

HERRAMIENTA DE PROYECCIONES DE GEI ADAPTADA AL SECTOR FORESTAL

Resultado P

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.



Environment and
Climate Change Canada

Environnement et
Changement climatique Canada



Rialtas na hÉireann
Government of Ireland

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

HERRAMIENTA DE PROYECCIONES DE GEI ADAPTADA AL SECTOR FORESTAL

Initiative for Climate Action Transparency – ICAT

Resultado P

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

SIGLAS Y GLOSARIO TÉCNICO	5
1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO	9
1.1. Justificación de la Herramienta de Proyecciones de GEI del Sector Forestal	9
1.2. Objetivo de la Herramienta de Proyecciones de GEI del Sector Forestal	10
1.3. Alcance del Informe	10
2. ARQUITECTURA GENERAL DE LA HERRAMIENTA DE PROYECCIONES DE GEI	10
2.1. Estructura Modular de la Herramienta	11
2.2. Lógica de Interfaz: Hojas Visibles vs. Hojas Ocultas	12
3. MÓDULO 1: DATOS DE ACTIVIDAD (DA) - INGRESO Y TRANSFORMACIÓN... 14	
3.1. Objetivo del Módulo	14
3.2. Interfaces de Ingreso de Datos	14
3.3. Motor de Transformación Relacional (Proceso de <i>reestructuración</i> a Formato <i>Largo</i>)	15
4. MÓDULO 2: FACTORES DE EMISIÓN (FE) - PARÁMETROS DEL MODELO	16
4.1. Objetivo del Módulo	16
4.2. Niveles Metodológicos y Estratificación	17
4.3. Estructura de las Tablas Paramétricas	18
4.4. Lógica de Interconexión de la base de datos	18
5. MÓDULO 3: MOTOR DE ESTIMACIONES GEI - CÁLCULO Y ECUACIONES..... 19	
5.1. Bloque 1: Tierras Forestales que Permanecen como Tales (TF-TF)..... 19	
5.2. Bloque 2: Tierras No Forestales que pasan a Tierras Forestales (TNF-TF / Plantaciones)..... 21	
5.3. Bloque 3: Tierras Forestales convertidas a Tierras de Cultivo (TF-TC / Deforestación)..... 23	
5.4. Bloque 4: Tierras Forestales convertidas a Pastizales (TF-P)..... 25	
5.5. Bloque 5: Otras Conversiones de Tierras Forestales (Humedales, Asentamientos y Otras Tierras)..... 26	
6. MÓDULO 4: RESULTADOS Y VISUALIZACIÓN..... 28	
7. MANUAL DE USUARIO	30
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	33
9. ANEXO	35

SIGLAS Y GLOSARIO TÉCNICO

Siglas

BAU: *Business as Usual* (Escenario "como siempre" o tendencial).

CO₂ eq: Dióxido de Carbono Equivalente.

DA: Datos de Actividad.

FE: Factores de Emisión.

GC/CC (QA/QC): Garantía de Calidad y Control de Calidad.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GHGMI: Instituto de Gestión de Gases de Efecto Invernadero (*Greenhouse Gas Management Institute*).

ICAT: Iniciativa para la Transparencia en la Acción Climática (*Initiative for Climate Action Transparency*).

IFN: Inventario Forestal Nacional.

INFONA: Instituto Forestal Nacional.

INGEI: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPF: Incentivos a Plantaciones Forestales (Política de mitigación referida a la Ley de Vuelo Forestal).

MOM (DOM): Materia Orgánica Muerta.

RCU: Regulación de Cambio de Uso (Política de mitigación, comúnmente conocida como Ley de Deforestación Cero).

Categorías de Uso de la Tierra (IPCC):

TF: Tierras Forestales.

TC: Tierras de Cultivo.

P: Pastizales.

H: Humedales.

A: Asentamientos.

OT: Otras Tierras.

Glosario de Términos

Datos de Actividad (DA) Son los datos sobre la magnitud de la actividad humana generadora de emisiones o remociones durante un periodo determinado. En el sector forestal, los DA corresponden a las superficies anualizadas (en hectáreas) de cambio de cobertura, mantenimiento de tierras forestales, o los volúmenes de biomasa extraída (en *m³*).

ETL (Extract, Transform, Load / Extraer, Transformar y Cargar): Modelo de procesamiento de datos utilizado en la arquitectura del sistema que separa la interfaz de

experiencia del usuario (ingreso de datos) del motor de procesamiento matricial o cálculo relacional.

Factor de Emisión (FE) Es el coeficiente de relación entre el nivel de actividad y la cantidad de compuesto químico que es la fuente de las emisiones. En la contabilidad forestal, integra parámetros como el contenido de carbono en los depósitos de biomasa viva (ton C/ha), tasas de crecimiento, densidades de madera y factores de expansión de la biomasa.

Formato ancho o de doble entrada (Formato Wide): Estructura de matriz de datos donde las variables se ubican en las columnas y las categorías en las filas, lo que optimiza la lectura y facilita la carga de información por parte del operador de forma intuitiva. En esta herramienta, corresponde a las hojas visibles donde se ingresan los Datos de Actividad antes de ser transformados por el modelo.

Formato largo o de base de datos plana (Formato Long): Estructura de datos normalizada donde cada observación se organiza en una fila única (por ejemplo: Año | Región | Subcategoría | Superficie o Volumen). En esta herramienta, los datos ingresados inicialmente en formato ancho (wide) se reorganizan automáticamente hacia este formato long mediante una operación de reshape (utilizando tablas dinámicas) ubicada en las hojas ocultas del sistema.

Niveles Metodológicos (Tiers del IPCC) Representan el grado de complejidad y precisión de los métodos utilizados para el INGEI:

- **Nivel 1 (Tier 1):** Utiliza métodos básicos y factores de emisión genéricos o por defecto proporcionados por el IPCC.
- **Nivel 2 (Tier 2):** Utiliza la misma ecuación que el Nivel 1 pero emplea factores de emisión específicos del país (ej. derivados del Inventario Forestal Nacional).
- **Nivel 3 (Tier 3):** Utiliza modelos dinámicos, mediciones continuas o inventarios de alta resolución espacial.

Método de Ganancias y Pérdidas (Gain-Loss Method) Metodología del IPCC para calcular el cambio anual en las existencias de carbono (ΔC), en la cual se cuantifican y restan las pérdidas (como la extracción de madera o perturbaciones) de las ganancias (crecimiento natural de la biomasa) ($\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$).

Línea de Base o Escenario BAU (Business as Usual) Es la proyección de las emisiones y absorciones netas de GEI que ocurrirían en el país bajo un escenario futuro inercial, es decir, asumiendo que no se implementan nuevas políticas o medidas de mitigación. Actúa como el punto de referencia contra el cual se mide la reducción de emisiones o "adicionalidad" lograda por políticas como la RCU o IPF.

Reshape (Formato Wide a Long) Técnica de gestión de bases de datos aplicada en la herramienta. Transforma los datos desde una matriz de doble entrada o ancha (**Formato Wide**, optimizada para la lectura y carga humana por categorías y columnas) hacia una estructura de base de datos plana o normalizada (**Formato Long**, estructurada en filas por observación), lo que permite al motor de cálculo procesar la información de forma automatizada.

Funciones de Excel utilizadas en el Motor de Cálculo

Para asegurar la automatización, la integridad relacional de los datos y minimizar el riesgo de errores de transcripción, el modelo matemático de la herramienta se apoya en las siguientes funciones lógicas y de búsqueda de Excel:

- **SUMIFS / SUMAR.SI.CONJUNTO:** Función matemática y trigonométrica que suma los valores de un rango de celdas que cumplen con múltiples criterios o condiciones. En esta herramienta, se utiliza masivamente para buscar y agregar dinámicamente las superficies (hectáreas) desde las bases de Datos de Actividad normalizadas (formato largo), cruzándolas por variables clave como el Año, la Región y/o Estrato Forestal.
- **XLOOKUP / BUSCARX:** Función avanzada de búsqueda que permite encontrar un valor en una matriz y devolver el valor correspondiente de otra columna. El motor de estimaciones la utiliza para conectar los Módulos 1 y 2, buscando y extrayendo el Factor de Emisión exacto (Ej. Crecimiento medio anual, Densidad de la madera o Fracción de Carbono) que le corresponde a cada categoría de tierra o estrato.
- **IF / SI:** Función lógica que evalúa una condición y devuelve un valor si es verdadera y otro si es falsa. En el consolidador del balance de carbono de la herramienta, se utiliza combinada con otras fórmulas para discriminar si un registro corresponde a una ganancia de biomasa (asignándole un valor positivo) o a una extracción/pérdida (asignándole un valor negativo).
- **FILTER / FILTRAR:** Función de matrices dinámicas que permite extraer un subconjunto de datos de una matriz basándose en condiciones definidas. Sirve como mecanismo de control y extracción apuntando a las columnas estáticas del modelo para evitar desfasajes en las matrices de cálculo.
- **POWER QUERY:** Herramienta nativa de extracción, transformación y carga (ETL) de datos en Excel. En el contexto de este modelo, se utiliza como el motor de procesamiento en las hojas ocultas (por ejemplo, DA1.1, DA6.1) para automatizar la normalización de los Datos de Actividad. Su función principal es aplicar una operación de reshape para transformar la estructura de las tablas, reorganizando los datos ingresados por el usuario desde un formato wide (columnas por variable) hacia un formato long (filas por observación).



- **ANULAR DINAMIZACIÓN DE OTRAS COLUMNAS (UNPIVOT):**
Función o comando específico dentro del entorno de Power Query utilizado para realizar la transposición estructural de los datos. Esta acción toma las variables que están distribuidas horizontalmente en múltiples columnas (como las subcategorías "Con fines energéticos" o "Con fines maderables") y las apila verticalmente en una única columna de valores. Es el paso clave de la transformación que permite pasar de una matriz de doble entrada a una base de datos plana, generando filas únicas que el motor de estimaciones de GEI puede buscar y cruzar de manera automatizada.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El sector forestal en Paraguay desempeña un rol fundamental en la mitigación del cambio climático. Para fortalecer la gobernanza y la toma de decisiones basada en evidencia, el Instituto Forestal Nacional (INFONA), con el financiamiento de la Iniciativa para la Transparencia en la Acción Climática (ICAT, por sus siglas en inglés) y el apoyo técnico del Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI), ha llevado a cabo el Proyecto "Desarrollo de un Sistema de Evaluación y Seguimiento de Políticas Forestales".

Dentro de la estructura de implementación del proyecto, la concepción y diseño de esta Herramienta de Proyecciones y Estimaciones GEI se enmarca en el Componente 3: Generar proyecciones de GEI para evaluar el impacto de políticas y medidas forestales, y responde directamente a la Actividad 3.1: Generación de proyecciones de GEI para evaluar el impacto de las políticas y medidas del sector forestal implementadas y/o coordinadas por el INFONA

El objetivo central de este proyecto es dar seguimiento y evaluar la implementación de las políticas, acciones y medidas de mitigación del sector forestal coordinadas por el INFONA, mediante el establecimiento de un sistema integral que incluya la recopilación y gestión continua de datos para determinar su impacto real en los gases de efecto invernadero (GEI).

1.1. Justificación de la Herramienta de Proyecciones de GEI del Sector Forestal

En el marco de los compromisos climáticos internacionales asumidos por Paraguay, particularmente bajo el Acuerdo de París y el Marco Reforzado de Transparencia, resulta fundamental complementar los reportes históricos de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (enfoque ex-post) con herramientas que permitan desarrollar análisis prospectivos (enfoque ex-ante). Estas herramientas permiten anticipar los efectos potenciales de las políticas y medidas forestales implementadas o a implementar en el país, fortaleciendo así la planificación estratégica y la toma de decisiones basada en evidencia.

En este sentido, la creación de la *Herramienta de Proyecciones y Estimaciones GEI* responde directamente a uno de los resultados esperados clave del Proyecto ICAT, específicamente al de "*Desarrollo de proyecciones de GEI para el sector forestal en relación a las políticas y medidas de mitigación coordinadas por el INFONA*".

La estructuración de esta herramienta paramétrica constituye uno de los logros importantes del proyecto, al proporcionar capacidades técnicas para la construcción y evaluación de escenarios de impacto de políticas forestales, así como para el análisis de sus posibles contribuciones a la mitigación del cambio climático.

1.2. Objetivo de la Herramienta de Proyecciones de GEI del Sector Forestal

El objetivo de la herramienta es funcionar como un motor de contabilidad de carbono dinámico y espacialmente explícito, alineado con las directrices del IPCC. Su arquitectura permitirá a los técnicos del INFONA:

- **Cuantificar el impacto de las políticas:** En esta versión, la herramienta se orienta al análisis de las políticas de Regulación de Cambio de Uso (RCU, vinculada a la Ley 2.524/04 y su prórroga Ley 6.676/20) y de Incentivos a Plantaciones Forestales (IPF, vinculada a la Ley 4.890/13), permitiendo estimar su impacto potencial en términos de emisiones y absorciones de GEI.
- **Construir líneas de base y escenarios de mitigación:** Generar proyecciones comparativas entre un escenario de referencia (sin políticas) y un escenario con implementación de medidas, permitiendo estimar la adicionalidad y cuantificar la mitigación en kilotoneladas de CO₂ (kt CO₂).
- **Garantizar transparencia y trazabilidad metodológica:** Al estructurar los Datos de Actividad (DA) y Factores de Emisión/Absorción (FE) en un formato de base de datos relacional, la herramienta facilita la trazabilidad de los supuestos utilizados y asegura que los cálculos sean auditables y reproducibles en el marco de procesos de revisión técnica nacional como internacional.

1.3. Alcance del Informe

Este informe técnico documenta la arquitectura del sistema desarrollado para la elaboración de la herramienta, así como los procedimientos utilizados para la recopilación, transformación y carga de datos. Asimismo, describe los algoritmos y supuestos metodológicos aplicados para la estimación de ganancias y pérdidas de carbono en los depósitos considerados, incluyendo Biomasa, Materia Orgánica Muerta y Suelos.

Finalmente, el documento presenta una guía paso a paso para la correcta utilización y operación de la herramienta por parte de los funcionarios técnicos responsables de su implementación y mantenimiento.

2. ARQUITECTURA GENERAL DE LA HERRAMIENTA DE PROYECCIONES DE GEI

La herramienta ha sido desarrollada siguiendo principios de diseño en bases de datos relacionales y en flujos de trabajo de tipo ETL (*Extract, Transform, Load*). Este sistema de diseño separa de manera clara las etapas de ingreso de datos, procesamiento de cálculos y visualización de resultados.

Esta arquitectura permite optimizar el manejo de la información, reducir el riesgo de errores operativos y asegurar una estructura lógica para el procesamiento de los datos.

Asimismo, contribuye a garantizar el cumplimiento de los principios de transparencia, coherencia y trazabilidad de los cálculos y de las fuentes de información utilizadas.

2.1. Estructura Modular de la Herramienta

La lógica de cálculo de la herramienta se basa en el principio fundamental establecido por las Directrices del IPCC:

Emisiones/Absorciones = Dato de Actividad (DA) × Factor de Emisión/Absorción (FE).

Para operativizar esta ecuación a gran escala, la herramienta se organiza en divide en cuatro módulos secuenciales, identificados visualmente mediante códigos de color, los cuales estructuran el flujo de información desde la entrada de datos hasta la generación de resultados.

- **Módulo 1: Datos de Actividad (DA)**

Contiene la información sobre las dinámicas forestales expresadas en términos de superficie (hectáreas) y volúmenes (m³). Este módulo constituye el punto de entrada de la información y reúne los datos necesarios para caracterizar las actividades o cambios en el uso de la tierra que generan emisiones o absorciones de GEI.

- **Módulo 2: Factores de Emisión/Absorción (FE)**

Funciona como la matriz de coeficientes técnicos de la herramienta. Centraliza los coeficientes utilizados en los cálculos, tales como tasas de crecimiento, densidades de madera, fracciones de carbono, factores de expansión de biomasa y parámetros asociados a suelos minerales, entre otros.

- **Módulo 3: Estimaciones GEI**

Constituye el núcleo de procesamiento de la herramienta. En este módulo se integran los DA y FE para estimar las ganancias y pérdidas de carbono, siguiendo las metodologías establecidas en las Directrices del IPCC.

Importante destacar que en este módulo no se cargan datos manualmente. Las hojas obtienen la información desde los Módulos 1 y 2 mediante funciones lógicas, y a partir de ello ejecutan los cálculos correspondientes utilizando el Método de Ganancias y Pérdidas ($\Delta CG - \Delta CL$).

- **Módulo 4: Resultados**

Consolida las estimaciones de emisiones y absorciones generadas en el Módulo 3. En este módulo se agregan y organizan los resultados para la construcción de la línea de base, tanto histórica como prospectiva, así como para la proyección de los escenarios de mitigación asociados a las políticas analizadas, de manera individual o combinada.

2.2. Lógica de Interfaz: Hojas Visibles vs. Hojas Ocultas

Con el fin de garantizar la integridad de la herramienta y fortalecer los mecanismos de garantía y control de la calidad (QA/QC), la arquitectura de la misma establece una separación lógica entre la interfaz de usuario y los procesos internos de transformación y procesamiento de datos

- **Hojas Visibles (Interfaces de carga y lectura):** Diseñadas para la interacción directa con el usuario. En el Módulo 1 (Ej. DA1-DA6), los datos se ingresan en un formato de doble entrada, lo cual facilita la carga y lectura de información por parte del operador. Asimismo, las hojas correspondientes a Resultados y Factores de Emisión permanecen visibles para permitir la consulta de los valores utilizados en los cálculos y la eventual actualización de parámetros técnico
- **Hojas Ocultas (Motores de transformación de datos):** Estas hojas están diseñadas para el procesamiento interno de la herramienta. Las hojas identificadas con la extensión ".1" (Ej. DA1.1-DA6.1) aplican un proceso automatizado de transformación de datos (mediante consultas de Power Query) que reorganiza la información desde el formato de la matriz. La operación de *Reshape* automatizada mediante tablas dinámicas. Transforman la matriz en formato ancho (*wide*) (amigable para la carga) a un formato largo (*long*) o de base de datos plana (Filas por observación: Año | Categoría | Valor). Mantener estas hojas ocultas reduce el riesgo de modificaciones accidentales por parte del usuario y preserva la estructura relacional de la herramienta, asegurando que el Módulo 3 (Estimaciones) pueda integrar correctamente los DA con los FE.

El siguiente diagrama ilustra el flujo de datos desde la entrada de datos hasta la generación de resultados, mostrando la separación de funciones entre los distintos módulos de la herramienta.

Flujo de Procesamiento de Datos

1 Entrada y Transformación

Hojas Visibles
(Formato Wide)

Proceso ETL
(Transformación)



Hojas Ocultas
(Formato Long / Reshape)

📍 EJEMPLO VISUAL: ¿QUÉ ES EL RESHAPE?

1. Estructura de Entrada (Ancha)

Año	Plantación tipo 1	Plantación tipo 2
2020	150	180



2. Estructura Deseada (Larga)

Año	Tipo	Valor
2020	Plantación tipo 1	150
2020	Plantación tipo 2	180



2 Parámetros

Hojas Visibles
(Base de datos paramétrica FE)



3 Cálculo Matemático

Motor de Estimaciones
(Ecuaciones IPCC)



4 Visualización

Hojas Visibles
(Tabla de resultados y Escenarios)

3. MÓDULO 1: DATOS DE ACTIVIDAD (DA) - INGRESO Y TRANSFORMACIÓN

3.1. Objetivo del Módulo

El Módulo de Datos de Actividad (DA) constituye el principal punto de entrada de información de la herramienta. Su arquitectura ha sido diseñada siguiendo un modelo de procesamiento ETL (Extraer, Transformar y Cargar, por sus siglas en inglés) que separa claramente la interfaz de ingreso de datos utilizada por el usuario del motor interno de procesamiento y estructuración de la información.

Esta separación permite organizar y transformar los datos de manera sistemática antes de su utilización en los cálculos, garantizando una estructura consistente para su integración con los FE. Asimismo, contribuye a asegurar el cumplimiento de los principios establecidos en las Directrices del IPCC, tales como transparencia, consistencia y trazabilidad de los datos utilizados en las estimaciones.

3.2. Interfaces de Ingreso de Datos

Para facilitar la carga de datos históricos y de proyecciones por parte de los operadores, la herramienta dispone de hojas visibles (DA1-DA6) estructuradas en formato ancho o de doble entrada. En estas hojas, las variables (como los años proyectados o las categorías analizadas) se organizan en columnas, lo que permite una lectura, revisión y edición más intuitiva por parte del usuario.

El módulo agrupa los Datos de Actividad (DA) según las principales dinámicas de uso de la tierra consideradas en la herramienta:

- **Tierras Forestales que permanecen como tales (TF-TF):**
 - DA1: Superficies de bosque nativo por estrato forestal.
 - DA2: Volumen de extracción maderable (rollizos) y madera combustible (leña y carbón, tanto de origen nativo como exótico), con datos desagregados por región (Occidental y Oriental) y expresados en m³.
 - DA3: Superficies de plantaciones forestales establecidas en tierras que han mantenido el uso forestal por un periodo mayor a 20 años (independientemente de la edad o ciclo de rotación de la plantación), clasificadas según su finalidad productiva (energética, maderable, entre otras).

- **Aumentos de Carbono / Ingreso a Tierras Forestales (Proyecciones IPF):**
 - DA4, DA4.2 y DA4b: Ingreso anual de superficies correspondientes a nuevas plantaciones forestales. El sistema diferencia la contabilidad de carbono para biomasa (DA4) y para materia orgánica muerta (MOM) y suelos (DA4b), permitiendo modelar los ciclos de corta y turnos de rotación específicos de las plantaciones.
- **Pérdidas de Carbono / Conversiones de Tierras Forestales (Proyecciones RCU):**
 - DA5: Datos de deforestación utilizados para el tratamiento de los depósitos de carbono en suelos minerales asociados a conversiones a Tierras de Cultivo (TC).
 - DA6: Matriz de transiciones explícitas de uso de la tierra. Contiene la superficie de bosque nativo convertida a Tierras de Cultivo (TC), Pastizales (P), Asentamientos (A), Humedales (H) y Otras Tierras (OT). La matriz está estructurada especificando la región, el estrato forestal, y la clase de transición, para una serie temporal extensa organizada en columnas.

3.3. Motor de Transformación Relacional (Proceso de *reestructuración a Formato Largo*)

El núcleo técnico del manejo de datos se encuentra en las hojas ocultas de la herramienta (DA1.1, DA2.1, DA3.1, DA4.1, DA4.4, DA5.1, DA6.1).

Para que el motor de "Estimaciones de GEI" (Módulo 3) pueda buscar y cruzar automáticamente los DA con los FE, la herramienta requiere que la información se encuentre normalizada en formato largo (*long*), evitando posibles desfases entre filas y columnas.

- **Metodología aplicada para la transformación de datos**

En lugar de depender de formulaciones complejas, la herramienta utiliza una funcionalidad nativa de Excel: Power Query. El proceso de transformación se desarrolla de la siguiente manera:

1. **Extracción:** La consulta lee el rango completo de la hoja correspondiente en formato ancho (*wide*), por ejemplo, la matriz de extracción de leña y rollizos en DA2 o la matriz multianual de transiciones en DA6.
2. **Reorganización de datos:** Mediante la función de Anular dinamización de otras columnas (Unpivot) de Power Query, las variables de interés (ej. plantaciones



“Con fines energéticos”, “Con fines maderables”) que estaban distribuidas en múltiples columnas se transponen estructuralmente hacia abajo.

3. **Carga Normalizada:** El resultado es una tabla normalizada donde cada observación corresponde a una fila única, por ejemplo: Año | Región | Subcategoría | Superficie/Volumen.

- **Ventajas de esta arquitectura:**

- **Bajo mantenimiento técnico:** Al basarse en una funcionalidad propia de Excel, no se rompe con cambios en las fórmulas permitiendo procesar grandes volúmenes de datos (como la extensa matriz de DA6) con un bajo consumo de memoria.
- **Escalabilidad:** Si en el futuro se incorporan nuevos años de proyección (ej. 2041-2050), el operador únicamente deberá agregarlos en la hoja correspondiente en formato ancho. Una vez ingresado el dato, utilizar la función “Actualizar Todo” (de la pestaña Datos en Excel) de manera que el sistema de cálculo obtenga los datos más recientes cargados.
- **Control de Calidad Integrado¹:** Esta estructura reduce significativamente el riesgo de errores asociados al cruce manual de celdas. Las hojas de estimación (E1-E18) utilizan funciones de búsqueda condicional (ej. SUMAR.SI.CONJUNTO o FILTER) que operan sobre columnas estandarizadas del formato *largo* (Año, Categoría, Valor), garantizando coherencia y trazabilidad con los cálculos

4. MÓDULO 2: FACTORES DE EMISIÓN (FE) - PARÁMETROS DEL MODELO

4.1. Objetivo del Módulo

El Módulo de Factores de Emisión (FE) actúa como la base de datos de parámetros de la herramienta. Su función es almacenar los coeficientes necesarios para traducir los Datos de Actividad (DA) (superficies en hectáreas o volúmenes en m^3) en estimaciones de emisiones o absorciones de gases de efecto invernadero (GEI).

Las estimaciones se calculan inicialmente en toneladas de Carbono ($t\ C$) y posteriormente se convierten a kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente ($kt\ CO_2\ eq.$).

Al centralizar estos factores en hojas específicas (FE1-FE7), la herramienta permite que cualquier actualización futura (por ejemplo, la incorporación de nuevos resultados

¹ Control de la Calidad.

del Inventario Forestal Nacional) se realice en un único lugar de la herramienta, propagando automáticamente los cambios hacia el motor de estimaciones.

4.2. Niveles Metodológicos y Estratificación

Una de las fortalezas analíticas de esta herramienta es su estricta alineación metodológica con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) reportado en el IBTR. La herramienta replica la combinación de niveles metodológicos y la alta resolución espacial utilizada en el inventario oficial, garantizando la coherencia y trazabilidad de las proyecciones.

En este sentido, la herramienta aplica:

- **Aplicación de Nivel 2 para Biomasa:** Para los depósitos de biomasa viva antes de la conversión (*B_{ANTES}*), la herramienta utiliza valores específicos del país derivados del Inventario Forestal Nacional (IFN 2015 Ajustado 2022) que emplea el INGEI, en lugar de valores genéricos globales.
- **Estratificación Ecológica:** Los Factores de Emisión no son promedios nacionales únicos, sino que están estratificados por subcategoría forestal en perfecta correspondencia con las matrices del inventario nacional:
 - Bosque Sub Húmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP).
 - Bosque Sub Húmedo del Cerrado (BSHC).
 - Bosque Húmedo de la Región Oriental (BHRO).
 - Bosque Seco Chaqueño (BSCH).
 - Bosque Palmer (BP).
 - Plantaciones Forestales.

Estratificación Ecológica: Los Factores de Emisión no son promedios nacionales únicos, sino que están estratificados por subcategoría forestal (ej. Bosque Húmedo, Bosque Sub-Húmedo Inundable, Bosque Seco, etc.) en perfecta correspondencia con las matrices del inventario nacional."

- **Aplicación de Nivel 1 para parámetros globales y suelos:** Para aquellos parámetros donde el país no cuenta con datos específicos, la herramienta utiliza los valores por defecto establecidos en las Directrices del IPCC de 2006 y su Refinamiento de 2019.

Ejemplos de estos parámetros incluyen:

Fracción de Materia Seca (*CF*) establecida en *0.5 ton C (ton d.m.)-1*, factores de cambio de existencias de carbono en suelos (*FLU,FMG,FI*).

4.3. Estructura de las Tablas Paramétricas

Las hojas de FE están organizadas de forma matricial y separadas según la dinámica de uso de la tierra considerada:

- FE1: Tierras Forestales que permanecen como tales (TF-TF).
- FE2: Aumentos de carbono por conversión de Tierras No Forestales (TNF) a Forestales (TF), TNF-TF / Plantaciones.
- FE3-FE7: Pérdidas de carbono asociadas a la deforestación (RCU), segmentadas según el uso final de la tierra (Tierras de Cultivos, Pastizales, Humedales, Asentamientos y Otras Tierras).

Manejo de Depósitos de Carbono en las conversiones

(Ej. Hoja FE7 - Otras Tierras)

El diseño de las tablas contempla los principales depósitos de carbono definidos por el IPCC. En las hojas correspondientes a conversiones de uso de la tierra, se incluyen no sólo parámetros asociados a biomasa, sino también aquellos relacionados a suelos minerales.

Para este propósito, la base de datos incorpora:

- Existencias de Carbono Orgánico del Suelo de Referencia (*SOCref*) ponderadas por estrato forestal (Ej. *40.25 ton C ha-1 año-1* para BSHIRP y *21.89* para BSCH)
- Factores dinámicos de cambio de existencias de carbono en suelos:
 - FLU* (factor de uso del suelo)
 - FMG* (factor de manejo)
 - FI (factor de entrada de materia orgánica)

Estos factores se aplican considerando los estados iniciales ($t=0$) y final ($t=T$) de la transición de uso de la tierra.

4.4. Lógica de Interconexión de la base de datos

Desde la perspectiva de la arquitectura de datos, estas hojas funcionan como tablas de búsqueda de parámetros. Cada registro cuenta con una columna clave (Ej. la columna "Subcategoría" que identifica el estrato forestal, o la columna "Code" que identifica el tipo de parámetro como *BANTES* o *SOCref*).

El Módulo de Estimaciones (E1-E18) utiliza funciones condicionales para recuperar el parámetro correspondiente a cada registro del formato largo de los Datos de Actividad (DA). De esta manera, se asegura la trazabilidad entre cada DA (Ej. una hectárea deforestada o plantada) y su correspondiente impacto en términos de carbono.

5. MÓDULO 3: MOTOR DE ESTIMACIONES GEI - CÁLCULO Y ECUACIONES

El Módulo 3 constituye el motor de estimaciones de la herramienta. En este componente se integran los Datos de Actividad (DA) provenientes del Módulo 1 con los Factores de Emisión (FE) definidos en el Módulo 2, permitiendo estimar los cambios en las existencias de carbono asociados a las distintas dinámicas de uso de la tierra.

Las estimaciones se realizan siguiendo las metodologías establecidas en las Directrices del IPCC (2006) y su Refinamiento 2019, aplicando principalmente el Método de Ganancias y Pérdidas o el Método de Diferencia de Existencias, según la dinámica analizada.

Los resultados se expresan inicialmente como cambios en las existencias de carbono (t C) y posteriormente se convierten a kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente (kt CO₂ eq) mediante el factor estequiométrico 44/12.

5.1. Bloque 1: Tierras Forestales que Permanecen como Tales (TF-TF)

- **Objetivo y Lógica de Cálculo (Método de Ganancias y Pérdidas)**

Este bloque del motor de cálculo cuantifica las absorciones y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a áreas de bosque nativo y plantaciones forestales establecidas (mayores a 20 años).

Metodológicamente, la herramienta aplica el Nivel 2 del IPCC utilizando la ecuación de Ganancias y Pérdidas:

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

donde:

- **ΔC** : Cambio en las existencias anuales de carbono del depósito (expresado en toneladas de Carbono por año). Representa el balance neto de los flujos de carbono en el ecosistema.
- **ΔC_G** : Ganancia anual de carbono (expresada en toneladas de Carbono por año). Cuantifica el crecimiento de la biomasa, capturando las absorciones o el efecto sumidero del bosque y las plantaciones.
- **ΔC_L** : Pérdida anual de carbono (expresada en toneladas de Carbono por año). Cuantifica la reducción de biomasa producida por las extracciones por cosecha de madera, recolección de leña y perturbaciones como la deforestación, contabilizándose como una emisión o fuente hacia la atmósfera.

- **Hoja E1.TFTF: Motor de Ganancias de Biomasa (ΔCG)**

Esta hoja cuantifica el incremento anual de las existencias de carbono asociado al crecimiento de la biomasa forestal.

- **Entrada de Datos de Actividad:** La herramienta utiliza la función condicional SUMAR.SI.CONJUNTO para recuperar y sumar las superficies desde las bases normalizadas DA1.1 (bosque nativo) y DA3.1 (plantaciones permanentes).

La lógica de la fórmula permite identificar automáticamente si la superficie corresponde a bosque nativo o plantaciones forestales.

- **Asignación de parámetros (FE):** Los coeficientes se obtienen dinámicamente desde la base de datos FE1 mediante funciones de búsqueda condicional. Entre los parámetros utilizados se incluyen:

Incremento anual neto (I_v),
Factor de expansión de biomasa (BEF),
Densidad de la madera (D),
Relación raíz/tallo (R)
Fracción de carbono (CF)

Estos parámetros se asignan según el estrato forestal correspondiente.

- **Algoritmo de Cálculo:** El cálculo se desarrolla en una secuencia de variables intermedias:

1. *Factor de conversión y expansión ($BCEF_i$):*

$$BCEF_i = BEF \times D.$$

2. *Crecimiento medio anual (G_{TOTAL}):*

$$G_{TOTAL} = I_v \times BCEF_i \times (1 + R).$$

3. *Incremento de Carbono (ΔCG):*

$$\Delta CG = Superficie \times G_{TOTAL} \times CF$$

- **Hoja E2.TFTF: Motor de Pérdidas de Biomasa (ΔCL)**

Esta hoja calcula las emisiones derivadas de la extracción de biomasa, específicamente rollizos y madera combustible (leña y carbón).

- **Entrada de Datos de Actividad:** los volúmenes anuales extraídos (m^3) se obtienen desde la base de datos DA2.1 mediante funciones SUMAR.SI.CONJUNTO, filtrando por región y tipo de uso.
- **Algoritmo de Cálculo:** Los parámetros BEF, D, R y CF se recuperan desde FE1. La pérdida de carbono se estima transformando el volumen extraído en biomasa total oxidada mediante la ecuación:

$$\text{Volumen} \times (\text{BEF} \times \text{D}) \times (1 + \text{R}) \times \text{CF}.$$

- **Hoja E3.TFTF: Balance y Conversión a CO₂**

Esta hoja consolida el balance de carbono para la categoría TF-TF.

- **Agregación de resultados:** Mediante una función condicional, la hoja unifica las filas de E1 y E2. Si la fila corresponde a una categoría de crecimiento (Ej. Bosque Seco Chaqueño), importa el valor positivo de ΔCG desde E1.TFTF. Si la fila corresponde a una categoría de extracción (Ej. Rollizos o Leña), importa el valor desde E2.TFTF y lo multiplica por -1 para reflejarlo como una pérdida

Transformación a GEI: El cambio anual de existencias de carbono (tC) se convierte a emisiones/absorciones de CO₂ (kt CO₂ .), utilizando el factor estequiométrico ($-44/12$) y se expresa en kilotoneladas de CO₂. Un valor negativo representa una absorción (sumidero), mientras que un valor positivo representa una emisión hacia la atmósfera.

5.2. Bloque 2: Tierras No Forestales que pasan a Tierras Forestales (TNF-TF / Plantaciones)

- **Objetivo y Enfoque Metodológico (Política IPF)**

Este bloque cuantifica el impacto en la mitigación del cambio climático derivado del establecimiento de nuevas plantaciones forestales (forestación/reforestación). La herramienta modela el ingreso progresivo de tierras provenientes de otros usos (como Tierras de Cultivos o Pastizales) hacia la categoría de Tierras Forestales.

Metodológicamente, la herramienta utiliza dos niveles de referencia:

- **Nivel 2 para biomasa:** Utiliza tasas de crecimiento locales e incrementos medios anuales (I_v) derivados de datos específicos del país.
- **Nivel 1 para suelos y materia orgánica muerta (MOM):** Emplea factores por defecto del IPCC y asume una transición de las existencias de carbono a lo largo de un período de 20 años, en coherencia con las ecuaciones 2.23 y 2.25 de las Directrices del IPCC.

- **Arquitectura Dual: Modelo INGEI y Modelo ICAT**

En esta versión, la herramienta separa la contabilidad histórica de la de nuevas políticas de mitigación a partir de 2025. Para ello, el sistema divide el cálculo en dos hojas cuyo diseño se basa en tomar valores procesados previamente (por medio de cálculos auxiliares) para gestionar de forma diferenciada los impactos en la biomasa, los suelos y la materia orgánica muerta (MOM):

- **Hoja E4.TNFTF (INGEI) - Tratamiento Piramidal (2000-2040):** Procesa las superficies acumuladas de plantaciones ya establecidas, cuyos datos provienen de un tratamiento auxiliar previo para separar las dinámicas de cada depósito. Utiliza la función SUMAR.SI.CONJUNTO para absorber las áreas desde DA4a (biomasa) y DA4.4 (suelos y MOM). El cálculo de la ganancia de biomasa (ΔCG) opera multiplicando el área por el Crecimiento medio anual de la biomasa (G_{TOTAL}) y la Fracción de carbono (CF).
 - El tratamiento auxiliar de datos trabaja con hojas distintas para los depósitos. Por ejemplo, utiliza datos específicos para acumular los valores de biomasa y otros exclusivos para el tratamiento para MOM y suelos. Las hojas E4 (INGEI) absorben de estas matrices ya procesadas.
- **Hoja E4.TNFTF (ICAT) - Tratamiento Explícito de Cosechas (2025-2041):** Esta hoja modela explícitamente el ciclo de corta de las nuevas plantaciones. Distingue entre el "Área de tierra convertida" y el "Área Cosechada". Al igual que el modelo histórico provienen de un tratamiento auxiliar previo. Toma las nuevas superficies proyectadas e incorpora su ciclo de corta de manera integral para los tres depósitos: calcula las ganancias y pérdidas directas en la Biomasa por las extracciones, y simultáneamente procesa las transiciones correspondientes para los depósitos de Suelo y MOM.
 - Para poder modelar las nuevas plantaciones y sus ciclos de corta en el modelo ICAT, los datos de actividad originales (que vienen como superficies acumuladas en las proyecciones) requieren un cálculo auxiliar que resta el valor acumulado del año anterior al del año actual, aislando así el flujo anual de nuevas áreas. Sobre estos valores anualizados en el tratamiento auxiliar, se aplican los ciclos de corta (7 años para fines energéticos, 7 para otros fines (celulosa) y 11 para maderables exóticas).

- **Algoritmos de Cálculo en el Modelo ICAT**

El motor de cálculo de la hoja E4.TNFTF (ICAT) integra las siguientes secuencias para generar el balance neto anual:



1. **Cálculo de Ganancias de Biomasa (ΔC_G):** Similar a la hoja INGEI, busca dinámicamente los factores BEF, D, y R en la base FE2 mediante un cruce dinámico de tablas. La ganancia de carbono se estima multiplicando: Superficie Plantada $\times G_{TOTAL} \times CF$.
2. **Cálculo de Pérdidas por Cosecha (ΔCL):** Para reflejar las emisiones en el año de corta, la herramienta incorpora variables de Turno de Corta diferenciadas según el fin productivo de la plantación (Ej. 7 años para fines energéticos, 7 años para otros fines (celulosa) y 11 años para maderables exóticas).

La pérdida de carbono se estima como: Área Cosechada $\times G_{TOTAL} \times Turno \times CF$.

Este procedimiento permite representar la biomasa acumulada que se remueve y oxida en el momento de la tala.

3. **Balance de Biomasa:** El cambio anual neto de existencias de biomasa se obtiene restando las pérdidas por cosecha de las ganancias por crecimiento.
4. **Cálculo de MOM y Suelos Minerales (Transición de 20 años):**
 - o Para MOM: Se calcula la diferencia entre las existencias de referencia de madera muerta/hojarasca bajo el nuevo uso (C_n) y el uso anterior (C_o), distribuyendo el cambio a lo largo de un periodo de transición $T=20$ años.
 - o Para suelos minerales: La herramienta aplica la ecuación del IPCC: $SOC_{ref} \times (FLU_0 \times FMG_0 \times FI_0) - SOC_{ref} \times (FLU_{0-T} \times FMG_{0-T} \times FI_{0-T}) / 20$.

De manera general, esta ecuación del IPCC (basada en la Ecuación 2.25 de las directrices) estima el cambio anual de carbono orgánico en los suelos minerales cuando ocurre un cambio en el uso de la tierra o en sus prácticas de manejo.

Conversión final a gases de efecto invernadero: En la etapa final, la herramienta suma los cambios de carbono estimados para biomasa, MOM y suelos, y posteriormente convierte el resultado a $kt CO_2$ mediante el factor estequiométrico ($-44/12$) y el factor de escala correspondiente. Los valores negativos representan absorciones netas o sumideros generados por la política forestal.

5.3. Bloque 3: Tierras Forestales convertidas a Tierras de Cultivo (TF-TC / Deforestación)

- **Objetivo y Enfoque Metodológico (RCU)**

Este bloque cuantifica las emisiones de Gases de Efecto Invernadero generadas por la deforestación de bosques nativos para su conversión a la agricultura (Tierras de Cultivo). Representa el impacto de la política de Regulación de Cambio de Uso (RCU). El sistema

modela la pérdida de carbono en tres depósitos fundamentales: Biomasa (E5), Materia Orgánica Muerta (E6) y Suelos Minerales (E7), consolidando los resultados en E8.

- **Hoja E5.TFTC: Emisiones por Pérdida de Biomasa (Oxidación Instantánea)**

Para modelar la deforestación, la herramienta aplica la Ecuación 2.15 y 2.16 del IPCC, adaptada a la realidad nacional de conversión hacia cultivos anuales.

El motor de cálculo opera bajo las siguientes premisas y secuencias:

- **Captura de Datos de Actividad:** Utiliza la función SUMAR.SI.CONJUNTO conectada a la matriz de transiciones normalizada DA6.1, filtrando por año, región y estrato forestal deforestado.
- **Búsqueda Paramétrica y Tratamiento de la Fracción de Carbono:** Mediante la anidación de BUSCARX y FILTRAR en la base de datos FE3, el sistema extrae las *Existencias de biomasa antes de la conversión* (B_{ANTES}) específicas de cada estrato.
- **Supuestos Post-Conversión:** Al tratarse de conversiones a cultivos anuales (y no cultivos perennes leñosos), la herramienta asume que la biomasa después de la conversión ($B_{DESPUES}$), el crecimiento post-conversión (ΔCG) y las pérdidas anuales (ΔCL) tienen un valor por defecto de 0.
- **Cálculo Final:** La ecuación de la hoja se simplifica elegantemente a una oxidación inmediata de la biomasa talada: $\Delta CB = -B_{ANTES} \times Area$.

- **Hoja E7.TFTC: Dinámica de Emisiones en Suelos Minerales**

A diferencia de la biomasa que se asume oxidada en el año de conversión, los suelos liberan su carbono gradualmente. El sistema modela esta dinámica aplicando el período de transición de 20 años exigido por el IPCC.

- **Matriz de Transición:** La fórmula SUMAR.SI.CONJUNTO busca los datos de actividad desde una hoja específica para suelos (DA5.1) que rastrea las áreas acumuladas en transición.
- **Ecuación de Cambio de Existencias (SOC):** El sistema calcula la diferencia entre las existencias de carbono en el suelo del uso anterior (bosque) y el nuevo uso (cultivo).
 - Para el momento inicial de la transición ($t=0-T$, bosque nativo), los factores de uso (FLU), gestión (FMG) y entrada de materia orgánica (FI) asumen un valor de referencia neutro o por defecto de 1.
 - Para el momento actual ($t=0$, tierras de cultivo), el sistema busca dinámicamente los factores modificados (Ej. un $FLU0$ establecido en 0.83 o factores de gestión $FMG0$ dependientes del tipo de labranza).

Amortización Temporal: La ecuación calcula la pérdida total de carbono por hectárea y la divide entre el período de transición ($T=20$) para obtener la emisión anual exacta correspondiente al año del inventario.

- **Hojas E6 y E8: Consolidación y Conversión a CO₂ eq**

El sistema procesa la Materia Orgánica Muerta (MOM) en E6.TFTC asumiendo la pérdida de la madera muerta y hojarasca de la categoría bosque. Finalmente, la hoja E8.TFTC suma los vectores de ΔC de Biomasa (E5), MOM (E6) y Suelos (E7). Este balance neto se multiplica por el factor estequiométrico ($-44/12$) y por 0.001, transformando las pérdidas de carbono a emisiones positivas en kilotoneladas de CO₂ equivalente (*kt CO₂ eq.*).

5.4. Bloque 4: Tierras Forestales convertidas a Pastizales (TF-P)

- **Objetivo y Enfoque Metodológico (Dinámica TF-P)**

Este bloque cuantifica las emisiones resultantes de la deforestación de bosques nativos para el establecimiento de pasturas (ganadería). La herramienta captura la capacidad intrínseca de los pastizales para retener una fracción de carbono en su biomasa post-conversión.

El procesamiento se consolida en tres hojas específicas: E9.TFP (Biomasa), E10.TFP (MOM) y E11.TFP (Balance final).

- **Hoja E9.TFP: Dinámica de Biomasa (Método de Diferencia de Existencias)**

Para el modelado de la biomasa, el sistema no asume un crecimiento posterior ($\Delta CG = 0$) ni pérdidas anuales recurrentes ($\Delta CL = 0$), sino que calcula la emisión a través del cambio bruto en el año de la conversión.

- **Ingesta de Datos (DA):** Mediante la función SUMAR.SI.CONJUNTO, la hoja absorbe las hectáreas deforestadas hacia pastizales desde la matriz normalizada DA6.1.
- **Asignación de Biomasa Post-Conversión:** Utilizando BUSCARX vinculado a la base de datos FE4, el sistema asigna un valor por defecto del IPCC a la biomasa de las hierbas/pasturas establecidas tras la deforestación. Estos valores varían por zona climática y ecológica (Ej. *4.1 ton C/ha* para el Bosque Seco Chaqueño y *7.48 ton C/ha* para el Bosque Húmedo de la Región Oriental).
- **Ecuación de Cambio de Existencias:** La fórmula aplicada en la columna final de la matriz es: $\text{Área} * (B_{DESPUES} - B_{ANTES})$. Al restar el alto contenido de carbono del bosque (B_{ANTES}) del menor contenido de la pastura ($B_{DESPUES}$), el sistema genera un valor neto negativo que refleja la magnitud del carbono emitido a la atmósfera por cada hectárea convertida.

- **Hoja E10.TFP: Oxidación de la Materia Orgánica Muerta (MOM)**

Para los depósitos de hojarasca y madera muerta, la herramienta se alinea estrictamente con el supuesto por defecto del Nivel 1 del IPCC.

- **Algoritmo de Pérdida Instantánea:** El sistema asume que, durante la preparación del terreno para pastizales (frecuentemente asociada a desbroce y quema), toda la madera muerta y hojarasca preexistente (*Co*) se elimina.
- **Parametrización:** Las "Existencias bajo la nueva categoría" (*Cn*) se configuran con un valor 0 por defecto, y el período de transición (*Ton*) se fija en 1 año.
- **Ecuación Aplicada:** El cálculo matricial $\text{Área} * (Cn - Co) / Ton$ resulta matemáticamente en la emisión del 100% de las existencias de carbono del bosque original en el mismo año del evento de conversión.

- **Hoja E11.TFP: Consolidación**

La hoja E11.TFP actúa como el sumidero final de la contabilidad de la categoría, sumando los deltas resultantes de Biomasa (E9) y MOM (E10). Esta suma en toneladas de Carbono se multiplica luego por el factor estequiométrico (-44/12) y por 0.001 para obtener la emisión final en kilotoneladas de *CO2* equivalente (*kt CO2 eq.*).

5.5. Bloque 5: Otras Conversiones de Tierras Forestales (Humedales, Asentamientos y Otras Tierras)

- **Objetivo y Enfoque Metodológico**

Este último bloque del motor de cálculo cuantifica las emisiones de Gases de Efecto Invernadero derivadas de las conversiones de bosque nativo hacia usos de la tierra minoritarios pero esenciales para garantizar el principio de exhaustividad. Se analizan tres transiciones: Tierras Forestales a Humedales (TF-H), a Asentamientos (TF-A) y a Otras Tierras (TF-OT).

- **Dinámica TF-H: Tierras Forestales convertidas a Humedales (Hoja E12.TFH)**

Esta categoría captura la deforestación asociada principalmente a la creación de infraestructuras hídricas (como embalses, represas o tajamares). Según las directrices del IPCC, la herramienta asume que los depósitos de carbono después de la conversión equivalen a cero y focaliza la estimación exclusivamente en la pérdida de biomasa.

Para optimizar el sistema, el cálculo se resuelve en una única hoja consolidadora (E12.TFH):



- **Extracción de Datos:** Las áreas convertidas se leen desde la base DA6.1 usando la función matricial SUMAR.SI.CONJUNTO.
- **Factor de Carbono (CF) Específico:** A diferencia de las conversiones terrestres que asumen el carbono integrado en la materia seca del Inventario Forestal, para tierras inundadas el modelo busca el parámetro de *Existencias de Biomasa antes de la conversión* (B_{ANTES}) a través de BUSCARX + FILTRAR en la hoja FE5 y aplica el factor de fracción de carbono por defecto del IPCC para humedales ($CF=0.50$).
- **Ecuación Algorítmica:** La pérdida se calcula multiplicando Área * $(0 - B_{ANTES}) * CF$. Esto modela matemáticamente que toda la biomasa preexistente se pierde y el nuevo humedal no retiene carbono vivo ($B_{DESPUES}=0$). Finalmente, se convierte a emisiones de CO_2 equivalente multiplicando por el factor estequiométrico $(-44/12)$ y dividiendo entre mil (0.001).

- **Dinámica TF-A: Tierras Forestales convertidas a Asentamientos (Hojas E13 a E15)**

Esta dinámica refleja la expansión urbana y de infraestructura sobre áreas boscosas. El modelo computacional es homólogo al de Tierras de Cultivo, procesando los depósitos en paralelo:

- **Biomasa y MOM (Pérdida Inmediata):** En la hoja representativa de Materia Orgánica Muerta (E14 o E15), el algoritmo aplica la Ecuación 2.23 del IPCC. El sistema establece el parámetro de existencias bajo el nuevo uso (C_n) en un valor 0 por defecto y el período de transición (T_{on}) en 1 año por defecto. Esto fuerza a que la ecuación matricial elimine la totalidad de las existencias de madera muerta y hojarasca del bosque nativo en el mismo año en que ocurre el cambio de uso hacia la urbanización.
- **Suelos Minerales:** Al igual que en la dinámica de cultivos, la herramienta respeta el periodo de transición de 20 años para la liberación de carbono de los suelos ante la impermeabilización o alteración del terreno por asentamientos.

- **Dinámica TF-OT: Tierras Forestales convertidas a Otras Tierras (Hojas E16 a E18)**

Actúa como la categoría de cierre del balance de tierras. Su motor algorítmico se basa en una consolidación estricta de variables en la hoja final E18.TFOT.

- **Agregación del Cambio de Existencias (ΔCLu):** La herramienta consolida el impacto extrayendo y sumando mediante SUMAR.SI.CONJUNTO las columnas de resultados de biomasa/MOM (E16) y de la paulatina degradación de los suelos minerales (E17).
- **Balance Vectorial:** La matriz de salida en E18 toma esta sumatoria en toneladas de Carbono (Ej. una pérdida neta reportada en valores positivos de

cambio de existencias) y la somete al factor $(-44/12 \times 0.001)$ para transformarla en Emisiones Anuales de CO_2 ($kt CO_2$ eq.), generando la variable definitiva a reportar.

6. MÓDULO 4: RESULTADOS Y VISUALIZACIÓN

- **Objetivo del Módulo**

Este módulo representa la cúspide de la arquitectura de la herramienta. Su función es agrupar, totalizar y estructurar los datos procesados en el Motor de Estimaciones (Módulo 3) para transformarlos en información estratégica. En esta etapa, el sistema pasa de realizar una contabilidad de carbono por hectárea a generar las **líneas de base y los escenarios prospectivos de mitigación** necesarios para la evaluación de políticas públicas (RCU e IPF).

El módulo se compone de dos interfaces de salida analítica: la hoja Resultado General y la hoja Escenarios.

- **Hoja "Resultado General": Agregador Relacional de GEI**

Esta hoja actúa como una tabla de resultados de la herramienta. Funciona mediante un sistema de consultas que extrae los resultados finales de todas las dinámicas de la tierra procesadas previamente.

La arquitectura de consolidación opera de la siguiente manera:

- **Vectores de Búsqueda:** Utiliza la función condicional SUMAR.SI.CONJUNTO para buscar y sumar los valores en kilotoneladas de CO_2 equivalente ($kt CO_2$ eq.) desde las hojas de estimación correspondientes (E3, E8, E11, E12, E15, E18, y ambas versiones de E4), filtrándose simultáneamente por *Año*, *Región* y *Estrato* o categoría.
- **Integración INGEI-ICAT:** Una característica técnica destacada es la columna TNF-TF, que consolida dinámicamente el crecimiento histórico inercial (E4.TNFTF(INGEI)) con las nuevas proyecciones de impacto de políticas (E4.TNFTF(ICAT)). El modelo realiza aquí la transformación final estequiométrica para el modelo ICAT multiplicando el vector por $(-44/12) \times 0.001$.
- **Balance Sectorial (Emisiones y Absorciones):** Para cumplir con los formatos de reporte del IPCC, la hoja clasifica algebraicamente los resultados:
 - **Emisiones:** Suma las columnas de pérdidas de carbono (deficiencias), agrupando las dinámicas de deforestación hacia Cultivos, Pastizales, Humedales, Asentamientos y Otras Tierras.



- **Absorciones:** Suma las columnas de sumideros o ganancias de carbono, agrupando las Tierras Forestales Permanentes (TF-TF) y las Nuevas Plantaciones (TNF-TF).
- **Balance Neto:** Calcula el impacto final en la atmósfera restando/sumando los vectores de emisiones y absorciones.

- **Hoja "Escenarios": Evaluación de Políticas y Medidas (P&M)**

El objetivo final de la herramienta se cristaliza en esta hoja, la cual modela el impacto prospectivo de las políticas forestales sobre la curva de emisiones nacionales. Utilizando agregaciones desde una matriz base, la herramienta proyecta cuatro trayectorias temporales clave:

- **Línea de base (LB):** Representa el escenario inercial o *Business as Usual (BAU)*, proyectando cómo se comportarían las emisiones del sector forestal si no se aplicara ninguna nueva política.
- **LB + RCU:** Modela el escenario aislando el impacto exclusivo de la política de **Regulación de Cambio de Uso (Ley de Deforestación Cero)**. Permite visualizar la reducción de emisiones atribuible a esta medida.
- **LB + IPF:** Modela el escenario aislando el impacto de la política de **Incentivos a Plantaciones Forestales**. Refleja cómo la curva de absorciones (sumideros) se profundiza por el incremento de biomasa.
- **LB + RCU + IPF:** Es el escenario integral de mitigación. Suma la línea base con el efecto combinado de evitar la deforestación y aumentar la cobertura forestal, mostrando el balance nacional definitivo que Paraguay podría alcanzar.

- **Hoja "Base para Escenarios" Líneas de Referencia (Líneas Base)**

Para garantizar la trazabilidad y la correcta interpretación de los resultados agregados en la hoja "Base para escenarios", la herramienta define estrictamente sus proyecciones de referencia (escenarios sin política) aislando el efecto de las medidas normativas. A modo de transparencia, los valores de referencia se construyen bajo las siguientes premisas:

- **Línea de Referencia IPF (Incentivos a Plantaciones Forestales):** Los valores bajo la columna *IPF Referencia* son generados por medio de la tabla de estimaciones GEI donde se ha mantenido la tasa de crecimiento de nuevas plantaciones forestales (ha) previa a la implementación de la legislación de incentivos a plantaciones (IPF). Esto asume un crecimiento inercial y orgánico de la superficie plantada sin el impulso de la nueva política.
- **Línea de Referencia RCU (Regulación de Cambio de Uso):** Los valores bajo la columna *RCU Referencia* son generados por medio de la tabla de estimaciones GEI donde se ha mantenido la tasa de deforestación previa a la

implementación de la regulación de cambio de uso (Ley de Deforestación Cero). Representa la presión teórica sobre los bosques nativos y las emisiones consecuentes si no existieran las restricciones legales actuales.

Esta diferenciación metodológica es lo que permite que la herramienta calcule la adicionalidad o el impacto neto de las políticas: al restar las Emisiones del Escenario (con política) de las Emisiones de Referencia (sin política), se obtiene la mitigación real (*kt CO₂ eq.*) atribuible a la RCU y a la IPF.

7. MANUAL DE USUARIO

Este apartado está diseñado para guiar al operador de la herramienta en las tareas cotidianas de actualización de datos, calibración de parámetros y lectura de proyecciones, garantizando que no se altere la integridad estructural y matemática del modelo.

Paso 1: ¿Dónde y cómo cargar los Datos de Actividad proyectados?

Para actualizar o ingresar nuevas proyecciones de superficie (hectáreas) o volúmenes de extracción (*m³*), el usuario debe dirigirse exclusivamente al módulo Datos de Actividad (Hojas DA1 a DA6).

1. Identificar la dinámica a actualizar:

- Si se proyectan nuevas superficies de plantaciones (Política IPF), el usuario debe dirigirse a las hojas DA4, DA4.2 (Plantaciones Proyectadas por finalidad) o DA4b.
- Si se proyectan cambios de uso de la tierra o deforestación (Política RCU), el usuario debe dirigirse a las hojas DA5 (Suelos minerales) o DA6 (Matriz de transiciones hacia Cultivos, Pastizales, etc.).

2. Carga en Formato Ancho (*Wide*):

- La carga de datos se realiza de manera intuitiva. El usuario debe ubicar el año de proyección correspondiente en las columnas y la categoría (Ej. "Con fines energéticos" o "Bosque Seco Chaqueño") en las filas.
- Se ingresa el valor numérico físico (superficie en hectáreas o volumen en *m³*) en la celda de intersección.

3. Procesamiento Automático:

- Una vez ingresado el dato, el usuario no necesita realizar ninguna acción adicional más que utilizar la función "Actualizar Todo" (de la pestaña Datos en Excel) de manera que el sistema de cálculo obtenga los datos más recientes cargados. El sistema cuenta con consultas de Power Query en las hojas ocultas (ej. DA6.1) que automáticamente transforman estos nuevos ingresos a un formato largo (*long*) y los inyectan en el motor de cálculo.

Paso 2: ¿Cómo actualizar un Factor de Emisión?

Si el país publica un nuevo Inventario Forestal Nacional o el IPCC actualiza sus valores por defecto, el usuario puede calibrar la herramienta sin necesidad de reescribir fórmulas. Esto se realiza en el módulo Factores de Emisión (Hojas FE1 a FE7).

1. Localizar la hoja paramétrica:

- El usuario debe ir a la hoja correspondiente a la dinámica de la tierra. Por ejemplo, si desea actualizar el carbono de referencia de los suelos en pastizales, irá a FE4; si desea actualizar la biomasa de bosques que permanecen como tales, irá a FE1.

2. Modificar el valor numérico:

- Dentro de la hoja, el usuario debe buscar la fila correspondiente a la Subcategoría (Ej. el estrato forestal "Bosque Húmedo de la Región Oriental") y la columna del parámetro exacto a cambiar (Ej. *B_{ANTES}*, Factor de Expansión *BEF*, Fracción de Carbono *CF*, o factor de uso *FLU*).
- **Precaución (QC):** El usuario debe sobrescribir únicamente el valor numérico. En ninguna circunstancia debe modificar los códigos de búsqueda (Ej. "Code = BEF" o "SOCref") de las columnas llave, ya que el motor de estimaciones utiliza la función BUSCARX combinada con FILTRAR apuntando exactamente a esos textos para extraer la información.

3. Propagación del cálculo:

- Al actualizar el valor en la hoja FE, todo el historial de cálculos y proyecciones futuras en las hojas de Estimaciones (E1 a E18) se recalculará de forma instantánea.

Paso 3: ¿Cómo leer los resultados finales?

Una vez actualizados los Datos de Actividad y verificados los Factores de Emisión, el impacto de las proyecciones se visualiza en el módulo **Resultados**.

1. Hoja "Resultado General":

- El usuario debe dirigirse a esta hoja para observar los valores consolidados. Aquí encontrará el balance algebraico nacional detallado por estratos.
- Para interpretar esta matriz, debe recordar la regla contable de la Convención: los valores negativos representan sumideros o absorciones de la atmósfera (Ej. crecimiento de la biomasa en plantaciones), y los valores positivos representan emisiones hacia la atmósfera (Ej. oxidación por deforestación o quemas). Los valores estarán expresados en kilotoneladas de Dióxido de Carbono equivalente (*ktCO₂* eq.).



2. Hoja "Base para escenarios":

- Para la toma de decisiones, el operador debe concentrarse en las columnas de agregación de esta hoja, que responden a las proyecciones de las políticas.
- **Línea de base (LB):** Muestra la trayectoria de emisiones que tendría el país si no se hubieran implementado las políticas IPF y RCU. Actúa como el escenario inercial.
- **Impacto Aislado:** Observando las columnas **LB+RCU** (solo evitando deforestación) y **LB+IPF** (solo sumando nuevas plantaciones), el usuario puede cuantificar el esfuerzo mitigador individual de cada política.
- **Impacto Nacional (LB+RCU+IPF):** Esta columna muestra la realidad proyectada definitiva. Restando el valor de esta columna al valor de la "Línea de base", el usuario obtiene exactamente el volumen total de GEI mitigado por la implementación conjunta de la normativa forestal en el año seleccionado.

⚠ AVISO IMPORTANTE SOBRE EL CONTROL DE VERSIONES Y TRAZABILIDAD.

La herramienta *no almacena de forma automática* un historial de las distintas proyecciones generadas. Dado que cualquier modificación manual en los Datos de Actividad y/o Factores de Emisión, recalcula instantáneamente los resultados en las hojas de estimación, el cambio sobrescribirá el escenario anterior.

Por lo tanto, es responsabilidad del usuario asegurar la trazabilidad de los datos. Se recomienda que, ante cada modificación de parámetros o creación de un nuevo escenario, el usuario utilice la opción "*Guardar como...*" para generar copias independientes del archivo original (por ejemplo: *Proyecciones_Escenario_Base.xlsx* y *Proyecciones_Escenario_FE_Ajustado.xlsx*). Esto permitirá comparar las distintas versiones y salvaguardar las precauciones de auditoría.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Directrices Metodológicas Internacionales

- 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.

Reportes Nacionales Oficiales y Políticas Públicas

- Instituto Forestal Nacional [INFONA]. (2021). Reporte Nacional de Cobertura Forestal y Cambio de Uso de la Tierra 2000-2020. Asunción, Paraguay.
- 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. Asunción, Paraguay.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADES] / Dirección Nacional de Cambio Climático [DNCC]. (2025). Tercera Contribución Nacionalmente Determinada (NDC 3.0) de la República del Paraguay al 2035 (Borrador). Asunción, Paraguay.

Literatura Científica, Modelado y Ecuaciones Alométricas

- 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.

Presentaciones Técnicas y Materiales de Capacitación

- Rojas, Y. (2025, 2 de diciembre). Evaluación de los impactos de políticas forestales en los GEI: Metodología ICAT [Presentación de diapositivas]. Taller de Presentación de la Evaluación de Impacto de P&M Forestales, Formación de la Herramienta de Seguimiento y Capacitación para la Contabilidad de GEI y Proyecciones Forestales. Asunción, Paraguay: Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI) / Proyecto ICAT Paraguay.
- Rojas, Y. (2025, 3 de diciembre). Estimación de GEI en el Sector UTCUTS: Alcances metodológicos [Presentación de diapositivas]. Taller de Presentación de la Evaluación de Impacto de P&M Forestales, Formación de la Herramienta de Seguimiento y Capacitación para la Contabilidad de GEI y Proyecciones Forestales. Asunción, Paraguay: Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI) / Proyecto ICAT Paraguay.
- Rojas, Y. (2025, 3 de diciembre). Evaluación de Políticas Forestales: Estimación de GEI [Presentación de diapositivas]. Taller de Presentación de la Evaluación de Impacto de P&M Forestales, Formación de la Herramienta de Seguimiento y Capacitación para la Contabilidad de GEI y Proyecciones Forestales. Asunción, Paraguay: Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI) / Proyecto ICAT Paraguay.
- Rojas, Y. (2025, 4 de diciembre). Proyecciones de GEI: Enfoques y metodologías [Presentación de diapositivas]. Taller de Presentación de la Evaluación de Impacto de P&M Forestales, Formación de la Herramienta de Seguimiento y Capacitación para la Contabilidad de GEI y Proyecciones Forestales. Asunción, Paraguay: Greenhouse Gas Management Institute (GHGMI) / Proyecto ICAT Paraguay.