas y anuales	55
8.6.	Proyecciones GEI – Emisiones y Absorciones	56
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
9.1.	Reportes Nacionales Oficiales y Políticas Públicas	57
9.2.	Directrices Metodológicas Internacionales y Literatura Científica.....	57
9.3.	Documentos Técnicos, Fuentes de Datos y Visualización del Proyecto ICAT Paraguay	59

1. ANTECEDENTES

El Instituto Forestal Nacional (INFONA), como autoridad nacional competente en materia forestal, es responsable de la administración, regulación y promoción del uso sostenible de los recursos forestales, así como de la implementación y coordinación de diversas políticas y medidas vinculadas al sector. Asimismo, INFONA es la entidad compiladora del sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), reportado por Paraguay en su Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR), coordinado por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) y presentado en 2024.

En este marco, INFONA ha logrado avances significativos en el monitoreo y la sistematización de información forestal. A través del Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF) y del Inventario Forestal Nacional (IFN), la institución dispone de Datos de Actividad (DA) espacialmente explícitos y Factores de Emisión y Absorción (FE) propios, correspondientes a un Nivel 2, lo que contribuye a reducir la incertidumbre de las estimaciones y a obtener resultados más representativos de las circunstancias nacionales.

Para la planificación estratégica y la evaluación de políticas forestales específicas, tales como, en el marco de este proyecto, la “Regulación de Cambio de Uso” (conocida como Ley de “Deforestación Cero”) y los “Incentivos a Plantaciones Forestales” (Ley de Vuelo Forestal), resulta necesario avanzar desde el análisis histórico hacia el desarrollo de modelos de proyección que permitan estimar el potencial de mitigación futuro asociado a dichas políticas. En respuesta a esta necesidad de contar con información prospectiva que apoye la toma de decisiones, la Iniciativa para la Transparencia en la Acción Climática (ICAT), junto con el Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI), apoyan al Gobierno de Paraguay a través del proyecto "Desarrollo de un Sistema de Evaluación y Seguimiento de Políticas Forestales".

Asimismo, en el marco de los compromisos asumidos por Paraguay ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Acuerdo de París, el país ha venido fortaleciendo progresivamente su transparencia climática. Esto se refleja, entre otros avances, en la presentación del 1BTR, que incluye el último Inventario Nacional de GEI con una serie temporal de 1990-2021, y en la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC 3.0), en la cual se presentan metas y proyecciones de emisiones netas de GEI bajo un escenario futuro Business-as-Usual (BAU), construidas sobre la base de las metodologías del IPCC y utilizando la información más reciente disponible del INGEI.

En este contexto, el presente informe responde específicamente al Componente 3, Resultado N, del proyecto ICAT Paraguay, cuyo objetivo es la "generación de proyecciones de GEI para evaluar el impacto de las políticas y medidas del sector forestal implementadas y/o coordinadas por el INFONA". La metodología aplicada se alinea con los estándares de transparencia del 1BTR y tiene como finalidad desarrollar proyecciones específicas para dos instrumentos clave: la Regulación de Cambio de Uso (Ley de Deforestación Cero) y los Incentivos a Plantaciones Forestales (Ley de Vuelo Forestal), proporcionando insumos técnicos robustos para la toma de decisiones basada en evidencia.

2. RESUMEN

Este documento técnico, desarrollado en el marco del Proyecto ICAT Paraguay (Resultado N), tiene como objetivo principal establecer los escenarios de referencia (Línea de Base) y presentar las proyecciones de emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector forestal para el horizonte 2025-2040. Específicamente, el informe se circunscribe a dos instrumentos de política coordinados por el Instituto Forestal Nacional (INFONA): la Regulación de Cambio de Uso (RCU - Ley de Deforestación Cero) y los Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF - Ley de Vuelo Forestal).

Para lograr estos objetivos, se aplicó un enfoque metodológico secuencial, el cual inicia con la proyección de los Datos de Actividad previo a su conversión algorítmica en emisiones y absorciones de GEI. La serie histórica (2000-2024) fue consolidada asegurando coherencia metodológica con el Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR) y el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI). Posteriormente, para la construcción de los escenarios futuros, se implementaron modelos matemáticos diferenciados: un Modelo de Decaimiento Logarítmico para capturar el agotamiento asintótico de la frontera agrícola en las proyecciones de deforestación, y un modelo de proyección logística vinculado a la demanda industrial para las plantaciones forestales. Asimismo, se incorporó una arquitectura mixta (Modelo INGEI + Modelo ICAT) que contabiliza de manera explícita las emisiones por extracción de biomasa al finalizar los turnos de rotación de las nuevas plantaciones.

Los resultados cuantitativos demuestran dinámicas estructurales significativas en el sector:

Regulación de Cambio de Uso (RCU): La trayectoria de decaimiento proyecta que las emisiones generadas por deforestación en la Región Oriental mantendrán una caída

progresiva, reduciéndose desde 11.899,74 *ktCO₂ eq* en el año base (2024) hasta estabilizarse en unas emisiones residuales de 4.621,38 *ktCO₂ eq* para el año 2040.

Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF): El modelo refleja un importante incremento en la capacidad de sumidero del país. Se proyecta que las nuevas tierras convertidas a plantaciones forestales (TNF-TF) impulsadas por la política alcancen una absorción neta de -24.200,12 *ktCO₂ eq* para el año 2040.

Balance Neto Sectorial Consolidado: Al integrar todas las dinámicas territoriales del país (emisiones inerciales, deforestación en el Chaco y aumento de sumideros), se estima que el sector forestal paraguayo alcanzará una captura neta consolidada de -46.484,68 *ktCO₂ eq* al final del periodo de proyección (2040).

3. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente documento técnico es establecer los escenarios de referencia (Línea de Base) y presentar las proyecciones de emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a las medidas de mitigación y políticas del sector forestal de Paraguay, coordinadas y/o implementadas por el Instituto Forestal Nacional (INFONA).

Objetivos específicos:

1. Validar la consistencia histórica: Presentar y consolidar la serie temporal de Datos de Actividad (DA) del periodo 2000-2024, asegurando su coherencia con el Capítulo 6: Sector UTCUTS del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), desarrollado por INFONA, y reportado en el Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR) de Paraguay en diciembre de 2024.
2. Proyectar el escenario de referencia (Línea de Base): Estimar la trayectoria inercial de los Datos de Actividad y las correspondientes emisiones y absorciones de GEI del sector forestal para el horizonte 2025-2040.
3. Proyectar escenarios de mitigación: Estimar las emisiones y absorciones futuras de GEI (horizonte 2025-2035/2040) para dos instrumentos de política clave, denominados para este proyecto:
 - **Regulación de Cambio de Uso (RCU) - Deforestación Cero:** Esta medida se sustenta en la aplicación de la Ley N° 6.676/2020 (que prorroga la vigencia de la Ley N° 2.524/04). Esta normativa prohíbe las actividades de transformación y

conversión de superficies con cobertura de bosques a superficies destinadas al aprovechamiento agropecuario o asentamientos humanos (para zonas no reguladas por un POUT) en la Región Oriental del país.

- **Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF) - Vuelo Forestal:** Esta medida se vincula principalmente a la Ley N° 4.890/2013 de Derecho Real de Superficie Forestal (conocida como Ley de Vuelo Forestal). Este instrumento jurídico crea un derecho real autónomo que permite separar la propiedad de la tierra de la propiedad de las plantaciones forestales. La ley otorga seguridad jurídica para atraer inversiones de capital (nacional o extranjero) en reforestación, permitiendo que un inversor sea dueño de los árboles sin necesidad de comprar la tierra.

Este informe busca proveer al INFONA, a través del Proyecto ICAT Paraguay y a las partes interesadas, de información cuantitativa para la toma de decisiones basadas en evidencia, permitiendo visualizar el potencial de mitigación del sector forestal frente a los compromisos nacionales e internacionales.

4. ESTIMACIONES HISTORICAS DE GEI 2000-2024

4.1. Panorama General del Sector Forestal

Este capítulo presenta las estimaciones históricas de las emisiones y absorciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector forestal de Paraguay para la serie temporal 2000-2024, las cuales han sido desarrolladas en coherencia con la metodología utilizada en el Capítulo 6: Sector UTCUTS del INGEI 1990-2021, realizada por INFONA y reportada por el MADES en el marco del Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR) de Paraguay. Estas estimaciones constituyen la base fundamental para la construcción de la línea de base y las proyecciones futuras de las medidas de mitigación del INFONA.

4.2. Alcance Sectorial

El análisis prospectivo y las estimaciones de GEI presentadas en este informe se circunscriben al sector Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS), siguiendo la estructura de reporte definida por las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y su Refinamiento de 2019.

Específicamente, el alcance cubre las emisiones y absorciones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a los cambios en las existencias de carbono en las categorías de uso de

la tierra vinculadas a la gestión forestal y al cambio de uso del suelo (deforestación y forestación).

4.2.1. Categorías de Uso de la Tierra Incluidas

De acuerdo con la clasificación del IPCC las categorías y subcategorías abordadas para las estimaciones de GEI son:

- Categoría 4.A: Tierras Forestales (Fuente y Sumidero):
 - 4.A.1 Tierras Forestales que permanecen como tales: Incluye la dinámica del carbono en bosques nativos y plantaciones forestales establecidas que han superado el periodo de transición de 20 años. Esta categoría es fundamental para proyectar la permanencia de los stocks de carbono bajo la política de conservación (RCU) y el crecimiento de biomasa en plantaciones maduras.
 - 4.A.2 Tierras convertidas en Tierras Forestales: Comprende las tierras de otros usos (principalmente cultivos o pastizales) que han sido convertidas a uso forestal mediante actividades de forestación y reforestación (plantaciones forestales). Esta subcategoría es el eje central para la proyección de la política de Incentivos Forestales (IPF).
- Categorías de Conversión de Tierras (Fuente de Emisión por Deforestación): Se incluyen las categorías que representan la conversión de tierras forestales a otros usos, lo cual constituye la principal fuente de emisiones del sector y el objetivo de la política de Regulación de Cambio de Uso (RCU). Las subcategorías proyectadas son:
 - 4.B.2: Tierras forestales convertidas en Tierras de Cultivo.
 - 4.C.2: Tierras forestales convertidas en Pastizales.
 - 4.D.2: Tierras forestales convertidas en Humedales (frecuentemente asociado a represas o cuerpos de agua artificiales).
 - 4.E.2: Tierras forestales convertidas en Asentamientos (urbanización e infraestructura).
 - 4.F.2: Tierras forestales convertidas en Otras Tierras.

4.2.2. Depósitos de Carbono Considerados

En coherencia con la metodología aplicada en el último INGEI reportado por Paraguay, las estimaciones y proyecciones consideran los cambios en las existencias de carbono de los siguientes depósitos:

1. Biomasa viva: Incluye tanto la biomasa aérea (fuste, ramas, hojas) como la biomasa subterránea (raíces vivas).

2. Materia Orgánica Muerta (MOM): Comprende la madera muerta y la hojarasca. Para las tierras que permanecen como tales (4.A.1), se asume un estado de equilibrio (Tier 1) para este depósito, salvo en las proyecciones de deforestación donde se contabiliza su oxidación inmediata.

3. Suelos: Se consideran las emisiones y absorciones de Carbono Orgánico del Suelo (COS) en suelos minerales, aplicando los periodos de transición de 20 años sugeridos por el IPCC para estabilizar los cambios de uso de la tierra.

4.2.3. Gases de Efecto Invernadero

Las estimaciones y proyecciones presentadas en este informe se han realizado en coherencia con los alcances metodológicos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), específicamente con el Capítulo 6 (Sector UTCUTS) reportado en el Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR) de Paraguay.

En consecuencia, el análisis se centra exclusivamente en la proyección de emisiones y absorciones netas de Dióxido de Carbono (CO_2). Las emisiones de gases distintos al CO_2 (como metano, CH_4 , y óxido nitroso, N_2O) provenientes de la quema de biomasa (incendios) no se incluyen en las proyecciones cuantitativas de este reporte. Esta exclusión responde a la alta incertidumbre y aleatoriedad de estos eventos para la modelización futura y mantiene la consistencia con los reportes históricos nacionales (NDC y 1BTR), donde se ha declarado que la disponibilidad de datos consistentes para toda la serie temporal constituye una limitante.

4.3. Marco Metodológico

4.3.1. Directrices y Enfoque General

Las estimaciones de emisiones y absorciones de GEI se han realizado siguiendo las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y su Refinamiento de 2019.

El método de cálculo principal utilizado es el Método de Ganancias y Pérdidas (Gain-Loss Method), basado en la Ecuación 2.4 de las directrices del IPCC. Este enfoque estima el cambio anual en las existencias de carbono (ΔC) como la diferencia entre las ganancias

anuales de carbono (ΔC_G), debidas al crecimiento de la biomasa, y las pérdidas anuales (ΔC_L), debidas a la extracción de madera, leña y perturbaciones (como la deforestación):

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

Complementariamente, para dinámicas específicas como la conversión de uso de la tierra (deforestación) y cambios en los depósitos de carbono en suelos, se aplica el Método de Diferencia de Existencias (Stock-Difference Method). Este método permite cuantificar el cambio neto comparando los inventarios de carbono en dos momentos distintos en el tiempo.

Esta combinación de métodos permite capturar tanto la dinámica de los flujos de carbono anuales en tierras que permanecen como tales, como los impactos directos de los cambios de uso de suelo, facilitando la integración de datos de actividad anualizados provenientes del monitoreo satelital.

4.3.2. Depósitos de Carbono y Niveles Metodológicos

La metodología aplica una combinación de niveles (Tiers) según la disponibilidad de datos nacionales y la significancia de la categoría, conforme a las buenas prácticas del IPCC (ver Tabla 1):

Tabla 1. Depósitos de carbono y niveles metodológicos.

Depósito de Carbono	Metodología en "Tierras que Permanecen" (4.A.1)	Metodología en "Tierras de Conversión" (Deforestación)	Fuente de Datos / Justificación
Biomasa Viva (Aérea y Subterránea)	Nivel 2 (Tier 2)	Nivel 2 (Tier 2)	Se utilizan datos específicos del país provenientes del Inventario Forestal Nacional (IFN 2015) y literatura relevante (Sato et al., 2015) para estimar el crecimiento y las existencias de carbono por tipo de bosque.
Materia Orgánica Muerta (Madera muerta y hojarasca)	Nivel 1 (Tier 1)	Nivel 1 / Nivel 2	En tierras que permanecen, se asume equilibrio (cambio neto = 0). En conversiones, se asume la oxidación



			instantánea de este depósito en el año de la conversión.
Suelos Minerales (Carbono Orgánico del Suelo - COS)	Nivel 1 (Tier 1)	Nivel 1 (Tier 1)	Se asume equilibrio para tierras que permanecen. Para cambios de uso, se aplica una metodología de transición lineal a lo largo de 20 años, utilizando factores de referencia por defecto del IPCC.

Fuente: Elaboración propia con base en el Capítulo 6: Sector UTCUTS del DIN 2024 de Paraguay.

4.3.3. Tratamiento de las Transiciones de Uso de la Tierra para asegurar la consistencia temporal.

- Deforestación (Pérdida): Se asume que la pérdida de biomasa y materia orgánica muerta ocurre íntegramente en el año del evento de cambio de uso.
- Suelos: Las emisiones o absorciones del suelo mineral se contabilizan durante un periodo de transición de 20 años posteriores al cambio de uso, conforme a la metodología por defecto del IPCC.
- Forestación (Ganancia): Las tierras convertidas a tierras forestales (plantaciones) permanecen en la categoría de transición durante el ciclo de cultivo o hasta alcanzar la estabilidad (20 años por defecto), momento en el cual pasan a la categoría de "Tierras Forestales que permanecen como tales".

4.3.4. Análisis de la Serie Temporal Histórica (2000-2024)

La construcción de escenarios prospectivos requiere una base histórica robusta y consistente. Para este informe, se ha consolidado una serie temporal que abarca el periodo 2000-2024, integrando los datos oficiales y las actualizaciones más recientes del Sistema Nacional de Monitoreo forestal.

4.3.4.1. Reconstrucción y Ajuste de la Serie Temporal Histórica

Para garantizar la coherencia técnica en la modelación prospectiva y la evaluación precisa de las medidas de mitigación abordadas en el marco del proyecto, fue necesario

reconstruir y ajustar la serie temporal histórica de usos y cambios de uso de la tierra, en lugar de utilizar directamente la información agregada y reportada previamente en el INGEI de Paraguay.

Este proceso de reconstrucción se estructuró bajo un enfoque espacialmente explícito, alineado con las Directrices del IPCC, y se fundamenta en las siguientes necesidades metodológicas:

1. **Desagregación Geográfica y Estratificación Forestal (alcance de las políticas):** La evaluación del impacto de la política, específicamente la Regulación de Cambio de Uso (RCU) o "Ley de Deforestación Cero", exige aislar las dinámicas de pérdida de carbono a un nivel espacial delimitado. El INGEI contabiliza las emisiones a nivel nacional; sin embargo, la jurisdicción y el alcance de cumplimiento de la política RCU se circunscriben exclusivamente a la Región Oriental.

Se aplicó una desagregación por región (Oriental y Occidental) y por estrato forestal. Esta división es un requisito necesario debido a que ecosistemas como el Bosque Subhúmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP) presentan una distribución transversal en ambas regiones. Sin esta separación espacial de los Datos de Actividad (DA), el modelo habría sobreestimado las emisiones de referencia al no poder discriminar regionalmente la deforestación evitada.

2. **Mejora de las Estimaciones de GEI para la Serie Histórica (2000 - 2021):** La consolidación de la línea base histórica para este periodo se optimizó mediante un ajuste sobre los datos base del INGEI:

- a. **Clasificación de Plantaciones Forestales:** Se incorporó una mejora en la caracterización de las tierras convertidas en plantaciones forestales, distribuyendo las superficies según su finalidad productiva (fines energéticos vs. fines maderables), utilizando como base oficial el Reporte de Perfil y Perspectivas del Sector Forestal Paraguayo del INFONA 2025. Esta desagregación es un prerrequisito para aplicar correctamente modelos de Nivel 2 (Tier 2), ya que permite la asignación específica de tasas de Incremento Medio Anual (IMA), factores de expansión de la biomasa y la modelación de los ciclos de cosecha o turnos de rotación (7 años para uso energético y 11 años para uso maderable).

3. **Extensión y Consistencia Temporal para el Periodo Reciente (2022 - 2024):** Con el objetivo de proyectar escenarios basados en las tendencias más recientes y capturar los efectos de corto plazo en el sector forestal, la serie temporal no solo fue reconstruida, sino también extendida bajo los siguientes lineamientos:

- a. **Incorporación de Nuevos Datos de Actividad:** Se integraron las superficies anualizadas de cambio de cobertura forestal derivadas de las recientes

cartografías del Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF), cubriendo el flujo de actividad física de los años 2022 a 2024 (periodo no cubierto por el INGEI actual).

- b. **Consistencia Metodológica:** A estos nuevos DA se les aplicó el mismo marco de tratamiento de la serie 2000-2021 para asegurar la coherencia temporal. Esto implica que las nuevas áreas detectadas fueron sometidas a la desagregación geográfica por región y a la estratificación funcional, garantizando una línea base continua y comparable.

4.3.4.2. Datos de Actividad (DA): Representación de la Tierra

La representación de la tierra se ha realizado siguiendo el Método 3 del IPCC, el cual se caracteriza por ser espacialmente explícito. Esto permite no solo cuantificar el cambio neto de superficies, sino rastrear las transiciones específicas entre categorías de uso de la tierra (ej. de Tierras Forestales a Pastizales) con una identificación geográfica precisa.

- Fuente de Datos: Los Datos de Actividad provienen de la serie histórica de mapas de cobertura forestal y cambio de uso de la tierra generados por el Instituto Forestal Nacional (INFONA). Esta serie garantiza la coherencia temporal necesaria para la modelización de tendencias (ver Tabla 2).

Tabla 2. Serie temporal en hectáreas de categorías de uso de la tierra.

Año	TF	PF	TC	P	A	H	OT
2000	24.632.771	16.640	8.168.777	6.496.425	228.333	409.404	24.930
2001	24.370.758	17.405	8.291.026	6.627.865	235.021	410.274	24.930
2002	24.108.745	18.171	8.413.275	6.759.305	241.709	411.144	24.930
2003	23.846.732	18.937	8.535.525	6.890.745	248.396	412.015	24.930
2004	23.584.719	19.702	8.657.774	7.022.186	255.084	412.885	24.930
2005	23.322.707	20.468	8.780.023	7.153.626	261.771	413.755	24.930
2006	22.945.357	21.967	8.834.834	7.452.999	275.244	421.411	25.467
2007	22.568.008	23.466	8.889.646	7.752.373	288.717	429.067	26.004
2008	22.190.659	24.964	8.944.457	8.051.746	302.190	436.723	26.541
2009	21.813.310	26.463	8.999.268	8.351.119	315.663	444.379	27.078
2010	21.435.961	27.962	9.054.079	8.650.493	329.136	452.034	27.615
2010	21.435.961	27.962	9.054.079	8.650.493	329.136	452.034	27.615
2012	20.349.617	53.309	9.147.981	9.620.240	343.375	465.542	27.224
2013	19.640.621	77.158	9.187.071	10.290.613	344.141	471.394	26.296
2014	19.284.491	78.962	9.240.346	10.583.399	350.091	471.394	28.613
2015	18.928.360	80.766	9.293.621	10.876.184	356.041	471.394	30.929
2016	18.695.190	100.946	9.330.167	11.040.534	351.047	502.667	38.814
2017	18.462.020	121.126	9.366.713	11.204.883	346.053	533.941	46.699
2018	18.216.241	128.366	9.396.064	11.406.164	349.420	533.941	51.241

2019	17.970.461	135.605	9.425.415	11.607.446	352.786	533.941	55.783
2020	17.966.695	181.341	9.498.044	11.460.431	351.536	493.665	40.487
2021	17.774.287	181.341	9.547.579	11.599.439	355.398	493.665	40.489
2022	17.523.028	207.730	9.579.718	11.785.287	361.496	495.340	41.180
2023	17.640.338	322.567	5.249.987	15.437.788	618.053	662.552	60.882
2024	17.437.042	352.418	5.323.083	15.531.790	624.552	662.552	60.730

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

Nota: A: Asentamientos, H: Humedales, OT: Otras Tierras, Pastizales: Pastizales, PF: Plantaciones Forestales, TC: Tierras de Cultivos, TF: Tierras Forestales.

- **Construcción de la Serie Temporal:** La serie se compone de una secuencia de mapas que cubren distintos periodos, lo que ha requerido un proceso de anualización para los modelos de proyección:
 - **Periodos Multianuales (Datos históricos):** Mapas de cambios correspondientes a los periodos 2000-2005, 2005-2011, 2011-2013, 2013-2015, 2015-2017 y 2017-2019. Para estos intervalos, se aplicó una tasa de cambio anualizada distribuida uniformemente para imputar los años intermedios.
 - **Periodo Reciente (Datos anuales):** A partir del año 2019, se incorporan datos con resolución anual (2019-2020, 2020-2021, hasta 2024), provenientes de los reportes más recientes del INFONA (Reporte "Nuestros Bosques" y actualizaciones del SNMF), lo que permite captar con mayor sensibilidad la dinámica actual de la deforestación y la expansión de plantaciones.

El gráfico 1 muestra los usos de la tierra del sector forestal para el año 2024. Para este análisis se consideran tierras forestales al bosque nativo, plantaciones forestales y el estrato palmar. En su conjunto la sumatoria de estas tierras cubren una superficie total de 17.789.460 ha., lo que representa 44,5% de la superficie nacional (sobre una base referencial de 39.992.166 ha.).

4.3.4.3. Serie Temporal de conversión de Tierras Forestales (2000-2024)

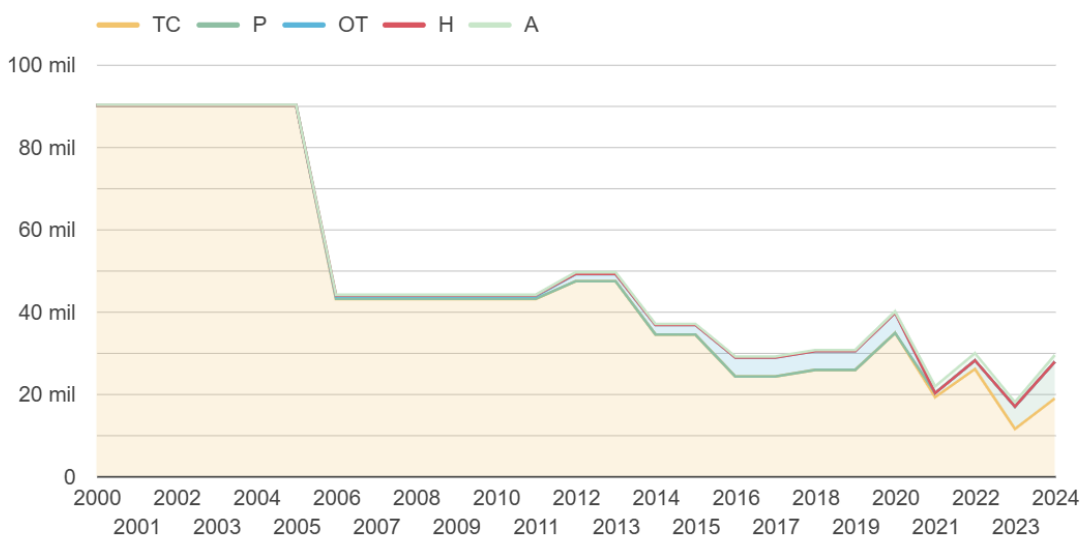
La cuantificación de los Datos de Actividad (DA) se fundamenta en la identificación espacialmente explícita de las transiciones desde la categoría Tierras Forestales hacia otros usos del suelo. La serie temporal presentada en la Tabla 3 detalla la superficie anual (en hectáreas) afectada por el cambio de uso de la tierra, desglosada por las categorías de destino final según las directrices del IPCC: Tierras de Cultivo, Pastizales, Asentamientos, Humedales y Otras Tierras.

Esta matriz de cambio se construyó integrando la serie histórica de mapas de cobertura y cambio de uso de la tierra generados por el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal del

INFONA. Para los periodos históricos cubiertos por mapas multianuales (e.g., 2000-2005, 2011-2015), los valores presentados corresponden a tasas anualizadas promedio distribuidas uniformemente. A partir del año 2019, la incorporación de datos anuales directos de los reportes nacionales permite capturar con mayor precisión las fluctuaciones interanuales de la deforestación.

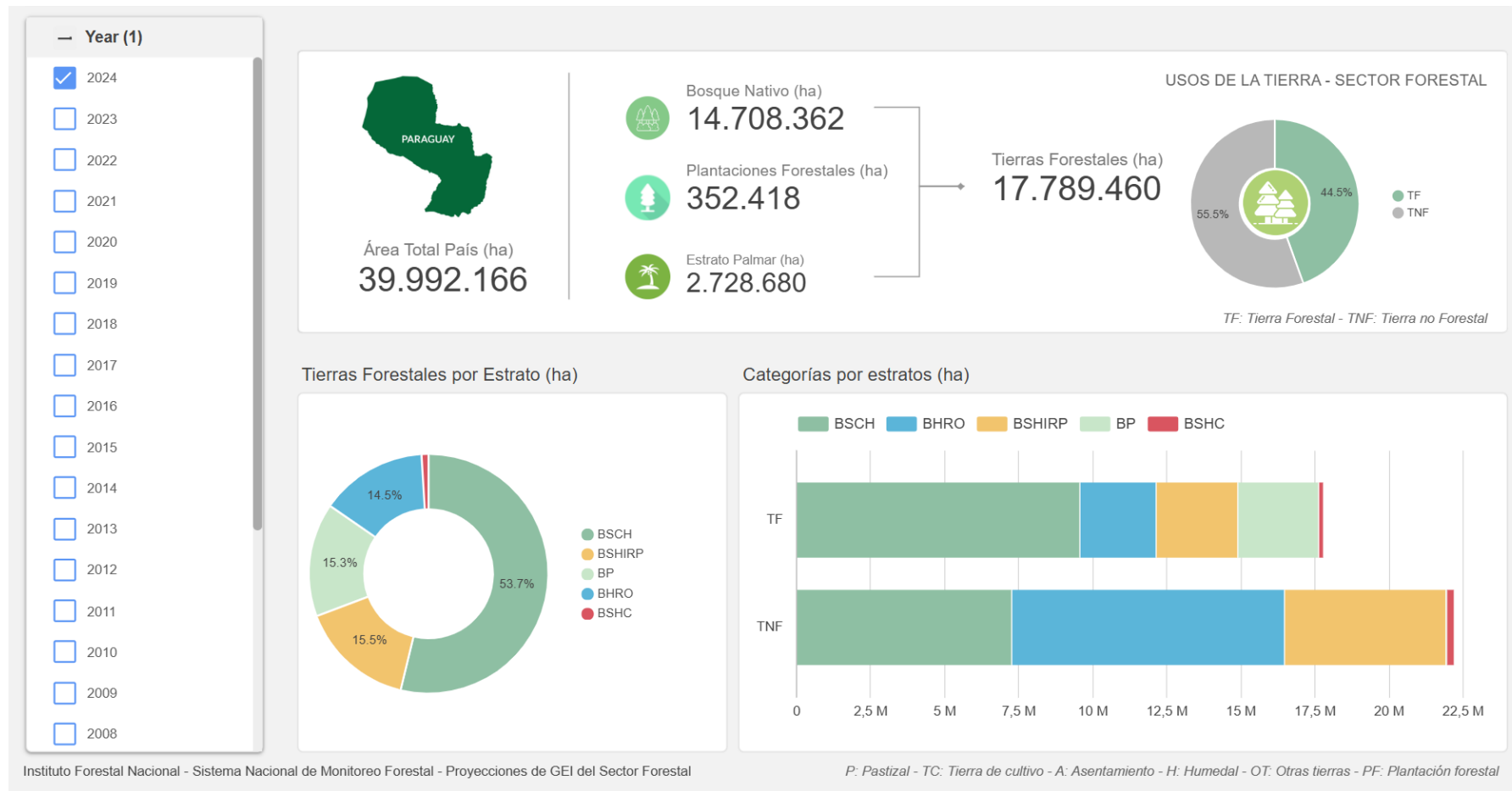
El gráfico 2 y tabla 3 resumen la evolución anual de estas superficies, constituyendo la base cuantitativa para la estimación de las emisiones por deforestación.

Gráfico 1. Serie temporal en hectáreas de cambios desde tierras forestales a otras categorías de uso de la tierra - Región Oriental.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

Gráfico 2. Usos de la tierra en el sector forestal para el año 2024.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

Tabla 3. Serie temporal en hectáreas de cambios desde tierras forestales a otras categorías de uso de la tierra - Región Oriental.

Año	TC	P	A	H	OT	Área total (ha)
2000	89.995	21	159	0	0	90.176
2001	89.995	21	159	0	0	90.176
2002	89.995	21	159	0	0	90.176
2003	89.995	21	159	0	0	90.176
2004	89.995	21	159	0	0	90.176
2005	89.995	21	159	0	0	90.176
2006	42.957	101	112	299	537	44.007
2007	42.957	101	112	299	537	44.007
2008	42.957	101	112	299	537	44.007
2009	42.957	101	112	299	537	44.007
2010	42.957	101	112	299	537	44.007
2011	42.957	101	112	299	537	44.007
2012	47.328	0	405	51	1.705	49.489
2013	47.328	0	405	51	1.705	49.489
2014	34.357	0	272	0	2.311	36.940
2015	34.357	0	272	0	2.311	36.940
2016	24.180	0	273	0	4.571	29.024
2017	24.180	0	273	0	4.571	29.024
2018	25.760	0	244	0	4.595	30.599
2019	25.760	0	244	0	4.595	30.599
2020	34.732	0	310	0	4.918	39.960
2021	18.898	992	1.627	0	0	21.517
2022	25.134	2.100	1.749	0	0	28.983
2023	10.506	5.183	997	0	0	16.685
2024	16.884	8.525	1.543	0	0	26.951

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

Nota: A: Asentamientos, H: Humedales, OT: Otras Tierras, Pastizales: Pastizales, PF: Plantaciones Forestales, TC: Tierras de Cultivos, TF: Tierras Forestales.

4.3.4.4. Serie Temporal de conversión a Plantaciones Forestales (2000-2024)

Los Datos de Actividad (DA) correspondientes a Plantaciones Forestales presentan desagregada la superficie por finalidad productiva (ver Tabla 4), siguiendo con la metodología aplicada en el INGEI 1990-2021.

Dado que los Datos de Actividad (DA) provienen de productos espacialmente explícitos (mapas satelitales del SNMF), la cuantificación de las nuevas plantaciones forestales anuales se realizó mediante un análisis de diferenciación temporal. Para obtener la superficie exclusiva incorporada en cada año t , se sustrajo el valor acumulado del año anterior ($t-1$) al valor medido en el año actual. Este procedimiento permite aislar el flujo anual de nuevas áreas forestales, asegurando que la contabilidad refleje el incremento neto físico observado por teledetección, el cual ofrece una mayor precisión sobre la realidad territorial nacional en comparación con los registros puramente administrativos.

Debido a que los sensores remotos identifican la cobertura Plantación Forestal pero no distinguen intrínsecamente su uso final (energético vs. maderable), se aplicó un método de distribución proporcional basado en datos históricos. Se utilizaron los porcentajes de participación por finalidad (fines energéticos, maderables u otros) derivados de los datos tabulares del Registro Nacional de Plantaciones, consistentes con la serie utilizada en el INGEI del 1BTR. Estos coeficientes se aplicaron a las superficies anualizadas obtenidas de los mapas, permitiendo desagregar el dato espacial en las subcategorías necesarias para el cálculo de carbono.

Al analizar la composición de las superficies, se evidencia una predominancia histórica de las plantaciones con fines energéticos, las cuales representan la mayor proporción del área total plantada durante el periodo observado. Esta tendencia responde a la demanda de biomasa para secado de granos y procesos industriales en el país. En contraste, las plantaciones con fines maderables (exóticas y nativas) muestran una participación menor, aunque estratégica para el almacenamiento de carbono a largo plazo en productos de madera sólida.

Es importante notar que, aunque la tabla distingue por finalidad, para efectos del cálculo de emisiones y absorciones bajo el Nivel 2 del IPCC, se asume que la especie predominante en las categorías de "fines energéticos" y "maderables exóticas" corresponde a *Eucalyptus spp.*, aplicándose los parámetros de densidad de madera y fracción de carbono correspondientes a esta especie, conforme a los supuestos utilizados en el 1BTR de Paraguay.

Sobre los valores anualizados y estratificados, se aplicaron los supuestos de ciclos de corta definidos en el INGEI, Documento de Inventario Nacional (DIN 2024):

- Fines Energéticos: Se aplica un turno de rotación de 7 años.
- Fines Maderables: Se aplica un turno de rotación de 11 años.

Es importante destacar que, como mejora metodológica en relación con el tratamiento de datos del INGEI actual, la herramienta de cálculo desarrollada opera bajo una arquitectura mixta (Modelo INGEI + Modelo ICAT). Esto permite resolver vacíos en la contabilidad de emisiones por cosecha y asegurar el seguimiento continuo de todos los depósitos de carbono. Esta arquitectura se divide de la siguiente manera:

1. Tratamiento INGEI (Aplicado a la serie histórica y su inercia al 2040): Para las plantaciones establecidas históricamente, el modelo replica y proyecta la metodología oficial del INGEI con las siguientes particularidades:

Cálculo de Biomasa: Se mantuvo el tratamiento actual del INGEI, el cual no contabiliza la superficie de la plantación en el año de finalización del turno de rotación (año 7 o 11, según su finalidad) para evitar la sobreestimación de los sumideros. Este método se proyectó hasta el 2040. Para aislar el efecto exclusivo de las nuevas políticas, las superficies de las nuevas plantaciones desde el año 2025 en adelante llevaron el valor cero (0) en esta matriz específica de cálculo de biomasa.

Cálculo de Suelos Minerales y Materia Orgánica Muerta (MOM): Para corregir las discontinuidades del tratamiento INGEI sobre estos depósitos, se generó una nueva tabla de cálculo continuo. Siguiendo las directrices metodológicas, en esta nueva matriz se cuantificaron todas las superficies sin omitir los valores de área en los años 7 y 11. Esto garantiza que la dinámica de carbono en el suelo y la hojarasca/madera muerta no sufra caídas o interrupciones durante el evento de cosecha, respetando el ciclo real de estos depósitos.

2. Tratamiento ICAT (Aplicado a las proyecciones de nuevas plantaciones desde 2025): Como una mejora para modelar las medidas de mitigación (política IPF), el tratamiento ICAT supera la limitante de solo no contabilizar los sumideros durante la corta. Actualmente, el modelo ICAT contabiliza de manera explícita las emisiones de CO₂ generadas por la extracción de madera. En el año de la cosecha, el algoritmo calcula la pérdida asumiendo la extracción total de la biomasa acumulada durante los 7 u 11 años de crecimiento. Tras este evento de emisión, se asume que la superficie se replanta inmediatamente, volviendo a ingresar al ciclo de absorción al año siguiente.

Finalmente, la estimación proyectada total para la categoría de Tierras Convertidas a Tierras Forestales (TNF-TF) se obtiene mediante la consolidación de ambos tratamientos. Este cambio metodológico aporta una mejora en la estimación GEI, ya que no solo corrige el seguimiento ininterrumpido de los suelos y la materia orgánica muerta, sino que transparenta y cuantifica el volumen real de emisiones asociadas a las cosechas forestales en los escenarios futuros.

Tabla 4. Serie temporal en hectáreas de plantaciones forestales según su finalidad.

Año	Con fines energéticos	Con fines maderables exóticas	Con fines maderables nativas	Con otros fines	Total (ha)
2000	79.515	4.330	980	18.319	103.144
2001	80.133	4.330	980	18.319	103.762
2002	78.799	4.330	980	18.319	102.428
2003	77.805	4.330	980	18.335	101.450
2004	65.471	4.330	1.182	18.335	89.318
2005	41.846	4.331	1.182	18.335	65.694
2006	82.637	4.331	1.182	18.335	106.485

2007	69.540	3.120	1.182	18.335	92.178
2008	84.006	3.493	1.245	18.393	107.137
2009	84.732	2.772	1.513	18.426	107.442
2010	83.043	3.979	1.513	18.958	107.493
2011	82.021	4.499	1.513	18.962	106.994
2012	93.024	5.477	1.513	18.962	118.976
2013	89.111	5.477	7.352	18.962	120.901
2014	130.902	6.131	7.352	18.962	163.346
2015	114.948	6.131	9.005	18.962	149.046
2016	125.141	4.920	9.005	18.326	157.392
2017	110.993	18.900	8.505	6.045	144.443
2018	72.428	18.138	8.025	3.512	102.104
2019	47.227	17.538	8.025	2.982	75.773
2020	83.070	19.038	12.057	642	114.808
2021	102.522	18.789	12.057	642	134.011
2022	127.843	18.995	12.057	642	159.538
2023	241.218	18.182	12.057	626	272.084
2024	267.980	19.038	11.855	626	299.499

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

4.3.5. Factores de Emisión (FE): Parámetros y Estratificación

Para la estimación de las emisiones y absorciones históricas, se aplicaron Factores de Emisión (FE) consistentes con el Nivel 2 (Tier 2) del IPCC para los depósitos de biomasa, utilizando parámetros específicos de país derivados principalmente del Inventario Forestal Nacional (IFN 2015).

- **Estratificación Forestal**

Los FE se aplicaron diferenciando los siguientes estratos para reducir la incertidumbre y reflejar la heterogeneidad de los ecosistemas nacionales:

- Bosque Húmedo de la Región Oriental (BHRO).
- Bosque Seco Chaqueño (BSCH).
- Bosque Subhúmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP).
- Bosque Subhúmedo del Cerrado (BSHC).
- Estrato Palmar.

- **Plantaciones Forestales**

Se utilizan los valores de Incremento Medio Anual (IMA) reportados en el INGEI 1990-2021, Documento de Inventario Nacional (DIN 2024), los cuales integran las tasas de crecimiento promedio observadas para *Eucalyptus spp.* en diferentes periodos. Cabe aclarar que de manera análoga al tratamiento metodológico aplicado en el INGEI actual,

que desagrega las plantaciones por finalidad (fines energéticos con turno de 7 años y fines maderables con turno de 11 años) para la estimación histórica de absorciones, el presente ejercicio de proyección mantiene la desagregación de las plantaciones forestales según su finalidad productiva. En consecuencia, a las nuevas superficies proyectadas se les aplica la misma diferenciación en los ciclos de corta y los correspondientes factores de emisión. Esta alineación garantiza la consistencia contable y metodológica entre la serie temporal inventariada y la proyección de los escenarios futuros.

- **Depósitos de Carbono**

Biomasa (Aérea y Subterránea): se adoptan los valores reportados en el Documento de Inventario Nacional (DIN 2024), los cuales fueron calculados con datos del IFN 2015 y ecuaciones alométricas locales (Sato et al., 2015).

Materia Orgánica Muerta y Suelos: Para la deforestación, se contabiliza la pérdida de carbono de estos depósitos. Específicamente para el Carbono Orgánico del Suelo (COS), se aplica una metodología de transición lineal de 20 años para las emisiones residuales post-conversión, conforme a las directrices del IPCC.

En la tabla 5 se detallan los parámetros aplicados para los bosques nativos (utilizados para calcular emisiones por deforestación en la política RCU) y para las plantaciones forestales (utilizados para calcular absorciones en la política IPF).

Tabla 5. Parámetros para Bosques Nativos (RCU)

Estrato Forestal	Densidad Básica de la Madera (D) [t m ⁻³]	Relación Raíz/Tallo (R) [-]	Cont. de Carbono Biomasa Total (B _{ANTES}) [tC ha ⁻¹]	Contenido de Carbono Suelo (COS _{REF}) [tC ha ⁻¹]
Bosque Húmedo Región Oriental (BHRO)	0,58	0,16	60,4	33,5
Bosque Seco Chaqueño (BSCH)	0,68	0,28	38,62	21,9

Bosque Subhúmedo Inundable (BSHIRP)	0,63	0,41	71,79	40,2
Bosque Subhúmedo del Cerrado (BSHC)	0,58	0,16	65,14	11,9
Estrato Palmar	0,63	0,41	18,01	40,2

Fuente: Elaboración propia con base en el Capítulo 6: Sector UTCUTS del DIN 2024 de Paraguay.

Nota: El valor de B_{ANTES} incluye biomasa aérea y subterránea. La Fracción de Carbono (FC) utilizada es 0,47.

Tabla 6. Parámetros para Plantaciones Forestales (IPF)

Parámetro	Valor Aplicado	Unidad	Fuente / Observación
Incremento Anual (IMA) Medio	25	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	DIN 2024 (Plantaciones 1990-2015).
Incremento Anual (IMA) Medio	28,5	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	DIN 2024 (Plantaciones 2016-2017).
Incremento Anual (IMA) Medio	30,0	$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	DIN 2024 (Plantaciones 2018-2024).
Densidad Básica de la Madera	0,51	t m^{-3}	Valor para Eucalyptus spp.
Factor de Expansión de Biomasa (BEF)	1,50 (Nativo) / 2,10 (Plantación)	Adim.	Factor de expansión aplicado al volumen comercial.

Relación (R)	Raíz/Tallo	0,28 (Oriental) / 0,33 (Occidental)	Adim.	Promedio ponderado país.
Fracción de Carbono (CF)		0,47	tC / t d.m.	Valor por defecto IPCC (2006).

Fuente: Elaboración propia con base en el Capítulo 6: Sector UTCUTS del DIN 2024 de Paraguay.

Para la caracterización de las nuevas superficies identificadas como "Plantaciones Forestales" en los mapas satelitales, se ha asumido la predominancia del género *Eucalyptus spp.* para la selección de los parámetros de crecimiento y factores de expansión. Esta decisión metodológica se sustenta en el criterio de experto proporcionado por el área técnica del INFONA, validado a través de consultas directas con la Dirección General de Oficinas Regionales y la Dirección General de Manejo de Recursos Forestales.

Dichas dependencias, encargadas de los registros operativos y el control en campo, confirman que la mayoría de las inversiones recientes y los movimientos de productos forestales (guías de traslado) corresponden a *Eucalyptus*, validando su uso como representativo para la estimación de absorciones, en coherencia con los supuestos utilizados en el 1BTR.

4.3.6. Estimación de Emisiones y Absorciones

Para la cuantificación de las emisiones y absorciones de GEI, tanto para la serie histórica como para los escenarios prospectivos, se ha desarrollado un motor de cálculo algorítmico que integra los Datos de Actividad (DA) con los Factores de Emisión (FE). El procesamiento se realiza siguiendo las metodologías de las Directrices del IPCC de 2006 y su Refinamiento de 2019, aplicando el Método de Ganancias y Pérdidas y el Método de Diferencia de Existencias según la dinámica analizada.

4.3.6.1. Absorciones por crecimiento de biomasa en Tierras Forestales (4.A.1 y 4.A.2)

- **Tierras Forestales que Permanecen como Tales (4.A.1):** El modelo cuantifica el cambio anual en las existencias de carbono mediante la ecuación de balance neto ($\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$). Para las ganancias de biomasa (ΔC_G), el algoritmo procesa

la superficie multiplicando el incremento medio anual (I_v), el factor de expansión de biomasa (BEF), la densidad de la madera (D), la relación raíz/tallo (R) y la fracción de carbono (CF) correspondientes a cada estrato forestal. Para las pérdidas de biomasa (ΔC_L), se cuantifica el volumen extraído por cosecha de madera (rollizos) y recolección de leña comercial. En esta categoría, se asume un estado de equilibrio metodológico (cambio neto igual a cero) para los depósitos de suelos minerales y Materia Orgánica Muerta (MOM).

- **Tierras convertidas a Tierras Forestales (4.A.2 - Enfoque IPF):** Para modelar las absorciones derivadas de la política de Incentivos a Plantaciones Forestales, el sistema aísla el flujo anual de nuevas superficies forestadas. Se aplica un enfoque de Nivel 2 (Tier 2) para la biomasa viva y Nivel 1 (Tier 1) para suelos y MOM, asumiendo un periodo de transición de 20 años. El algoritmo incorpora explícitamente el ciclo de corta de las plantaciones de forma integral, diferenciando temporalmente las cosechas con fines energéticos o de celulosa (turnos de 7 años) frente a las de fines maderables (turnos de 11 años). Esto asegura que el sistema procese simultáneamente las ganancias por crecimiento y las emisiones directas por extracción en el año de la cosecha.

4.3.6.2. Emisiones por conversión de Tierras Forestales (Deforestación - Enfoque RCU)

Este bloque estima las emisiones generadas por la deforestación de bosques nativos, evaluando la pérdida de carbono en la biomasa, la MOM y los suelos minerales.

- **Deforestación hacia Tierras de Cultivo (4.B.2), Asentamientos (4.E.2), Humedales (4.D.2) y Otras Tierras (4.F.2):** El cálculo asume la oxidación instantánea de toda la biomasa aérea y subterránea existente antes de la conversión (B_{ANTES}), así como de la madera muerta y hojarasca. Para el Carbono Orgánico del Suelo (COS), el sistema aplica una ecuación de diferencia de existencias calculando la variación entre el uso anterior (bosque) y el nuevo uso. Se utiliza una amortización temporal lineal de 20 años sobre los factores dinámicos de uso de la tierra (F_{LU}), gestión (F_{MG}) y entrada de materia orgánica (F_I).
- **Deforestación hacia Pastizales (4.C.2):** En este caso, el algoritmo no asume la pérdida total de la biomasa de manera permanente, sino que integra un valor de biomasa post-conversión. El sistema descuenta de las emisiones brutas la capacidad intrínseca de los pastizales para retener una fracción de carbono, aplicando valores por defecto del IPCC y diferenciados por estratos forestales

según clasificación de INFONA (por ejemplo, 4.1 tC/ha retenidas en el Bosque Seco Chaqueño).

4.3.6.3. Consolidación y Conversión a Gases de Efecto Invernadero

Una vez calculados los vectores de cambio anual de existencias de carbono (ΔC) en toneladas para todos los depósitos, el sistema unifica los balances. La transformación a emisiones y absorciones de GEI se realiza multiplicando los totales por el factor estequiométrico ($-44/12$) y por 0.001. Bajo la regla contable de la convención, los valores resultantes negativos representan sumideros o absorciones netas de la atmósfera (como el crecimiento de plantaciones), mientras que los valores positivos cuantifican las emisiones hacia la atmósfera derivadas de la deforestación y las extracciones. Los resultados finales se expresan en kilotoneladas de CO_2 equivalente (*ktCO₂ eq*).

5. METODOLOGÍA DE PROYECCIÓN DE DATOS DE ACTIVIDAD

Para la construcción de los escenarios prospectivos (2025-2040), se ha diseñado una arquitectura metodológica que abandona los enfoques de proyección agregada simple, transitando hacia una modelación segmentada. En consecuencia, la modelación de los Datos de Actividad (DA) se ha estructurado en cuatro componentes de análisis sectorial, aplicando a cada uno el rigor estadístico adecuado para su contexto:

1. Dinámica de Deforestación en la Región Oriental (Marco de Regulación de Cambio de Uso - RCU).
2. Dinámica de Deforestación en la Región Occidental (Frontera Agrícola Activa).
3. Extracción de Productos Forestales (Rollizos y Madera para Energía).
4. Expansión de Plantaciones Forestales (Marco de Incentivos a Plantaciones Forestales - IPF).

A continuación, se detalla la fundamentación matemática y conceptual de los modelos seleccionados para cada componente.

5.1. Componente 1: Dinámica de Deforestación en la Región Oriental (RCU)

La proyección del cambio de uso de la tierra en la Región Oriental requirió un análisis preliminar de causalidad para determinar si la deforestación futura debía anclarse a variables macroeconómicas o a tendencias inerciales.

5.1.1. Evaluación de Drivers y Desacople Estructural

Se evaluó estadísticamente el comportamiento de los principales *drivers* económicos (PIB Agrícola, Exportaciones de Soja y Exportaciones de Carne) frente a la tasa de deforestación para el periodo 2012-2024. El análisis en niveles (series crudas) mostró una fuerte correlación inversa espuria, originada porque los indicadores económicos mantienen una tendencia al alza, mientras que la deforestación ha descendido por la aplicación de la Ley de Deforestación Cero.

Para aislar la verdadera causalidad, se aplicó un análisis de diferencias con un rezago temporal de un año, buscando probar si los *shocks* económicos de un periodo explican la habilitación de tierras en el siguiente. Los resultados demostraron una nula capacidad explicativa de los factores macroeconómicos sobre el desmonte, arrojando coeficientes de correlación (ρ) de 0.15 para la soja y -0.24 para el PIB Agrícola. Este hallazgo confirma un desacople estructural: el sector productivo en la Región Oriental ha madurado y su crecimiento actual se sustenta en la intensificación y el uso de tierras previamente convertidas, mientras que la deforestación remanente obedece a dinámicas residuales, de pequeña escala (validada por los mapas de INFONA, Reportes Nuestros Bosques 2022) o ilícitas que no responden elásticamente a los incentivos de los mercados internacionales de commodities. Con base en esta evidencia, para este análisis se descartó el uso de modelos econométricos para esta región, optando por una modelación de tendencia inercial ajustada.

5.1.2. Agrupación Funcional de Variables

Para alinear el modelo matemático con la realidad operativa de la normativa, las transiciones de uso de la tierra se dividieron en dos dinámicas con comportamientos diferenciados:

- **Variable Restringida (Productiva/Natural):** Agrupa las conversiones hacia Tierras de Cultivo (TC), Pastizales (P), Humedales (H) y Otras Tierras (OT). Esta agrupación absorbe los errores de clasificación espectral entre categorías y captura la presión total sobre el ecosistema restringido por la Ley de Deforestación Cero.
- **Variable Asentamientos (Demográfica):** Aísla las conversiones hacia Asentamientos (A), dado que esta dinámica responde al crecimiento poblacional y urbanístico, estando amparada normativamente mediante Planes de Ordenamiento Urbano y Territorial (POUT).

5.1.3. Selección y Ajuste de Modelos Prospectivos

Se evaluaron múltiples trayectorias para la *Variable Restringida* (ver gráfico 4). Un modelo inercial basado en promedios móviles fue descartado por proyectar una línea plana que no captura la reducción progresiva y el agotamiento del bosque remanente accesible. En su lugar, se seleccionó un Modelo de Decaimiento Logarítmico mediante una regresión log-lineal, cuya naturaleza asintótica refleja que la reducción de las últimas hectáreas de deforestación es marginalmente más compleja.

Para aislar la tendencia estructural de las anomalías exógenas, se refinó el modelo mediante la exclusión de años atípicos (outliers): 2020 (picos de incendios), 2021 (logística post-pandemia) y 2023 (latencia operativa por sequía extrema). Este ajuste sobre los datos válidos incrementó la bondad de ajuste del modelo, alcanzando un $R_2=0.74$.

Por el contrario, para la *Variable Asentamientos (A)*, se implementó un modelo inercial de Promedio Móvil basado en el último quinquenio completo (2020-2024), fijando una tasa constante de 1.245 hectáreas anuales. En este caso no se excluyeron los años atípicos, dado que la presión demográfica y periurbana mantiene una inercia constante e independiente de los choques climáticos que afectan al sector agropecuario.

5.2. Componente 2: Dinámica de Deforestación en la Región Occidental (Frontera Agrícola Activa)

La modelación de la Región Occidental requirió un tratamiento estadístico diferenciado, dado que en el Chaco Paraguayo la frontera agropecuaria se mantiene activa y presenta un comportamiento histórico complejo que no se ajusta a una simple tendencia lineal.

La proyección de la dinámica de deforestación en la Región Occidental forma parte del Escenario de Referencia (Línea Base). Esto obedece a que la política de mitigación evaluada (Regulación de Cambio de Uso o Ley de Deforestación Cero) tiene jurisdicción de cumplimiento exclusiva sobre la Región Oriental.

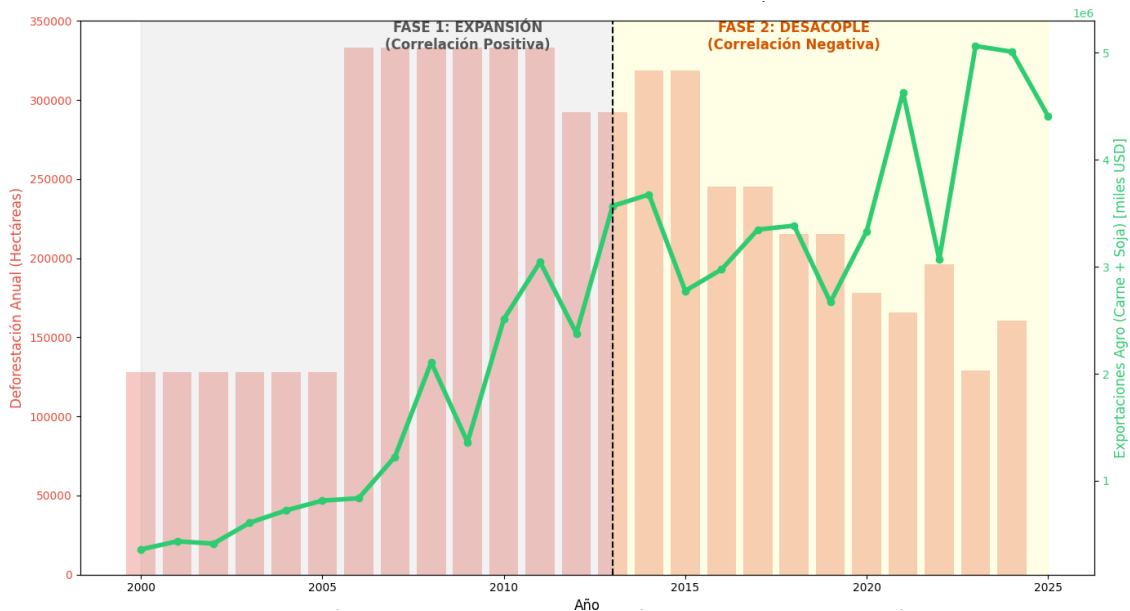
5.2.1. Análisis de la Serie Histórica

El análisis exploratorio de los Datos de Actividad para el periodo 2000-2024 reveló un comportamiento no lineal caracterizado por un fenómeno de "U" invertida (ver gráfico 3). Se identificaron claramente dos fases estructurales:

- **Fase de Expansión (2000-2013):** Caracterizada por un aumento sostenido de la tasa de cambio de uso de la tierra, alcanzando picos históricos superiores a las 300.000 hectáreas anuales. Durante este periodo, la correlación entre los *drivers* económicos y el desmonte fue positiva y clásica, donde el incremento en la producción agropecuaria requería necesariamente la apertura de nuevas tierras.
- **Fase de Contracción (2014-2024):** Muestra una tendencia estructural a la baja, descendiendo progresivamente desde aproximadamente 318.000 hectáreas en 2014 hasta 160.000 hectáreas en 2024.

La evaluación econométrica exploratoria demostró que a partir de 2014 se produjo un desacople estructural en esta región. Las exportaciones agregadas (como carne y soja) continuaron una tendencia alcista, mientras que la tasa de deforestación comenzó a descender. Esto indica una maduración del sector productivo chaqueño, el cual ha logrado aumentos de eficiencia mediante la intensificación productiva sobre el stock de tierras previamente habilitadas, disociando la curva de producción de la curva de deforestación.

Gráfico 3. Serie histórica de deforestación anual y exportaciones agrícolas para el periodo 2000-2024.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

5.2.2. Evaluación de Modelos Prospectivos

Dado que este comportamiento tiene dos etapas distintas, se determinó que la utilización de la serie temporal completa (2000-2024) para el entrenamiento de los algoritmos introduciría un sesgo alcista irreal que no reflejaría la dinámica actual. En consecuencia, se estableció el año 2006 como punto de corte metodológico para capturar con mayor precisión la tendencia reciente. Se evaluaron tres enfoques matemáticos:

- **Modelo de Tendencia Lineal:** Se ajustó una regresión lineal simple ($y=mx+b$) al periodo 2014-2024. Donde:
 - y : Dato de Actividad Proyectado, que en este caso corresponde a la superficie de deforestación expresada en hectáreas.
 - x : Variable temporal, es decir, el año objetivo de la proyección.
 - m : Pendiente de la línea de tendencia, la cual refleja la tasa de cambio anual histórica.
 - b : Intercepto de la recta, que funciona como el punto de partida teórico del modelo.

Aunque este enfoque captura la pendiente de caída reciente, presenta un riesgo matemático elevado de cruzar el eje cero o proyectar valores negativos hacia el final de la serie temporal, lo cual carece de sentido físico en dinámicas territoriales.

- **Modelo Inercial (Promedio Reciente):** Se modeló una proyección constante basada en el promedio del último quinquenio (2020-2024). Este enfoque asume la estabilización total de la deforestación en los niveles actuales. Resultó ser el escenario más conservador (arrojando la mayor deforestación acumulada), pero falla en capturar la inercia de reducción demostrada en los últimos años.
- **Modelo de Decaimiento Logarítmico:** Consiste en un ajuste no lineal ($y=a+bln(x)$) que modela la tasa de cambio porcentual. Donde:
 - y : Dato de Actividad Proyectado (superficie de deforestación en hectáreas).
 - x : Variable temporal (año de la serie).
 - $ln(x)$: Logaritmo natural de la variable temporal, cuyo efecto matemático atenúa la velocidad de la caída conforme avanza el tiempo.
 - a : Constante de intersección del modelo estadístico.
 - b : Coeficiente de la regresión que determina la tasa de decaimiento o contracción.

La formulación matemática de este modelo asume que la deforestación continuará descendiendo, pero cada reducción adicional será marginalmente más difícil de lograr. Esto genera una curva asintótica que refleja un agotamiento progresivo de la frontera agrícola, evitando caídas abruptas a cero y manteniendo la coherencia física a largo plazo.

La elección del año 2006 como punto de corte metodológico para el entrenamiento del algoritmo, en lugar de 2014 (año en que se consolida el desacople económico), responde a dos criterios estadísticos orientados a mejorar la proyección. En primer lugar, la auditoría de calidad de la serie histórica reveló una anomalía en el periodo 2000-2005, caracterizada por una varianza interanual igual a cero originada por la anualización de mapas multianuales. Restringir el análisis a partir de 2006 garantiza que el modelo se alimente exclusivamente de datos con varianza anual validada que reflejan dinámicas territoriales reales. En segundo lugar, desde la perspectiva del modelado matemático, entrenar la regresión logarítmica únicamente con la fase de contracción estricta (2014-2024) generaría un sobreajuste matemático, forzando una pendiente de caída más acentuada que no refleja el comportamiento asintótico real del agotamiento de la frontera. Al incorporar el periodo 2006-2013, el algoritmo logra capturar el punto máximo de la fase de expansión y la posterior transición hacia el desacople, produciendo una curva asintótica mucho más equilibrada, estadísticamente conservadora y físicamente coherente para las proyecciones a largo plazo.

5.3. Componente 3: Extracción de Productos Forestales (Leña, Carbón y Rollizos)

Este componente forma parte integral de la construcción del Escenario de Referencia (Línea Base), constituyendo el flujo pérdidas de carbono que continuarán operando sobre los bosques nativos en ausencia de nuevas políticas.

Dado que las dinámicas de extracción de biomasa y madera en rollo proveniente de bosques nativos varían sustancialmente según el tipo de producto, se aplicó un enfoque de modelación estadística diferenciado para la leña, el carbón vegetal y los rollizos.

5.3.1. Leña: Modelo de Decaimiento Logarítmico Ponderado y Anclaje Metodológico

El modelado del consumo de leña presentó el desafío estadístico de integrar la reciente actualización metodológica del Viceministerio de Minas y Energía (VMME) validada por el estudio VMME/BID 2025, la cual sinceró a la baja los volúmenes reportados a partir de 2020. La evaluación demostró que una proyección logarítmica simple aplicada sobre

toda la serie temporal (2000-2024) generaba una curva que iniciaba por encima de los valores actuales, lo que hubiera implicado una sobreestimación artificial de la línea base y una inflación del consumo de partida.

Para corregir esta distorsión, se implementó un Modelo de Decaimiento Logarítmico Ponderado. La formulación matemática aplicada es $y=a+bln(x)$, donde:

- y : Dato de Actividad Proyectado (demanda de leña en m^3).
- x : Variable temporal (año de la serie).
- a : Constante de intersección del modelo.
- b : Coeficiente que determina la tasa de decaimiento asintótico.

Para el ajuste de esta regresión, se asignó un peso estadístico mayor (multiplicador x10) a los datos del último quinquenio (2020-2024). Esta técnica de anclaje fuerza matemáticamente a la curva predictiva a iniciar desde los niveles del nuevo estándar de medición oficial, asumiendo una inercia de transición energética y sustitución tecnológica suavizada hasta el año 2040.

5.3.2. Carbón Vegetal: Regresión Lineal Bivariada vinculada al Cambio de Uso de la Tierra

Para la proyección del carbón vegetal, se descartaron los modelos inerciales univariados basados únicamente en la producción histórica registrada, optando por una regresión lineal bivariada donde el volumen de carbón es una función dependiente de la proyección de deforestación de la Región Occidental (Chaco). La estructura de la ecuación asume la forma $y=m \cdot xdef+b$, donde $xdef$ representa las hectáreas de desmonte proyectadas para el Chaco.

Esta decisión metodológica se sustenta en dos pilares:

- **Evidencia Estadística:** El análisis de causalidad sobre la serie 2000-2024 demostró que la tasa de cambio de uso de suelo en el Chaco es la variable con mayor poder explicativo sobre el volumen de carbón, validado por un coeficiente de determinación de $R^2>0.55$.
- **Corrección de Sesgos por Subregistro:** La literatura técnica de referencia (VMME/BID, 2025) señala inconsistencias en los registros administrativos oficiales, evidenciando que en determinados años el volumen de exportación superó a la producción local registrada debido a la alta informalidad del sector. Al vincular el algoritmo matemático al driver físico subyacente

(deforestación), el modelo logra capturar la dinámica real de producción oculta, mitigando el sesgo de subregistro.

5.3.3. Rollizos: Tendencia Lineal con Umbral Mínimo Estructural

La extracción de madera nativa en rollo exhibe un agotamiento progresivo del modelo extractivo tradicional, comportamiento que se encuentra respaldado por una correlación negativa muy alta frente a la variable temporal ($R^2 = -0.92$).

Para modelar este vector, se seleccionó un modelo de tendencia lineal, pero se introdujo una restricción matemática asintótica (Umbral Mínimo Estructural), el cual fue fijado en $75.000 m^3$ anuales. Este parámetro no es arbitrario; equivale a aproximadamente el 50% del volumen registrado en los años recientes de la serie histórica (2020-2023) y actúa como un límite inferior conservador. Representa la fracción de demanda inelástica del mercado interno que persiste independientemente de la escasez del recurso a gran escala, asumiendo que un volumen mínimo no será sustituido por plantaciones o materiales alternativos en el corto y mediano plazo. Sin la imposición de este umbral, el modelo lineal habría proyectado matemáticamente la desaparición total de la industria de madera nativa, un escenario improbable en ausencia de una prohibición legal.

5.4. Componente 4: Expansión de Plantaciones Forestales (IPF)

La modelación de la superficie futura de plantaciones forestales requiere un enfoque metodológico distinto al utilizado para las dinámicas de deforestación. Proyectar el crecimiento forestal basándose exclusivamente en la inercia de tendencias pasadas subestimaría el impacto del marco normativo actual y la reciente atracción de inversiones industriales. Por ello, para este componente se implementó un cálculo basado en las necesidades de la industria.

Este enfoque analítico no extiende tendencias pasadas, sino que cuantifica la superficie productiva necesaria para satisfacer demandas físicas específicas y tangibles, tales como la capacidad industrial instalada, proyectos de inversión confirmados, desbalance energético (entre consumo y producción sostenible de biomasa) y demanda potencial de exportación. De esta forma, se vincula directamente la oferta de biomasa con la tracción real del mercado, proporcionando metas físicas justificadas.

5.4.1. Parámetros Base y Factores de Conversión

Para garantizar la robustez del modelo, el cálculo parte de un stock base consolidado al año 2024 de 352.418 hectáreas. Sobre esta superficie se aplican coeficientes técnicos para la transformación de demanda industrial a requerimientos de tierra:

- **Factor de Conversión para celulosa:** Se parametriza un consumo de $4,0 m^3$ de volumen sólido sin corteza (ssc) por cada tonelada de celulosa producida, margen que incluye pérdidas operativas y mermas en transporte.
- **Rendimiento para Bioenergía:** Para la cobertura de la demanda energética, se utiliza un rendimiento de referencia de 20 t/ha/año.

5.4.2. Construcción de Escenarios Prospectivos de Demanda

A partir del stock base, se estructuraron cuatro escenarios de expansión forestal al 2040, definidos por el nivel de maduración industrial y la atracción de Inversión Extranjera Directa (IED):

Escenario A: Saturación Industrial

Este escenario modela la visión más restrictiva basada en la capacidad de carga inmediata. Asume que el crecimiento del sector se detendrá una vez cubierta la base forestal de las industrias ya instaladas o en construcción, sin la llegada de nuevas grandes inversiones. La expansión se limita a cubrir la brecha de abastecimiento de la primera planta de celulosa (Paracel), el desbalance de biomasa para secado de granos y el crecimiento vegetativo del mercado interno de madera sólida. Requiere un nivel de inversión bajo (inercial) y estabiliza la superficie en un techo técnico de 693.000 hectáreas para el año 2040.

Escenario B: Continuidad Industrial (seleccionado)

Supera la fase de saturación proyectando una consolidación del modelo de negocios actual. Asume la maduración plena de las inversiones industriales confirmadas, donde la industria de celulosa desarrolla un excedente estratégico para exportación de chips. Además, integra el aumento orgánico de la demanda agroindustrial y una aceleración del mercado de madera sólida apalancado por instrumentos financieros como la garantía de vuelo forestal. Este escenario proyecta alcanzar 1.128.600 hectáreas al 2040, requiriendo mantener un clima de negocios de nivel medio.

Escenario C: Polo Forestal Regional

Este escenario incorpora un salto estructural de escala, asumiendo la consolidación del país como un clúster forestal regional. Proyecta la llegada de una segunda planta de celulosa hacia el año 2030 y la adopción progresiva de tecnología de sistemas silvopastoriles (SSP) en aproximadamente el 4% del hato ganadero nacional. Con una aceleración de la tasa de plantación a 110.000 hectáreas anuales, este modelo establece una meta de 2.079.000 hectáreas para 2040, requiriendo un nivel alto de atracción de inversiones y extensión tecnológica.

Escenario D: Transformación Bioeconómica

Representa un escenario más optimista que rompe las fronteras geográficas actuales, impulsado por flujos masivos de finanzas climáticas. Integra la expansión de la producción forestal hacia el Chaco Seco (adopción de SSP con especies adaptadas en el 10% de la superficie ganadera chaqueña) y el desarrollo de una industria de bioenergía avanzada, como los combustibles sintéticos de aviación (SAF). Establece una meta prospectiva de 2.712.600 hectáreas al 2040.

5.4.3. Modelo Logístico en los Escenarios

La proyección de los diferentes escenarios (A, B, C y D) de plantaciones forestales hasta el año 2040 se realizó por medio de un modelo de crecimiento logístico. Este modelo es particularmente adecuado para sistemas que exhiben un crecimiento inicial lento, una fase de expansión rápida, y finalmente una ralentización a medida que se acerca a un límite superior.

El modelo de crecimiento logístico, también conocido como curva S, es un modelo matemático que describe el crecimiento de una población (o cualquier otra cantidad) que se inicia lentamente, acelera y luego se ralentiza a medida que se acerca a un límite superior o capacidad de carga.

La fórmula general del modelo de crecimiento logístico es la siguiente:

$$P(t) = L / (1 + e^{-k(t-t_0)})$$

Donde:

- $P(t)$: Representa la cantidad (o población, en nuestro caso, superficie de plantaciones acumuladas) en un momento dado t .

- L (Capacidad de Carga o Techo): Es el valor máximo que puede alcanzar la cantidad. En el contexto de las plantaciones forestales, representa el techo estructural o la capacidad de saturación del mercado/territorio. La curva se acercará asintóticamente a este valor, pero nunca lo superará.
- k (Tasa de Crecimiento o Inclinación): Este parámetro determina la rapidez con la que la curva asciende. Un valor de k más alto significa un crecimiento más rápido hacia la capacidad de carga L .
- t (Tiempo): La variable independiente, que generalmente se mide en años (ej. 2024, 2025, etc.).
- t_0 (Punto de Inflexión o Año de Mayor Crecimiento): Es el momento en el que el crecimiento de $P(t)$ es más rápido. Corresponde al punto medio de la curva logística, donde la cantidad $P(t)$ es igual a $L/2$. Después de t_0 , el crecimiento comienza a desacelerar.
- e : Es la base del logaritmo natural (aproximadamente 2.71828).

5.5. Metodología para la Construcción de la Línea de Base y Escenarios en GEI

En términos generales, los valores de Gases de Efecto Invernadero (GEI) proyectados para todos los escenarios se calcularon multiplicando los Datos de Actividad (DA) físicos proyectados (superficies en hectáreas) por sus respectivos Factores de Emisión y Absorción, en estricta coherencia con las directrices del IPCC.

Para la conformación del Escenario de Referencia (Línea de Base), la metodología establece la suma de los flujos inerciales de carbono. De esta manera, la Línea de Base integral se construye mediante la suma de los siguientes cuatro componentes calculados en kt CO₂ eq:

- **Emisiones en la Región Occidental (kt CO₂ eq):** Calculado a partir de las superficies proyectadas de deforestación en el Chaco (región donde no aplica la jurisdicción de la Ley de Deforestación Cero).
- **Absorciones de Tierras Forestales que permanecen (kt CO₂ eq):** Corresponde a la captura de carbono proveniente de la biomasa forestal histórica consolidada que continúa su dinámica de crecimiento.
- **Absorciones IPF Referencia - sin política (kt CO₂ eq):** Calculado teniendo en cuenta la tasa de crecimiento orgánico e inercial del sector de plantaciones forestales observada en el periodo previo a la implementación de la ley de fomento (Vuelo Forestal).
- **Emisiones RCU Referencia - sin política (kt CO₂ eq):** Calculado teniendo en cuenta la tasa de deforestación histórica observada previa a la

implementación de la Ley de Deforestación Cero, asumiendo la continuidad de dicha presión sobre los bosques.

Por lo tanto, la ecuación matemática que define la trayectoria de la Línea de Base sectorial es la siguiente:

$$\text{Línea de Base} = [\text{Emisiones en la Región Occidental}] + [\text{Absorciones de Tierras Forestales que permanecen}] + [\text{Absorciones IPF Referencia (sin política)}] + [\text{Emisiones RCU Referencia (sin política)}]$$

Escenarios de Mitigación (Con Política) Una vez modelado el escenario base, el cálculo del impacto de las medidas de mitigación se realiza proyectando los escenarios de implementación descritos previamente.

- **Absorciones IPF Escenario - con política (kt CO₂ eq):** Corresponde al cálculo de GEI basado en la proyección de las nuevas superficies de plantaciones forestales impulsadas activamente por la política.
- **Emisiones RCU Escenario - con política (kt CO₂ eq):** Corresponde al cálculo de GEI derivado de las proyecciones de deforestación en la Región Oriental bajo la vigencia de la regulación.

Al contrastar (restar) las emisiones y absorciones de los Escenarios con Política frente a la suma total de la Línea de Base, el modelo permite aislar el efecto de las medidas y cuantificar el GEI mitigado o adicionalidad generada por las normativas forestales.

6. RESULTADOS DE PROYECCIONES Y ESTIMACIONES DE GEI

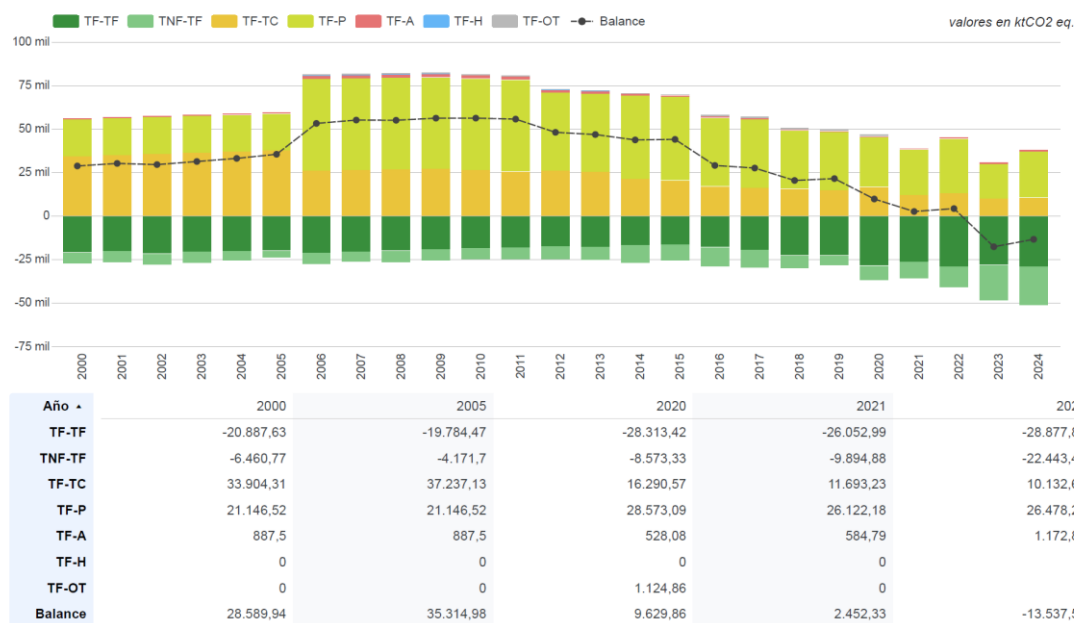
Este capítulo presenta los resultados de las proyecciones de datos de actividad y estimaciones históricas y prospectivas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para el periodo completo 2000-2040. Las métricas en kilotoneladas de Dióxido de Carbono equivalente (*ktCO₂ eq*) se obtienen mediante la integración de las superficies modeladas en el Capítulo 4 con los correspondientes Factores de Emisión y Absorción específicos del país, manteniendo la coherencia metodológica con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI).

6.1. Resultados Consolidados estimaciones históricas GEI (2000-2024)

La integración de las metodologías descritas sobre la serie temporal de Datos de Actividad del periodo 2000-2024 permite obtener el balance histórico del sector forestal. Estos datos (ver gráfico 4) reflejan dinámicas marcadas, como las absorciones

persistentes en las categorías TF-TF y TNF-TF, frente a las emisiones generadas por las transiciones estructurales hacia Tierras de Cultivo (TF-TC) y Pastizales (TF-P).

Gráfico 4. Balance Histórico 2000-2024 en ktCO₂ eq.

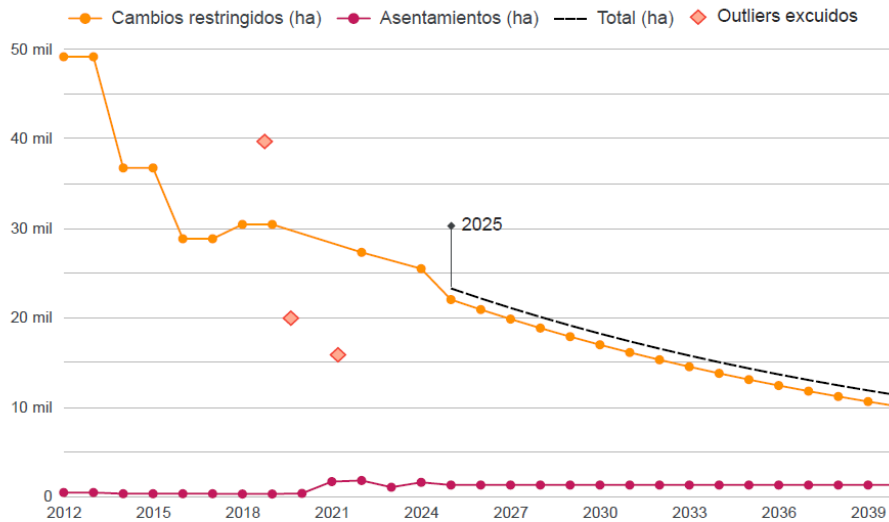


Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.2. Resultados de la Proyección del Componente 1: Dinámica de Deforestación en la Región Oriental (RCU)

La integración de la curva de decaimiento logarítmico (Variable Restringida) y la constante inercial (Asentamientos) define el escenario de proyección para la Región Oriental. El modelo estima una reducción progresiva, estabilizándose hacia el año 2040 con una deforestación residual proyectada de aproximadamente 11.273 hectáreas anuales.

Gráfico 5. Modelos Prospectivos evaluados para la variable restringida.



Año ▲	2025	2030	2035	2040
Cambios restringidos (ha)	21.961	16.911	13.022	10.028
Asentamientos (ha)	1.245	1.245	1.245	1.245
Total (ha)	23.206	18.156	14.267	11.273

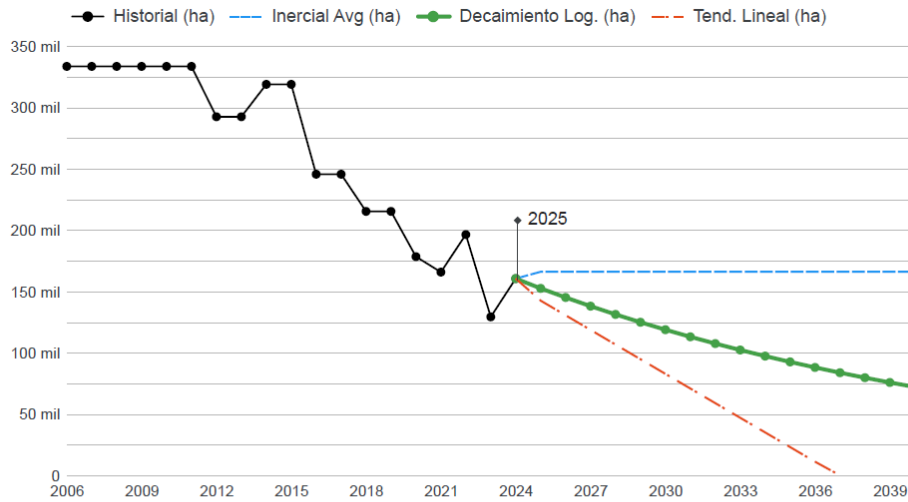
Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.3. Resultados de la Proyección del Componente 2: Dinámica de Deforestación en la Región Occidental.

Sobre la base de las pruebas estadísticas y el análisis comparativo, se seleccionó el Modelo de Decaimiento Logarítmico entrenado con la serie temporal 2006-2024 como modelo de proyección para la Región Occidental.

Esta selección ofrece el mejor equilibrio matemático, $R^2=0.85$, captura fielmente la tendencia histórica de reducción de la frontera agrícola y mantiene la coherencia física a largo plazo al evitar cruces por debajo del cero. La aplicación de este modelo proyecta un descenso continuo y suavizado de la superficie deforestada en el Chaco, alcanzando un valor de actividad residual estimado en 72.039 hectáreas anuales para el año 2040.

Gráfico 6. Modelos Prospectivos evaluados para la Deforestación en la Región Occidental.



Año ▾	2025	2030	2035	2040
Inercial Avg (ha)	165.958	165.958	165.958	165.958
Tend. Lineal (ha)	142.417	82.754	23.090	-
Decaimiento Log. (ha)	152.425	118.730	92.484	72.039

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.4. Resultado de la Proyección del Componente 3: Extracción de Productos Forestales (Leña, Carbón y Rollizos)

Los resultados de la proyección para la extracción de biomasa y madera evidencian una trayectoria de transición y declive hacia el año 2040. En la arquitectura del modelo, los Datos de Actividad de estas tres categorías constituyen los flujos de pérdidas estructurales que operan sobre el escenario de referencia (Línea Base), representando la presión de extracción continua que sufren los bosques nativos y las plantaciones históricas consolidadas.

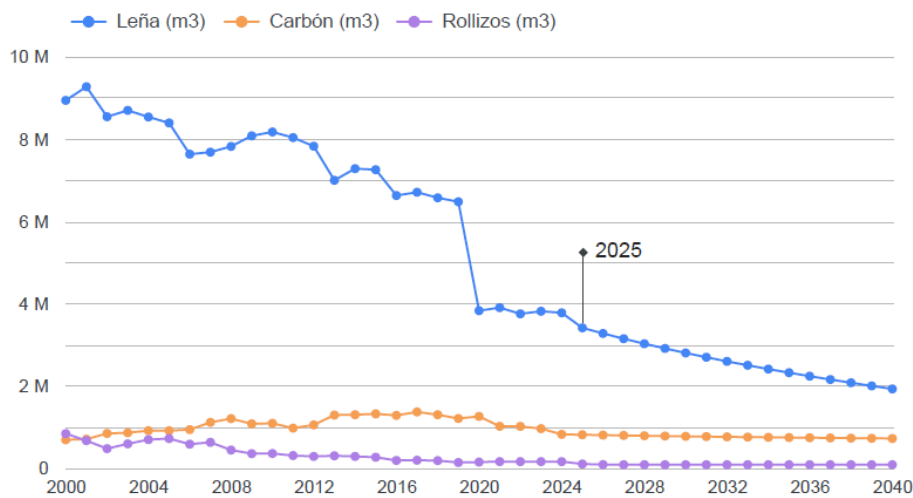
La aplicación de los modelos segmentados arrojó los siguientes comportamientos específicos:

- **Leña (Madera Combustible):** Tras anclar el modelo de decaimiento logarítmico a los ajustes metodológicos recientes del Viceministerio de Minas y Energía, el consumo proyectado inicia en un nivel realista de 3.403.642 m³

para 2025. A partir de allí, la curva describe un descenso suavizado asintótico, alcanzando 1.918.023 m³ al final del periodo (2040).

- **Carbón Vegetal:** Su volumen de extracción se reduce gradualmente de 803.518 m³ en 2025 a 712.781 m³ en 2040. Dado que el modelo matemático vincula directamente esta variable con la tasa de deforestación del Chaco, su proyección decreciente es un reflejo del agotamiento progresivo de la frontera agrícola en la Región Occidental, sincerando la producción real que suele quedar oculta por la informalidad.
- **Rollizos (Madera Nativa):** La extracción para la industria maderera refleja la aplicación del umbral mínimo estructural. Tras un declive inicial en los primeros años de proyección (llegando a 92.383 m³ en 2025), el volumen se estabiliza de manera fija en 75.000 m³ anuales desde 2027 hasta 2040. Esto asegura que el modelo reconozca y preserve la fracción de demanda inelástica del mercado interno, evitando que la recta de regresión lleve artificialmente a la industria a su desaparición absoluta.

Gráfico 7. Proyección de extracción de productos forestales (Leña, Carbón y Rollizos).



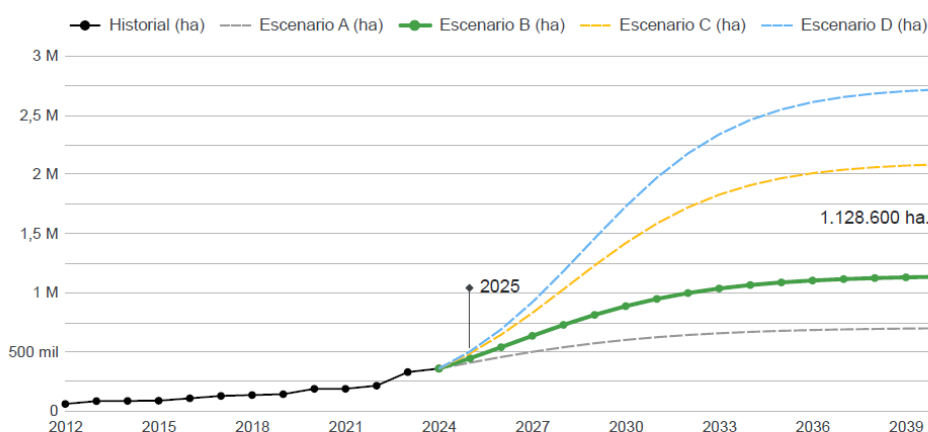
Año ▲	2025	2030	2035	2040
Leña (m3)	3.403.642	2.792.830	2.313.105	1.918.023
Carbón (m3)	803.518	765.484	735.859	712.781
Rollizos (m3)	92.383	75.000	75.000	75.000

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.5. Resultado de la Proyección del Componente 4: Expansión de Plantaciones Forestales (IPF)

La trayectoria de los Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF) se basa en un modelo de demanda industrial que prioriza la capacidad real del mercado sobre las tendencias históricas. Al seleccionar el Escenario B de Continuidad Industrial, se proyecta alcanzar 1,128 millones de hectáreas para 2040, una cifra técnicamente respaldada por las inversiones confirmadas y el crecimiento del mercado interno, garantizando así una expansión prudente y alineada con la realidad productiva.

Gráfico 8. Proyección de escenarios de expansión forestal al 2040.



Año ▲	2025	2030	2035	2040
Escenario A (ha)	402.135	594.750	671.605	693.000
Escenario B (ha)	439.355	880.268	1.080.986	1.128.600
Escenario C (ha)	480.924	1.413.602	1.962.555	2.079.000
Escenario D (ha)	497.217	1.723.127	2.543.615	2.712.600

Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.6. Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Regulación de Cambio de Uso (RCU)

Este componente refleja la traducción a GEI del decaimiento de la deforestación modelado para la Región Oriental. Las estimaciones consolidan las emisiones generadas por las transiciones de tierras forestales hacia otras categorías de uso, asumiendo la

oxidación de la biomasa y la amortización de las reservas de carbono en los suelos minerales.

El balance estimado muestra un descenso continuo de las emisiones a lo largo de la serie prospectiva. Para el año base de la proyección (2024), las emisiones totales por RCU se estimaron en 11.899,74 *ktCO₂ eq*. La aplicación del modelo logarítmico sobre los Datos de Actividad proyecta que para el año 2025 las emisiones se reduzcan a 10.187,79 *ktCO₂ eq*.

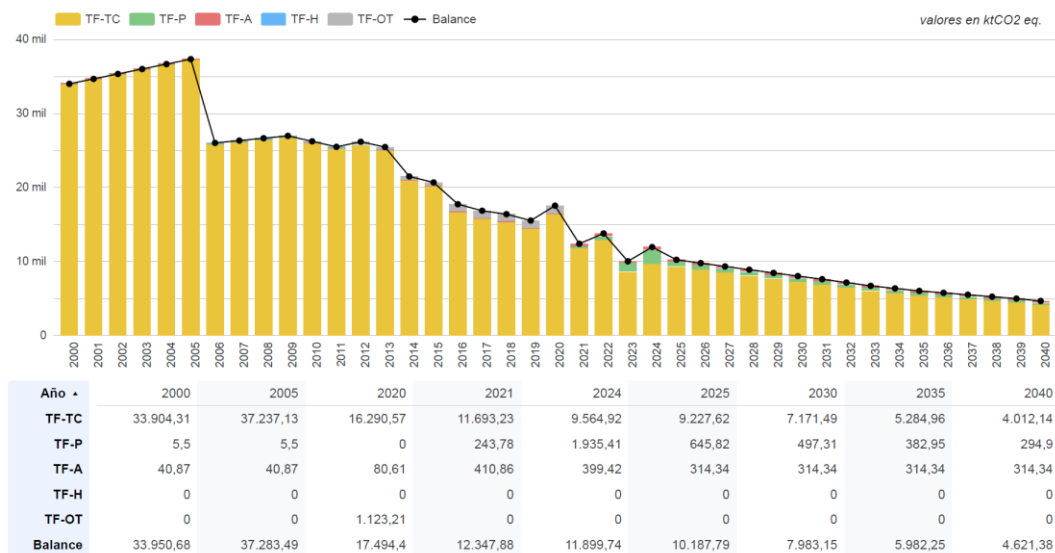
A medida que la superficie de desmonte decae, las emisiones siguen una trayectoria descendente estabilizándose hacia el final del periodo. Para el año 2030, las emisiones se estiman en 7.983,15 *ktCO₂ eq*, descendiendo a 5.982,25 *ktCO₂ eq* en 2035, hasta alcanzar un balance de emisiones residuales de 4.621,38 *ktCO₂ eq* para el año 2040. Esta contracción está impulsada principalmente por la reducción de las emisiones en la categoría de Tierras Forestales convertidas a Tierras de Cultivo (TF-TC), las cuales descienden de 9.564,92 *ktCO₂ eq* en 2024 a 4.012,14 *ktCO₂ eq* en 2040, mientras que las emisiones por asentamientos (TF-A) se mantienen constantes en 314,34 *ktCO₂ eq* anuales debido a la inercia demográfica.

6.7. Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF)

La modelación de las estimaciones GEI para este componente refleja la capacidad de captura de carbono (sumideros) derivada de la expansión de la superficie plantada bajo el Escenario B (Continuidad Industrial). Los valores negativos en el balance indican una absorción neta de CO₂ de la atmósfera.

Para el año 2024, el sumidero de las plantaciones representó absorciones por -51.321,31 *ktCO₂ eq*. Al proyectar la curva de nuevas superficies forestadas, se observa un incremento sustancial en la capacidad de captura a mediano plazo. En 2025, el balance de absorciones se estima en -60.740,21 *ktCO₂ eq*.

Gráfico 9. Proyecciones GEI para la dinámica de Regulación de Cambio de Uso (RCU) 2000-2040 en ktCO₂ eq.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

6.8. Resultado de Proyecciones GEI para la dinámica de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF)

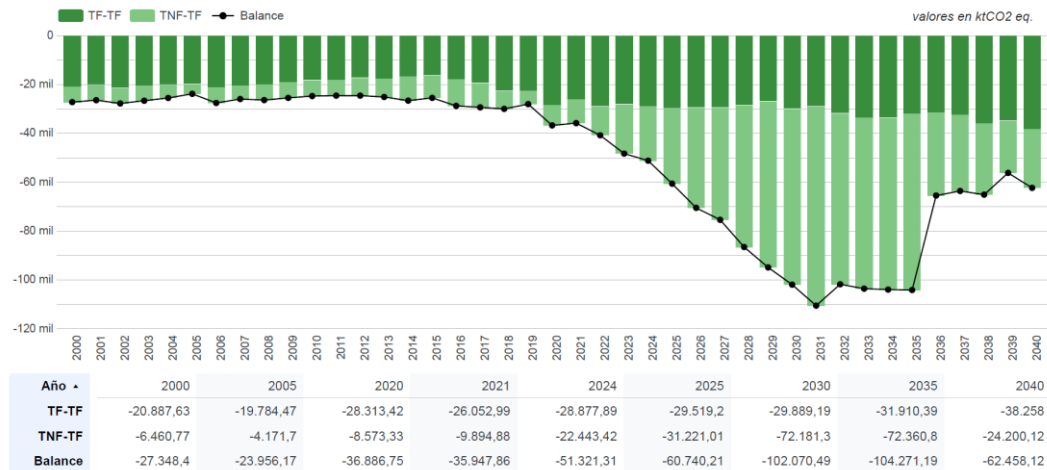
La modelación de las estimaciones GEI para este componente refleja la capacidad de captura de carbono (sumideros) derivada de la expansión de la superficie plantada bajo el Escenario B (Continuidad Industrial). Los valores negativos en el balance indican una absorción neta de CO₂ de la atmósfera.

Para el año 2024, el sumidero de las plantaciones representó absorciones por - 51.321,31 ktCO₂ eq. Al proyectar la curva de nuevas superficies forestadas, se observa un incremento sustancial en la capacidad de captura a mediano plazo. En 2025, el balance de absorciones se estima en -60.740,21 ktCO₂ eq.

El pico máximo de absorción en este escenario se registra durante la fase de crecimiento acelerado de las nuevas plantaciones, alcanzando en 2030 un volumen de - 102.070,49 ktCO₂ eq, impulsado fuertemente por la categoría de Tierras No Forestales convertidas a Tierras Forestales (TNF-TF), la cual aporta -72.181,30 ktCO₂ eq en dicho año. Hacia el año 2040, conforme las plantaciones maduran y se estabiliza el ciclo de cosecha y replante para abastecer a la industria, el balance neto de absorciones se consolida en -62.458,12 ktCO₂ eq, distribuido entre el crecimiento de las tierras forestales

permanentes (TF-TF: $-38.258,00 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$) y las nuevas transiciones (TNF-TF: $-24.200,12 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$).

Gráfico 10. Proyecciones GEI para la dinámica de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF) 2000-2040 en $\text{ktCO}_2 \text{ eq}$.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

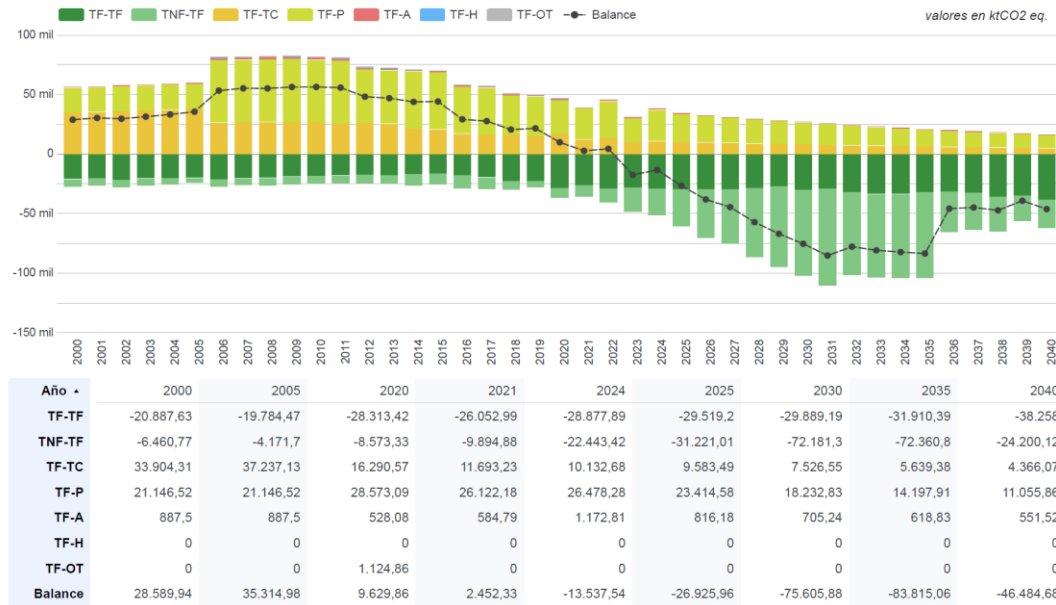
6.9. Balance Neto Sectorial Consolidado

El balance neto sectorial unifica todas las dinámicas territoriales proyectadas, integrando las emisiones de la Región Oriental (RCU), el incremento de absorciones por plantaciones forestales (IPF) y la trayectoria de deforestación modelada para la Región Occidental (Chaco).

Las estimaciones integradas revelan que el sector forestal paraguayo mantendrá su condición de sumidero neto a lo largo de todo el horizonte prospectivo. En 2024, el balance consolidado del escenario base cerró con una remoción neta de $-13.537,54 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$.

La tracción ejercida por la maduración de las plantaciones forestales incrementa esta capacidad de mitigación sectorial, estimando un balance neto de $-75.605,88 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$ para el año 2030. El sumidero sectorial alcanza su punto de mayor captura alrededor del año 2035, con un estimado de $-83.815,06 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$. Finalmente, al proyectar las dinámicas hacia el año 2040, y compensando las emisiones de todas las regiones geográficas del país, el balance neto consolidado se estabiliza en $-46.484,68 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$.

Gráfico 11. Proyecciones GEI - Balance Neto Sectorial Consolidado 2000-2040 en ktCO₂ eq.



Fuente: Elaboración propia con base en los Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra del INFONA (Series temporales 2000-2024).

7. CONCLUSIONES

El ejercicio de modelación prospectiva desarrollado en este informe ha permitido traducir escenarios de uso de la tierra (Datos de Actividad) en estimaciones métricas de Gases de Efecto Invernadero (*ktCO₂ eq*) para el periodo 2025-2040. Más allá de la cuantificación numérica, las trayectorias de emisiones y absorciones revelan dinámicas estructurales importantes para la planificación del sector forestal. A partir de este ejercicio, se extraen las siguientes conclusiones estratégicas:

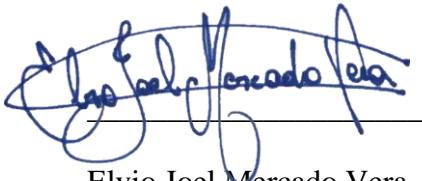
- La integración del balance neto sectorial demuestra que, bajo los parámetros modelados, el sector forestal paraguayo mantendrá y expandirá su condición de sumidero neto de carbono hacia el año 2040. Sin embargo, el ejercicio prospectivo revela una alta sensibilidad temporal en la curva de mitigación: el pico de máxima absorción se estima para la década 2030-2035 (alcanzando hasta -83.815,06 *ktCO₂ eq*), coincidiendo con la fase de máximo crecimiento biológico de las nuevas masas forestales antes de que estas entren en su fase principal de cosecha industrial. Estratégicamente, esto indica que la capacidad del país para reportar grandes volúmenes de absorción en el mediano plazo

dependerá críticamente de sostener el ritmo de plantación durante los próximos cinco años, ya que hacia el 2040 el sistema tiende a estabilizarse (en $-46.484,68 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$) al equilibrarse las ganancias por crecimiento y las pérdidas por extracción maderera.

- La aplicación del modelo de decaimiento logarítmico sobre las emisiones de la Región Oriental refleja un agotamiento estructural de la deforestación a gran escala. El descenso de las emisiones estimadas hasta un nivel residual de $4.621,38 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$ en el año 2040 evidencia que la presión sobre el bosque remanente se ha transformado. El ejercicio demuestra que las emisiones futuras ya no estarán dominadas por transiciones masivas hacia tierras de cultivo extensivo, sino por una inercia demográfica constante (conversiones hacia asentamientos y expansión periurbana). La principal lección estratégica es que las futuras acciones de mitigación en esta región requerirán herramientas de política pública enfocadas en el ordenamiento territorial a nivel municipal y en el control de dinámicas fragmentadas de pequeña escala.
- El ejercicio de estimar las absorciones de GEI futuras evidenció el riesgo de sobreestimar la superficie de plantaciones forestales si se utilizan modelos puramente estadísticos. La decisión de anclar este dato de actividad al cálculo basado en las necesidades de la industria (Escenario B - Continuidad Industrial) garantiza que las 1.128.600 hectáreas proyectadas al 2040, y sus correspondientes $-62.458,12 \text{ ktCO}_2 \text{ eq}$ de absorción, posean un respaldo físico justificado. Se concluye que anclar las proyecciones de captura de carbono a la demanda industrial y bioenergética real asegura la construcción de escenarios climáticos más realistas, superando las limitaciones de depender de proyecciones territoriales o tendencias temporales. Este enfoque metodológico aporta robustez, asegurando la integridad y credibilidad de este escenario prospectivo.
- Finalmente, el ejercicio de proyección evidencia que los vectores de emisiones no pueden modelarse de forma aislada, requiriendo condicionamientos físicos (Umbrales). Modelar la extracción histórica de leña o rollizos nativos con regresiones lineales simples proyectaba matemáticamente la desaparición total de estas emisiones en el corto plazo. La introducción técnica de un umbral mínimo estructural (ej. 75.000 m^3 para rollizos) fue fundamental para reflejar que existe una demanda inelástica en el mercado que persistirá. Del mismo modo, la decisión de anclar estadísticamente la proyección de producción de carbón vegetal a la curva de deforestación de la región occidental busca que se generen estimaciones de GEI más precisas al vincular los productos extraídos

con el driver físico que transforma el uso del suelo, permitiendo visibilizar (en términos de GEI) la producción informal que de otro modo quedaría oculta en los registros administrativos.

Informe elaborado por:



Elvio Joel Mercado Vera

Consultor de apoyo para la generación de proyecciones de GEI para evaluar el impacto de políticas y medidas forestales.

8. ANEXO

8.1. Datos de actividad utilizados

Año	Deforestación R. Oriental (ha)	Deforestación R. Occidental (ha)	Plantaciones forestales totales (ha)	Plantaciones forestales nuevas (ha)	Rollizos (m3)	Madera Leña (m3)	Madera Carbón (m3)
2000	90.176	128.168	16.640		830.848	8.935.988	681.623
2001	90.176	128.168	17.405	765	659.794	9.267.099	695.594
2002	90.176	128.168	18.171	766	465.559	8.538.210	834.377
2003	90.176	128.168	18.937	766	582.524	8.692.901	851.594
2004	90.176	128.168	19.702	765	684.868	8.532.654	903.188
2005	90.176	128.168	20.468	766	710.986	8.388.025	903.188
2006	44.007	333.342	21.967	1.499	574.028	7.627.531	928.406
2007	44.007	333.342	23.466	1.499	619.319	7.676.420	1.104.812
2008	44.007	333.342	24.964	1.498	431.876	7.815.988	1.196.000
2009	44.007	333.342	26.463	1.499	343.553	8.073.765	1.068.812
2010	44.007	333.342	27.962	1.499	347.158	8.168.025	1.081.971
2011	44.007	333.342	29.461	1.499	297.799	8.030.432	964.464
2012	49.489	292.303	53.309	23.848	276.458	7.820.802	1.043.246
2013	49.489	292.303	77.158	23.849	292.055	6.992.037	1.282.087
2014	36.940	318.714	78.962	1.804	276.446	7.275.679	1.290.957
2015	36.940	318.714	80.766	1.804	256.932	7.249.877	1.311.652
2016	29.024	245.459	100.946	20.180	178.166	6.621.828	1.274.319
2017	29.024	245.459	121.126	20.180	184.038	6.702.039	1.358.435
2018	30.599	215.181	128.366	7.240	174.703	6.566.691	1.290.783
2019	30.599	215.181	135.605	7.239	128.682	6.469.895	1.198.783
2020	39.960	178.287	181.341	45.736	139.001	6.157.422	1.250.200
2021	21.517	165.675	181.341	0	150.631	6.215.061	1.008.580
2022	28.983	196.254	207.730	26.389	150.631	6.124.214	1.006.912
2023	16.685	129.181	322.567	114.837	150.631	3.806.739	952.524
2024	26.951	160.393	352.418	29.851	150.631	3.769.631	812.512

8.2. Proyecciones DA - Deforestación Región Oriental

Año	Cambios a variable restringida (ha)	Cambios a Asentamientos (ha)	Tipo
2000	90.017	159	Observado
2001	90.017	159	Observado
2002	90.017	159	Observado
2003	90.017	159	Observado
2004	90.017	159	Observado
2005	90.017	159	Observado
2006	43.895	112	Observado
2007	43.895	112	Observado
2008	43.895	112	Observado
2009	43.895	112	Observado
2010	43.895	112	Observado
2011	43.895	112	Observado
2012	49.083	405	Observado
2013	49.083	405	Observado
2014	36.668	272	Observado
2015	36.668	272	Observado
2016	28.751	273	Observado
2017	28.751	273	Observado
2018	30.354	244	Observado
2019	30.354	244	Observado
2020	39.650	310	Observado
2021	19.890	1.627	Observado
2022	27.234	1.749	Observado
2023	15.688	997	Observado
2024	25.408	1.543	Observado
2025	21.961	1.245	Proyectado
2026	20.843	1.245	Proyectado
2027	19.782	1.245	Proyectado
2028	18.774	1.245	Proyectado
2029	17.818	1.245	Proyectado
2030	16.911	1.245	Proyectado
2031	16.050	1.245	Proyectado
2032	15.233	1.245	Proyectado
2033	14.457	1.245	Proyectado
2034	13.721	1.245	Proyectado
2035	13.022	1.245	Proyectado
2036	12.359	1.245	Proyectado
2037	11.730	1.245	Proyectado
2038	11.133	1.245	Proyectado
2039	10.566	1.245	Proyectado
2040	10.028	1.245	Proyectado

8.3. Proyecciones DA - Deforestación Región Occidental

Año	Tipo	Tend. Lineal (ha)	Inercial (Promedio) (ha)	Decaimiento (Log) 2006-2024 (ha)
2000	Observado	128.168	128.168	128.168
2001	Observado	128.168	128.168	128.168
2002	Observado	128.168	128.168	128.168
2003	Observado	128.168	128.168	128.168
2004	Observado	128.168	128.168	128.168
2005	Observado	128.168	128.168	128.168
2006	Observado	333.342	333.342	333.342
2007	Observado	333.342	333.342	333.342
2008	Observado	333.342	333.342	333.342
2009	Observado	333.342	333.342	333.342
2010	Observado	333.342	333.342	333.342
2011	Observado	333.342	333.342	333.342
2012	Observado	292.303	292.303	292.303
2013	Observado	292.303	292.303	292.303
2014	Observado	318.714	318.714	318.714
2015	Observado	318.714	318.714	318.714
2016	Observado	245.459	245.459	245.459
2017	Observado	245.459	245.459	245.459
2018	Observado	215.181	215.181	215.181
2019	Observado	215.181	215.181	215.181
2020	Observado	178.287	178.287	178.287
2021	Observado	165.675	165.675	165.675
2022	Observado	196.254	196.254	196.254
2023	Observado	129.181	129.181	129.181
2024	Observado	160.393	160.393	160.393
2025	Proyectado	237.809	165.958	152.425
2026	Proyectado	238.434	165.958	144.997
2027	Proyectado	239.058	165.958	137.930
2028	Proyectado	239.683	165.958	131.208
2029	Proyectado	240.308	165.958	124.813
2030	Proyectado	240.933	165.958	118.730
2031	Proyectado	241.557	165.958	112.944
2032	Proyectado	242.182	165.958	107.439
2033	Proyectado	242.807	165.958	102.203
2034	Proyectado	243.432	165.958	97.222
2035	Proyectado	244.057	165.958	92.484
2036	Proyectado	244.681	165.958	87.976
2037	Proyectado	245.306	165.958	83.689
2038	Proyectado	245.931	165.958	79.610
2039	Proyectado	246.556	165.958	75.730
2040	Proyectado	247.180	165.958	72.039

8.4. Proyecciones DA – Consumo de rollizo y madera combustible

Año	Rollizos (m3)	Madera Leña (m3)	Madera Carbón (m3)
2000	830.848	8.935.988	681.623
2001	659.794	9.267.099	695.594
2002	465.559	8.538.210	834.377
2003	582.524	8.692.901	851.594
2004	684.868	8.532.654	903.188
2005	710.986	8.388.025	903.188
2006	574.028	7.627.531	928.406
2007	619.319	7.676.420	1.104.812
2008	431.876	7.815.988	1.196.000
2009	343.553	8.073.765	1.068.812
2010	347.158	8.168.025	1.081.971
2011	297.799	8.030.432	964.464
2012	276.458	7.820.802	1.043.246
2013	292.055	6.992.037	1.282.087
2014	276.446	7.275.679	1.290.957
2015	256.932	7.249.877	1.311.652
2016	178.166	6.621.828	1.274.319
2017	184.038	6.702.039	1.358.435
2018	174.703	6.566.691	1.290.783
2019	128.682	6.469.895	1.198.783
2020	139.001	3.820.588	1.250.200
2021	150.631	3.895.408	1.008.580
2022	150.631	3.744.520	1.006.912
2023	150.631	3.806.739	952.524
2024	150.631	3.769.631	812.512
2025	92.383	3.403.642	803.518
2026	77.648	3.267.468	795.134
2027	75.000	3.139.080	787.157
2028	75.000	3.017.635	779.569
2029	75.000	2.902.422	772.351
2030	75.000	2.792.830	765.484
2031	75.000	2.688.338	758.953
2032	75.000	2.588.491	752.740
2033	75.000	2.492.895	746.829
2034	75.000	2.401.201	741.207
2035	75.000	2.313.105	735.859
2036	75.000	2.228.333	730.770
2037	75.000	2.146.645	725.931
2038	75.000	2.067.823	721.327
2039	75.000	1.991.674	716.948
2040	75.000	1.918.023	712.781

8.5. Proyecciones DA – Plantaciones forestales acumuladas y anuales

<i>Año</i>	<i>Plantaciones forestales totales (ha)</i>	<i>Plantaciones forestales nuevas (ha)</i>
2000	16.640	
2001	17.405	765
2002	18.171	766
2003	18.937	766
2004	19.702	765
2005	20.468	766
2006	21.967	1.499
2007	23.466	1.499
2008	24.964	1.498
2009	26.463	1.499
2010	27.962	1.499
2011	29.461	1.499
2012	53.309	23.848
2013	77.158	23.849
2014	78.962	1.804
2015	80.766	1.804
2016	100.946	20.180
2017	121.126	20.180
2018	128.366	7.240
2019	135.605	7.239
2020	181.341	45.736
2021	181.341	0
2022	207.730	26.389
2023	322.567	114.837
2024	352.418	29.851
2025	439.355	86.937
2026	533.218	93.863
2027	629.127	95.909
2028	721.768	92.641
2029	806.514	84.746
2030	880.268	73.754
2031	941.720	61.452
2032	991.093	49.373
2033	1.029.612	38.519
2034	1.058.982	29.370
2035	1.080.986	22.004
2036	1.097.255	16.269
2037	1.109.166	11.911
2038	1.117.826	8.660
2039	1.124.088	6.262
2040	1.128.600	4.512



8.6. Proyecciones GEI – Emisiones y Absorciones

Año	TF-TF kt CO ₂ eq	TNF-TF kt CO ₂ eq	TF-TC kt CO ₂ eq	TF-P kt CO ₂ eq	TF-H kt CO ₂ eq	TF-A kt CO ₂ eq	TF-OT kt CO ₂ eq	Balance kt CO ₂ eq
2000	-20.887,63	-6.460,77	33.904,31	21.146,52	887,50	0,00	0,00	28.589,94
2001	-20.053,76	-6.499,34	34.570,88	21.146,52	887,50	0,00	0,00	30.051,80
2002	-21.466,14	-6.422,32	35.237,44	21.146,52	887,50	0,00	0,00	29.383,01
2003	-20.408,93	-6.364,78	35.904,00	21.146,52	887,50	0,00	0,00	31.164,32
2004	-20.034,91	-5.622,79	36.570,56	21.146,52	887,50	0,00	0,00	32.946,88
2005	-19.784,47	-4.171,70	37.237,13	21.146,52	887,50	0,00	0,00	35.314,98
2006	-21.083,73	-6.608,39	25.758,01	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	53.037,52
2007	-20.331,14	-5.761,04	26.076,18	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	54.955,64
2008	-19.866,66	-6.650,45	26.394,35	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	54.848,87
2009	-18.954,15	-6.671,94	26.712,52	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	56.058,06
2010	-18.192,74	-6.678,01	25.971,25	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	56.072,14
2011	-18.020,65	-6.676,46	25.229,99	52.548,97	2.266,49	33,43	122,74	55.504,52
2012	-17.219,65	-7.477,46	25.621,99	44.934,40	1.661,83	5,59	388,21	47.914,92
2013	-17.627,37	-7.619,68	24.913,10	44.934,40	1.661,83	5,59	388,21	46.656,09
2014	-16.582,73	-10.159,67	20.840,92	47.963,13	958,53	0,00	527,12	43.547,31
2015	-16.303,58	-9.311,73	20.035,97	47.963,13	958,53	0,00	527,12	43.869,44
2016	-17.795,99	-11.087,71	16.579,85	39.411,69	750,50	0,00	1.041,95	28.900,28
2017	-19.325,80	-10.178,53	15.699,52	39.411,69	750,50	0,00	1.041,95	27.399,33
2018	-22.593,72	-7.525,62	15.239,30	33.539,90	558,53	0,00	1.047,18	20.265,57
2019	-22.490,89	-5.677,19	14.370,66	33.539,90	558,53	0,00	1.047,18	21.348,18
2020	-28.313,42	-8.573,33	16.290,57	28.573,09	528,08	0,00	1.124,86	9.629,86
2021	-26.052,99	-9.894,88	11.693,23	26.122,18	584,79	0,00	0,00	2.452,33
2022	-28.925,47	-12.001,49	12.789,79	31.201,65	1.055,95	0,00	0,00	4.120,44
2023	-28.045,37	-20.369,75	9.563,95	19.957,86	1.094,67	0,00	0,00	-17.798,64
2024	-28.877,89	-22.443,42	10.132,68	26.478,28	1.172,81	0,00	0,00	-13.537,54
2025	-29.519,20	-31.221,01	9.583,49	23.414,58	816,18	0,00	0,00	-26.925,96
2026	-29.447,77	-41.181,79	9.162,16	22.272,14	791,72	0,00	0,00	-38.403,54
2027	-29.372,00	-46.160,40	8.746,10	21.185,29	768,46	0,00	0,00	-44.832,56
2028	-28.511,30	-58.166,11	8.334,81	20.151,54	746,32	0,00	0,00	-57.444,73
2029	-26.866,82	-68.151,04	7.928,40	19.168,16	725,27	0,00	0,00	-67.196,03
2030	-29.889,19	-72.181,30	7.526,55	18.232,83	705,24	0,00	0,00	-75.605,88
2031	-28.905,44	-81.756,93	7.128,92	17.343,21	686,19	0,00	0,00	-85.504,04
2032	-31.749,38	-70.168,87	6.703,00	16.496,87	668,07	0,00	0,00	-78.050,31
2033	-33.555,45	-70.159,84	6.280,80	15.691,91	650,83	0,00	0,00	-81.091,75
2034	-33.590,30	-70.502,46	5.958,41	14.926,22	634,43	0,00	0,00	-82.573,69
2035	-31.910,39	-72.360,80	5.639,38	14.197,91	618,83	0,00	0,00	-83.815,06
2036	-31.397,62	-34.201,34	5.399,09	13.505,03	603,99	0,00	0,00	-46.090,85
2037	-32.391,72	-31.337,61	5.161,97	12.846,15	589,87	0,00	0,00	-45.131,33
2038	-35.803,72	-29.433,72	4.916,11	12.219,29	576,44	0,00	0,00	-47.525,60
2039	-34.837,03	-21.488,00	4.672,97	11.623,03	563,67	0,00	0,00	-39.465,36
2040	-38.258,00	-24.200,12	4.366,07	11.055,86	551,52	0,00	0,00	-46.484,68



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9.1. Reportes Nacionales Oficiales y Políticas Públicas

- Congreso de la Nación Paraguaya. (2013). Ley N° 4.890/13 de Derecho Real de Superficie Forestal. Asunción, Paraguay.
- Instituto Forestal Nacional [INFONA]. (2021). Reporte Nacional de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra 2000-2020. Asunción, Paraguay.
- Instituto Forestal Nacional [INFONA]. (2024). Reporte Nacional de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra 2020-2022. Asunción, Paraguay.
- Instituto Forestal Nacional [INFONA]. (2024). Paraguay Forestal para el Mundo: Portal de Inversiones. Recuperado de infona.gov.py.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES]. (2024). Primer Informe Bienal de Transparencia (1BTR) de la República del Paraguay ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Asunción, Paraguay.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES]. (2024). Documento de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Paraguay (DIN), serie 1990-2021. Incluido en el 1BTR. Asunción, Paraguay.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES] / Dirección Nacional de Cambio Climático [DNCC]. (2025). Borrador de la Tercera Contribución Nacionalmente Determinada (NDC 3.0) de la República del Paraguay al 2035. Asunción, Paraguay.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES]. (2019). Estrategia Nacional de Bosques para el Crecimiento Sostenible (ENBCS). Asunción, Paraguay.
- Secretaría Técnica de Planificación [STP]. (2014). Plan Nacional de Desarrollo Paraguay 2030. Asunción, Paraguay.

9.2. Directrices Metodológicas Internacionales y Literatura Científica

- Banco de Desarrollo de América Latina [CAF]. (2023). CAF invests USD 15 million in Paraguay's Forest Fund. Recuperado de caf.com.
- Banco Mundial. (2020). A Forest's Worth: Policy Options for a Sustainable and Inclusive Forest Economy in Paraguay. Washington, D.C.: World Bank Group.
- Fundación para la Conservación del Bosque Chiquitano [FCBC]. (2021). Experiencias innovadoras de producción sostenible en Paraguay. Santa Cruz de la Sierra.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2003). Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Organización Meteorológica Mundial (OMM), IGES, Japón.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU). IGES, Japón.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2019). Refinamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Suiza.
- Initiative for Climate Action Transparency [ICAT]. (2020). Forest Methodology: Assessing the Greenhouse Gas Impacts of Forest Policies. ICAT Series of Assessment Guides. ICAT/UNEP.
- Masiero, M., & Massarenti, E. (2023). Industria forestal en Paraguay: Desarrollo sostenible de la industria forestal como parte integral de la estrategia de bioeconomía. AL-INVEST Verde.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones [MOPC] & Viceministerio de Minas y Energía [VMME]. (2025). Estimación del consumo y producción de Biomasa forestal con fines energéticos en Paraguay. Asunción: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Paracel. (2022). Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) - Pulp Mill Project. Concepción.
- Sato, T., Saito, M., Ramírez, D., Pérez de Molas, L., Toriyama, J., Monda, Y., Kiyono, Y., Herebia, E., Dubie, N., Duré, E., Ramirez, J. & Vera, M. (2015). Development of Allometric Equations for Tree Biomass in Forest Ecosystems in Paraguay. Japan Agricultural Research Quarterly, 49(3), 281-291.
- Soares-Filho, B.S., et al. (2002). DINAMICA - A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. Ecological Modelling, 154(3), 217-235.
- Volante, J. N., et al. (s.f.). Recent Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Gran Chaco Americano.

9.3. Documentos Técnicos, Fuentes de Datos y Visualización del Proyecto ICAT Paraguay

- ICAT/INFONA. (2025). Resultados de la Consulta a Actores Clave: Drivers de Cambio de Uso de la Tierra en Paraguay. Datos primarios de encuestas a actores clave del sector.
- INFONA. Mapas de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra (Series temporales 2000-2024). Utilizados como Datos de Actividad (DA) para la construcción de las proyecciones y estimaciones GEI.
- Rojas, Y. (2025, 2-4 de diciembre). Materiales de Capacitación y Presentaciones de Diapositivas: "Evaluación de los impactos de políticas forestales en los GEI"; "Estimación de GEI en el Sector UTCUTS"; "Proyecciones de GEI: Enfoques y metodologías". Asunción, Paraguay: Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI) / Proyecto ICAT Paraguay.