



**MINISTERIO DE
AMBIENTE Y ENERGÍA**

**GOBIERNO
DE COSTA RICA**

**FONDO NACIONAL DE
FINANCIAMIENTO
FORESTAL**

28 DE OCTUBRE DE 2025



"Enfrentamos el cambio climático"

**Proyecto de Compensación Guanacaste III del
Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el
Mercado Doméstico de Carbono (MDC)**

**Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios
Ambientales**

**DEPARTAMENTO DE PROPUESTAS
FONAFIFO**



Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, Departamento de Propuestas	Código: DDC-DP
Proyecto de Compensación Guanacaste III del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el Mercado Doméstico de Carbono (MDC)	Código: MA-DDC-DP-03-2025
	Página: 1 de 30

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	2
2. DEFINICIONES.....	4
3. PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS.....	5
3.1 DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES FÍSICOS DEL PROYECTO	5
4. ESTRATIFICACIÓN	7
SE CONTEMPLAN CONTRATOS ESTABLECIDOS CON LAS ESPECIE TECA Y MELINA, SE TENDRÁ PRIMERAMENTE COMO CRITERIO DE ESTRATIFICACIÓN, EL AÑO DE PLANTACIÓN.....	7
5. CÁLCULOS DEL CARBONO EQUIVALENTE EN EL PROYECTO (CÁLCULOS EX ANTE)	7
5.1. BENEFICIO NETO EN LA REMOCIÓN DE GEI EN EL PROYECTO.....	7
5.1.1 ESTIMACION DE REMOCIONES NETAS DEL PROYECTO	8
5.1.2 EMISIONES DEL PROYECTO	9
5.1.3 DETERMINACION DEL ESCENARIO DE REFERENCIA	10
6. DISTRIBUCION DE PARCELAS DE MUESTREO EN CAMPO.....	11
6.1 VARIABLES A MEDIR.....	11
6.2 METODOLOGIA DE MEDICIÓN	11
7. CÁLCULO DEL CARBONO EQUIVALENTE EN EL PROYECTO (CÁLCULOS EX POST)	12
7.1 DETERMINACION DE LA BIOMASA ALMACENADA TECA.....	12
7.2 DETERMINACION DE LA BIOMASA ALMACENADA MELINA.....	12
7.3 ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA POR HECTAREA.....	13
7.4 ESTIMACION DEL CARBONO ALMACENADO Y SU INCERTIDUMBRE.....	14
7.5 ESTIMACIÓN DEL CAMBIO EN LA RESERVAS DE CARBONO EN LOS ARBOLES ENTRE DOS PUNTOS DE TIEMPO.	16
7.6 ESTIMACION DEL CAMBIO EN EL CARBONO ALMACENADO	16
8. CRECIMIENTO DE LOS ARBOLES Y CALCULO DE REMOCIONES.....	17
8.1 FRECUENCIA DE MUESTREO	17
8.2 INCERTIDUMBRE.....	¡Error! Marcador no definido.
8.3 MONITOREO DE EMISIONES GEI	17
9. ESTIMACIÓN DIRECTA DEL CAMBIO MEDIANTE LA REMEDICION DE PARCELAS DE MUESTREO	19



Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, Departamento de Propuestas	Código: DDC-DP
Proyecto de Compensación Guanacaste III del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el Mercado Doméstico de Carbono (MDC)	Código: MA-DDC-DP-03-2025
	Página: 1 de 30

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección de Desarrollo y Comercialización (DDC) de FONAFIFO, de acuerdo con la Resolución 536-2007 del MINAE publicada en La Gaceta N° 13 el 18 de enero del 2008, tiene como objetivo planificar, dirigir, coordinar, ejecutar, controlar y supervisar los asuntos relacionados con las actividades generadas para el desarrollo y comercialización de servicios ambientales, uno de los cuales es el de mitigación de gases con efecto invernadero, y según el artículo 46 de la Ley Forestal 7575 del año 1996, corresponde a FONAFIFO la captación de recursos financieros para el pago de servicios ambientales en bosques y en plantaciones forestales.

En consecuencia, la DDC desarrolla proyectos para la generación de UCC, sustentados en la Ley Forestal y su Reglamento (Alcance 32-MINAE del año 2012), el Decreto N° 37926-MINAE Reglamento de Operación y Regulación del Mercado Doméstico de Carbono (artículo 80) y lo establecido en el Programa País Carbono Neutralidad 2.0.

De acuerdo con la norma INTE B5:2021, las Organizaciones pueden acceder a diferentes mecanismos de compensación. En caso de la compensación a nivel nacional, hasta que se encuentre en funcionamiento el Mecanismo de Compensación de Costa Rica, los procesos de compensación por medio de Unidades Costarricenses de Compensación (UCC) deberán realizarse por medio Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO).

El presente documento corresponde a la descripción y metodología de cuantificación del Proyecto de Compensación Guanacaste III, para procesos de compensación de



Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, Departamento de Propuestas	Código: DDC-DP
Proyecto de Compensación Guanacaste III del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el Mercado Doméstico de Carbono (MDC)	Código: MA-DDC-DP-03-2025
	Página: 1 de 30

emisiones de gases efecto invernadero en el Mercado Doméstico de Carbono (MDC). Se basa, tanto a nivel ex ante como a nivel ex post, así como la aplicación de una doble medición utilizando sensores remotos en las herramientas metodológicas establecidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), entre ellas:

AR-AMS0007 *“Metodología simplificada de línea base y monitoreo para proyectos MDL de aforestación y reforestación a pequeña escala implementadas en tierras que no son humedales”* (UNFCCC, 2015).

AR-TOOL 14 *“Herramienta metodológica para la estimación de carbono almacenado y cambios en el carbono almacenado en árboles y arbustos en actividades de proyecto A/R MDL”* (UNFCCC, 2013).



Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, Departamento de Propuestas	Código: DDC-DP
Proyecto de Compensación Guanacaste III del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el Mercado Doméstico de Carbono (MDC)	Código: MA-DDC-DP-03-2025
	Página: 1 de 30

2. DEFINICIONES

ADICIONALIDAD: Cualquier actividad que genere reducciones y/o remociones de emisiones de GEI o capte CO₂, más allá de lo que hubiera pasado sin dicha actividad.

CO₂: Dióxido de Carbono

CH₄: Metano

DAP: Diámetro a la altura de pecho

FONAFIFO: Fondo Nacional de Financiamiento Forestal

IDS: Índice de Desarrollo Social

N₂O: Óxido Nitroso

PSA: Pagos por Servicios Ambientales

UCC: Unidades Costarricenses de Compensación

PERMANENCIA: Para el caso de las UCC-FONAFIFO, se realiza mediante el establecimiento de un “buffer” basado en el riesgo de reversión del Proyecto, en donde se determinó que el 12.2% de los créditos de carbono que se cuantifican, deben ser reservados (no vendidos) para cubrir las pérdidas que se pudieran producir durante la vigencia del proyecto.



Dirección de Desarrollo y Comercialización de Servicios Ambientales, Departamento de Propuestas	Código: DDC-DP
Proyecto de Compensación Guanacaste III del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal para el Mercado Doméstico de Carbono (MDC)	Código: MA-DDC-DP-03-2025
	Página: 1 de 30

3. PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS

3.1 DEFINICIÓN DE LOS LÍMITES FÍSICOS DEL PROYECTO

El área de Proyecto de Compensación Guanacaste la integran 36 contratos de Pago por Servicios Ambientales (PSA), actividad reforestación, establecidos entre los años 2020 y 2022 plantados con la especie teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*) con un área plantada efectiva de 469.2 ha.

Las áreas plantadas bajo contratos de PSA, se encuentran distribuidos principalmente en la provincia de Guanacaste (Figura 1), en los cantones de Nicoya, Nandayure Sámará y Abangares.



MINISTERIO DE
AMBIENTE Y ENERGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

FONDO NACIONAL DE
FINANCIAMIENTO
FORESTAL

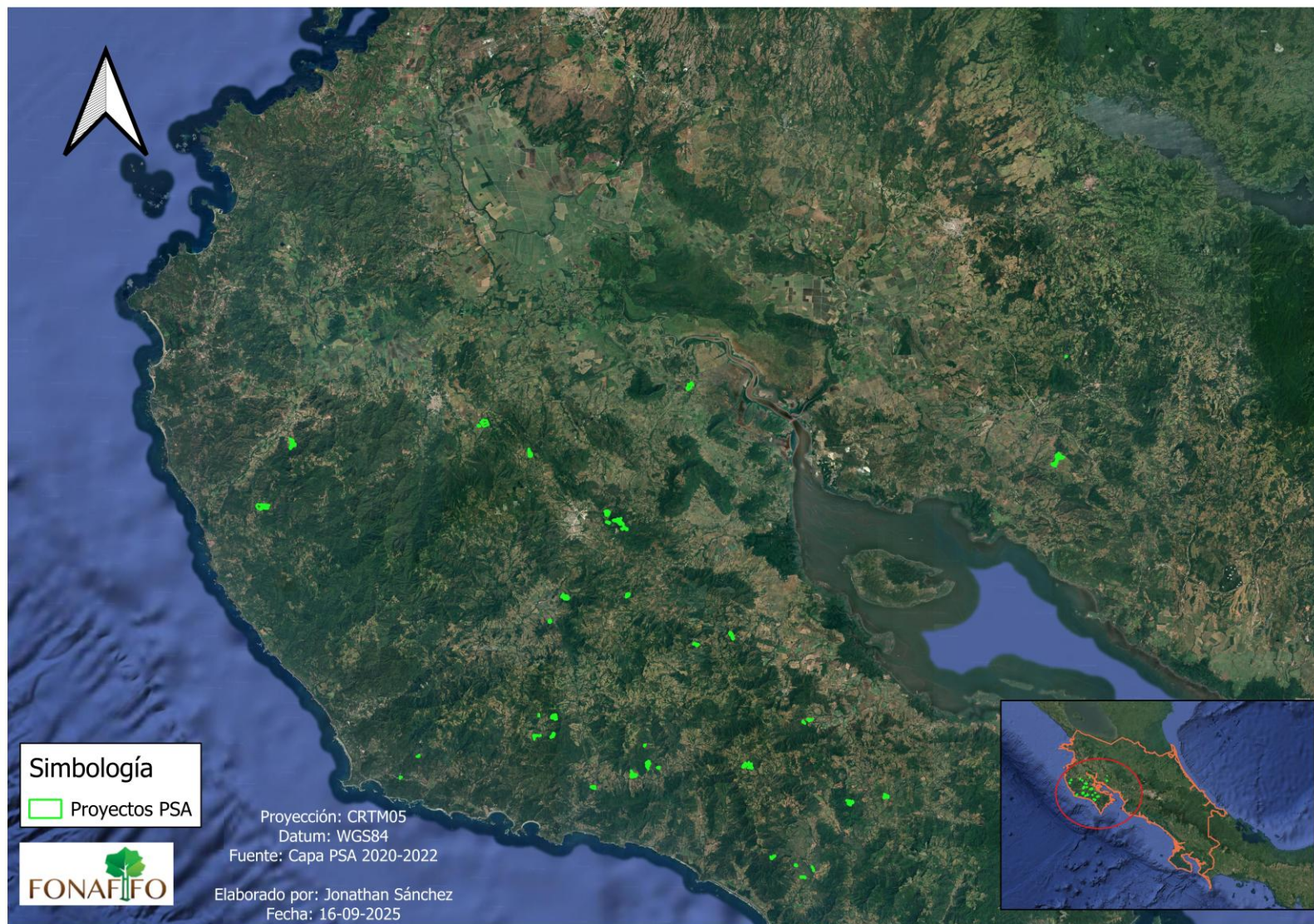


Figura 1: Ubicación de los 36 contratos de reforestación bajo el Pago por Servicios Ambientales considerados dentro del Proyecto de Compensación de GEI Guanacaste III de FONAFIFO.



4 ESTRATIFICACIÓN

Se contemplan contratos establecidos con las especie *Teca* y *Melina*, se tendrá primeramente como criterio de estratificación, el año de plantación.

Cuadro 1: Estratos del Proyecto de Compensación de GEI Guanacaste III en hectáreas por año de establecimiento de la plantación.

Estrato	Especie	Año de establecimiento	Área (ha)
1	<i>Tectona grandis</i>	2020	119.3
2	<i>Tectona grandis</i>	2022	312
3	<i>Gmelina arborea</i>	2020	7.5
4	<i>Gmelina arborea</i>	2022	30.4
Total			469.2

5. CÁLCULOS DEL CARBONO EQUIVALENTE EN EL PROYECTO (CÁLCULOS EX ANTE)

5.1. BENEFICIO NETO EN LA REMOCIÓN DE GEI EN EL PROYECTO

El beneficio neto de las remociones GEI del proyecto se obtiene de la siguiente fórmula (UNFCCC, 2012):

$$\Delta C_{BN, t} = \Delta C_{Actual, t} - \Delta C_{BSL, t} - F_{Total, t} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta C_{BN, t}$	Beneficio neto en la remoción de GEI del proyecto en el año t; MgCO ₂ e *año ⁻¹
$\Delta C_{Actual, t}$	Remociones netas de GEI del proyecto en el año t; MgCO ₂ e*año ⁻¹
$\Delta C_{BSL, t}$	Remociones de GEI en la línea base en el año t; MgCO ₂ e*año ⁻¹
F_{Total}	Fugas totales del proyecto; MgCO ₂ e



5.1.1 ESTIMACION DE REMOCIONES NETAS DEL PROYECTO

Es la estimación previa de las remociones netas reales de gases efecto invernadero atribuible al proyecto. Estas son calculadas con la siguiente ecuación (UNFCCC, 2012):

$$\Delta C_{\text{Actual}, t} = \Delta C_{G, t} - \Delta C_{L, t} - \text{GEI}_{E, t} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta C_{\text{Actual}, t}$	Remociones netas de GEI del proyecto en el año t; $\text{MgCO}_2\text{e} \cdot \text{año}^{-1}$
$\Delta C_{G, t}$	Carbono almacenado debido al crecimiento de biomasa aérea y subterránea en el año t; $\text{MgCO}_2\text{e} \cdot \text{año}^{-1}$.
$\Delta C_{L, t}$	Carbono perdido debido a raleos en el año t; $\text{MgCO}_2\text{e} \cdot \text{año}^{-1}$.
$\text{GEI}_{E, t}$	Incremento en la emisión de gases GEI como resultado de la implementación de las actividades del proyecto en el año t; MgCO_2e .

Con:

$$\Delta C_{G, t} = \sum ((I_{jt} * D_j * \text{FEB}_{2j}) * (1+R_j) * \text{FC}_j * 44/12 * A_T) \quad (3)$$

Donde:

A_T	Área total del proyecto en el año t; hectáreas
R_j	Relación biomasa aérea – biomasa subterránea de los árboles remanentes de la especie j. Sin unidades.
FC_j	Fracción de carbono de la especie j. Sin unidades.
I_{jt}	Incremento corriente anual en el volumen de la especie j; $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$
D_j	Densidad de la madera de la especie j; $\text{kg} \cdot \text{m}^3$.
FEB_{2j}	Factor de la expansión de la biomasa (incluyendo corteza) de la especie j. Sin unidades.

Los resultados de las proyecciones sobre remociones netas del proyecto, el carbono almacenado debido al incremento de la biomasa y el beneficio neto en la remoción GEI del proyecto, se resumen en el Cuadro 2.



5.1.2 EMISIONES DEL PROYECTO

Las emisiones de un proyecto corresponden con las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) provenientes de las actividades que ocurren dentro de los límites del proyecto y que son medibles y atribuibles al mismo (Salinas y Hernández, 2008).

Basado en los acuerdos de la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (Executive Board Meeting 50, anexo 22 “Estimación de emisiones GEI debido a limpieza, quema y eliminación de vegetación atribuible a actividades de proyectos de MDL; Executive Board Meeting Report 42, párrafo 35), las emisiones producto de la limpieza inicial del terreno, limpiezas de mantenimiento de vegetación herbácea, aplicación de fertilizantes y el transporte interno se considerarán insignificantes. Por lo tanto, las emisiones del proyecto se determinarán considerando el consumo de combustibles fósiles producto de las actividades de monitoreo y verificación y se determinará mediante la siguiente ecuación (UNFCCC, 2012):

$$GEI_{E,t} = GEI_{combustible,t} \quad (4)$$

Donde:

$GEI_{Combustible,t}$ Incremento en la emisión de gases GEI como resultado del consumo de combustibles producto de las labores de monitoreo y verificación en el año t; $MgCO_2-e$.

La cuantificación de las emisiones en la etapa ex ante, se realiza restando anualmente (en $MgCO_2$ equivalente) el 1 % del cálculo del carbono almacenado ($\Delta C G, t$) en la remoción de GEI en el proyecto.



5.1.3 DETERMINACION DEL ESCENARIO DE REFERENCIA

La línea base utilizada para los cálculos es una estimación basada en la continuación del uso actual de la tierra (generalmente pastos o cultivos agrícolas). Los cálculos se basan en el trabajo de Chacón y Harvey (2013), quienes realizaron una estimación de la densidad de árboles encontrados en la región de Cañas, Guanacaste.

Se escogió este estudio ya que sus resultados implican una evaluación a nivel de campo de 16 fincas en donde se midieron e identificaron todos los árboles presentes. La densidad reportada fue de 7.8 ± 1.0 árboles, tomado como cálculo del escenario de referencia, el límite superior redondeado, en este caso 9 árboles por hectárea.

Por otro lado, del listado de especies obtenida, se escogió la especie con mayor incremento reportado para la zona, en este caso *Guazuma ulmifolia*, en donde basado en los crecimientos reportados (CATIE, 1991), se calculó un IMA a nivel de volumen de 0.011 m^3 por árbol/año, teniendo entonces un IMA en volumen de $0.099 \text{ m}^3/\text{ha/año}$.

Para las estimaciones de las remociones previas al inicio del proyecto se calcula con la fórmula siguiente (UNFCCC, 2012):

$$\Delta C_{BSL,t} = (I_{jt} * D_j * FEB_{2j}) * (1 + R_{LB,j}) * FC_{LB} * 44/12 * A_T \quad (5)$$

Donde:

$\Delta C_{BSL,t}$	Remociones de GEI en la línea base en el año t; $\text{MgCO}_2\text{-e} * \text{año}^{-1}$
A_T	Área total del proyecto en el año t (841); en hectáreas (ha).
$R_{LB,j}$	Relación biomasa aérea – biomasa subterránea de los árboles remanentes de la especie j (0.26); Sin unidades.
FC_{LB}	Fracción de carbono de los árboles remanentes en el proyecto (0.5); Sin unidades.



I_{jt}	Incremento medio anual en el volumen de la especie j (0.099); $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$
D_j	Densidad de la madera de la especie j (0.52); $kg \cdot m^3$.
FEB_{2j}	Factor de la expansión de la biomasa (incluyendo corteza) de la especie j (1.7); Sin unidades.

Así, las remociones de GEI por año en la línea base para el Proyecto de Compensación de GEI Guanacaste se calculó en $170.04 \text{ MgCO}_2e \cdot año^{-1}$.

6. DISTRIBUCION DE PARCELAS DE MUESTREO EN CAMPO

6.1 VARIABLES A MEDIR

Se establecerá una distribución de parcelas aleatoria, logrando una adecuada distribución de los puntos en cada contrato del proyecto. En cada parcela, las variables a medir son el diámetro a la altura del pecho (DAP) en cm, medida a través de una cinta diamétrica y altura total en m, medida por medio de hipsómetros láser True Pulse 200 o un Forestry Pro (Laser Technology Inc.). Buscando que los ángulos verticales de medición sean siempre llanos, es decir inferiores a 38° .

6.2 METODOLOGIA DE MEDICIÓN

La biomasa de cada contrato PSA reforestación, será determinada a través de parcelas temporales de forma circular de 500 m^2 , de forma que el “n” nunca sea inferior a 4 parcelas. La intensidad mínima de muestreo será del 1 % del área efectiva plantada de cada uno de los contratos considerados y su ubicación se hará no tomando un árbol como centro de la parcela.



7. CÁLCULO DEL CARBONO EQUIVALENTE EN EL PROYECTO (CÁLCULOS EX POST)

7.1 DETERMINACION DE LA BIOMASA ALMACENADA TECA

Aunque existen ecuaciones desarrolladas para esta especie en Costa Rica (por ejemplo, Pérez y Kanninen, 2003), los primeros estimados que se obtuvieron fueron muy altos, por lo que se determinó estimar la biomasa en Teca (*Tectona grandis*), a través de la ecuación general de biomasa de Chave *et al.* (2014):

$$b_{ARB\ i, c, m} = (0,0673 * (\rho * dap^{2*h})^{0,976} * (1+R_j))/1000 \quad (6)$$

Donde:

$b_{ARB\ i, c, m}$ = Biomasa total para el árbol i, contrato c, estrato m; (Mg).

ρ = Densidad de la madera ($g * cm^{-3}$)

dap = Diámetro a la altura del pecho (cm)

h = Altura total (m)

R_j = Relación biomasa aérea – biomasa subterránea de los árboles remanentes de la especie j. Sin unidades.

Para el caso de la Teca se utilizará un valor de R de 0.16 (Kraenzel et al, 2003).

7.2 DETERMINACION DE LA BIOMASA ALMACENADA MELINA

Para el caso de Melina (*Gmelina arborea*), la mejor ecuación disponible para Costa Rica es de cálculo de volumen y es la obtenida por Burbano (sin fecha) y corresponde a:

$$VARB = e^{(-11.64243 + 2.2441 * \ln(dap) + 1.12492 * \ln(h))}$$

Donde:

V = volumen comercial con corteza (m^3)

e = número de Euler (2.7182818...)

dap = diámetro a la altura del pecho (cm)



h = altura total (m)

Así, considerando su volumen, la ecuación a utilizar para la estimación de la biomasa total será (UNFCCC, 2013):

$$BARB_{j,p,i} = VARB_{j,p,i} * D_j * FEB_j * (1+R_j)$$

Donde:

$BARB_{j,p,i}$ Biomasa total por árbol de la especie j , parcela p , estrato i ; kg.

$VARB_{j,p,i}$ Volumen por árbol de la especie j , parcela p , estrato i ; m³.

D_j Densidad de la madera de la especie j ; kg * m³.

FEB_j Factor de la expansión de la biomasa (incluyendo corteza) de la especie j . Sin unidades.

R_j Relación biomasa aérea – biomasa subterránea de los árboles remanentes de la especie j . Sin unidades.

Para el caso de la Melina se utilizará un valor de R de 0.24 (Cairns et al., 1997).

7.3 ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA POR HECTAREA

La estimación de la biomasa promedio por estrato por hectárea será calculada como sigue:

$$b_{ARB\ m} = b_{ARB\ p, c} / n_{p, m} \quad (7)$$

Teniendo:

$$b_{ARB\ p, c} = \sum (b_{ARB\ i, c, m} * 10000 / 500) \quad (8)$$

Y el cálculo de la desviación estándar será con la siguiente ecuación)

$$S_m = ((\sum (b_{ARB\ p, c} - b_{ARB\ c, m})^2) / n_{p, m} - 1)^{0.5} \quad (9)$$

Donde:



$b_{ARB\ m}$	Biomasa promedio por hectárea en el estrato m; (Mg ha ⁻¹)
$b_{ARB\ p, c}$	Biomasa en la parcela p, estrato c; (Mg)
$n_{p, m}$	Cantidad de parcelas p medidas en el estrato m
$b_{ARB\ i, c, m}$	Biomasa total para el árbol i, contrato c, estrato m; (Mg).
S_m	Desviación estándar de la biomasa promedio por hectárea en el estrato m (Mg ha ⁻¹).

7.4 ESTIMACION DEL CARBONO ALMACENADO Y SU INCERTIDUMBRE

El carbono total almacenado en el proyecto se obtendrá mediante la siguiente ecuación:

$$C_{ARB\ T} = \sum (A_T * C_{ARBm}) \quad (10)$$

Donde:

A_T Área total del proyecto en hectáreas; (ha).

El carbono almacenado en el estrato:

$$C_{ARBm} = A_m * (b_{ARBm}) * FC_{ARB} * 44/12 \quad (11)$$

Las incertidumbres asociadas a las estimaciones de la biomasa se obtendrán siguiendo los lineamientos de la UNFCCC (2013) para muestras estratificadas al azar:

$$SE_m = (((S_m)^2 / n_{p, m}) * (1 - (n_{p, m} / n_m)))^{0.5} \quad (12)$$

$$u_c = (Z_{\alpha/2} * SE_m) / b_{ARBm} \quad (13)$$

Donde:

C_{ARBm}	Carbono almacenado en la biomasa del estrato m en el año t; (MgCO ₂ e)
A_m	Área total del estrato m; (ha)
b_{ARBm}	Biomasa promedio por hectárea en el proyecto en el año t; (Mg ha ⁻¹)
FC_{ARB}	Fracción de carbono en la biomasa. Sin unidades.



SE_m	Error estándar de la biomasa por hectárea en el contrato i en el año t ; (Mg ha ⁻¹) ²
S_m	Desviación estándar de la biomasa promedio por hectárea en el estrato m (Mg ha ⁻¹)
$n_{p, m}$	Cantidad de parcelas p medidas en el estrato m
n_m	Cantidad posible de parcelas en el estrato m
u_c	Incertidumbre en C_{ARBm}

Cuando la incertidumbre (u_c) sea mayor a un 10% del valor medio estimado (MgCO₂e), los cálculos obtenidos para b_{ARBm} deben hacerse conservadores, aplicando un factor de descuento, tal y como se establece en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Factor de descuento de la incertidumbre U

Incertidumbre	Descuento (% de U)
$U \leq 10 \%$	0 %
$10 < U \leq 15$	25 %
$15 < U \leq 20$	50 %
$20 < U \leq 30$	75 %
$U > 30$	100 %

Fuente: UNFCCC, 2013.

Cuando la incertidumbre (u_c) sea mayor a un 10% del valor medio estimado (MgCO₂e), los cálculos obtenidos para b_{ARBm} deben hacerse conservadores, aplicando un factor de descuento.

Para reducir aún más dicha incertidumbre se aplicará sobre el estrato en los casos que se amerite una estratificación de área.



7.5 ESTIMACIÓN DEL CAMBIO EN LA RESERVA DE CARBONO EN LOS ARBOLES ENTRE DOS PUNTOS DE TIEMPO.

- **Diferencia de dos estimaciones de stock independientes**

Bajo este método, el cambio en las reservas de carbono en los árboles se estima como la diferencia entre dos estimaciones sucesivas e independientes de las reservas de carbono.

Nota. Se hace necesario también diferenciar si el cálculo es basado en la Diferencia de dos estimaciones de stock independientes. Este método es eficiente cuando la **correlación** entre los valores de biomasa de la parcela en las dos ocasiones está ausente o es débil. (en procesos donde haya dos mediciones).

Se ha determinado que una alta correlación de Pearson se presenta cuando el valor de $R > 0.77$.

7.6 ESTIMACION DEL CAMBIO EN EL CARBONO ALMACENADO

El cambio en el carbono almacenado se calculará asumiendo una tasa de cambio lineal y se calculará como sigue (UNFCCC, 2013):

$$\Delta C_{ARB\ t} = (C_{ARB\ t2} - C_{ARB\ t1}) / T \quad (14)$$

Donde:

$\Delta C_{ARB\ t}$	Tasa de cambio del carbono almacenado en la biomasa del proyecto entre el año t1 y t2; Mg CO ₂ -e
$C_{ARB\ t2}$	Carbono almacenado en el proyecto en el año t2; Mg CO ₂ -e
$C_{ARB\ t1}$	Carbono almacenado en el proyecto en el año t1; Mg CO ₂ -e
T	Lapso de tiempo entre dos estimaciones sucesivas; en años



8. CRECIMIENTO DE LOS ARBOLES Y CALCULO DE REMOCIONES

8.1 FRECUENCIA DE MUESTREO

En los Proyectos de Compensación para el MDC, la frecuencia del monitoreo será al menos cada 3-4 años, buscando una acumulación de carbono importante durante el crecimiento de los árboles y considerando las acciones de manejo que producen emisiones (principalmente raleos).

8.2 MONITOREO DE EMISIONES GEI

La emisión de gases GEI considerada en el Proyecto, es la que resulta del consumo de combustibles producto de las labores de monitoreo y verificación, por lo que se llevará un registro del tipo de vehículo utilizado (marca, modelo, carrocería, entre otros), combustible utilizado, eficiencia del vehículo si se tiene, un registro de combustible consumido (en litros) y kilómetros recorridos en cada viaje.

Por lo tanto, las emisiones serán:

$$GEI_{Combustible, t} = GEI_{CO_2, t} + GEI_{N_2O, t} + GEI_{CH_4, t} \quad (15)$$

Las emisiones por combustible (CO₂) durante la verificación y el monitoreo, se calcularán con la fórmula (Salinas y Hernández, 2008):

$$GEI_{CO_2, t} = \sum_{v=1}^V \sum_{f=1}^F \frac{(FEt_{CO_2} * Consumo_{combustible\ vf, t}) * PCG}{1000} \quad (16)$$

Para el caso de la cuantificación de N₂O y CH₄, se realiza con la siguiente fórmula:

$$GEI_{Combustible, t} = \sum_{v=1}^V \sum_{f=1}^F \frac{(FEt * Consumo_{combustible\ vf, t}) * PCG}{1000000} \quad (17)$$



Teniendo que:

$$\text{Consumo combustible}_{vf, t} = N_{vf, t} * Efi_{vf, t} * Dist_{vf, t} \quad (18)$$

Donde:

$GEI_{\text{Combustible}, t}$	Incremento en la emisión de gases GEI totales como resultado del consumo de combustibles producto de las labores de monitoreo y verificación en el año t; $MgCO_2\text{-e}$.
$GEI_{CO_2, t}$	Incremento en la emisión de gases GEI para CO_2 como resultado del consumo de combustibles producto de las labores de monitoreo y verificación en el año t; $MgCO_2\text{-e}$.
$GEI_{N_2O/CH_4, t}$	Incremento en la emisión de gases GEI para N_2O y CH_4 como resultado del consumo de combustibles producto de las labores de monitoreo y verificación en el año t; $MgCO_2\text{-e}$.
$FE_t CO_2$	Factor de emisión de acuerdo a la lista vigente de factores del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en el año t: kg/l.
FE_t	Factor de emisión de N_2O y CH_4 de acuerdo a la lista vigente de factores del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en el año t: g/l.
PCG	Potencial del calentamiento global por tipo de gas emitido (CO_2 , N_2O y CH_4), de acuerdo a lo recomendado por el IMN. Sin unidades.
V	Tipo de vehículo
F	Tipo de combustible: diésel o gasolina.
$N_{vf, t}$	Número de vehículo de tipo v, combustible f, en el año t.
$Efi_{vf, t}$	Eficiencia de combustible de vehículo v, combustible f, en el año t; l/km



Dist._{vf, t}

Distancia recorrida por el vehículo v, combustible f, en el año t;
km

9. ESTIMACIÓN DIRECTA DEL CAMBIO MEDIANTE LA REMEDICION DE PARCELAS DE MUESTREO

Este método es aplicable únicamente en la estimación ex post de la variación de las reservas de carbono en los árboles para el seguimiento de las actividades de los proyectos. Con este método, las mismas parcelas de muestra se miden en dos ocasiones sucesivas y el cambio de biomasa a nivel de parcela se obtiene restando la biomasa de la parcela en la primera ocasión de la biomasa de la parcela en la segunda ocasión.

Nota. Este método es eficiente cuando existe una correlación significativa entre los valores de biomasa de la parcela en las dos ocasiones (por ejemplo, cuando no ha habido cosecha o perturbación en un estrato y, por lo tanto, no se ha producido una redistribución espacial significativa de la biomasa en el estrato después de la primera estimación).

Con este método, la variación de las reservas de carbono y la incertidumbre asociada se estiman de la siguiente manera:

$$\Delta C_{TREE} = \frac{44}{12} \times CF_{TREE} \times \Delta B_{TREE}$$

Ecuación (19)

$$\Delta B_{TREE} = A \times \Delta b_{TREE}$$

Ecuación (20)



$$\Delta b_{TREE} = \sum_{i=1}^M w_i \times \Delta b_{TREE,i}$$

Ecuación (21)

$$u_{\Delta C} = \frac{t_{VAL} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M w_i^2 \times \frac{S_{\Delta,i}^2}{n_i}}}{|\Delta b_{TREE}|}$$

Ecuación (22)

Dónde:

- ΔC_{TREE} = Cambio en las reservas de carbono en los árboles entre dos mediciones sucesivas; t CO₂e
- CF_{tree} = Fracción de carbono de la biomasa arbórea; t C (t d.m.)⁻¹
Se utiliza un valor predeterminado de 0,47 a menos que se pueda proporcionar información transparente y
- ΔB_{TREE} = Cambio en la biomasa arbórea dentro de los estratos de estimación de biomasa;
- A = Suma de áreas de los estratos de estimación de biomasa; ja
- Δb_{TREE} = Cambio medio de la biomasa arbórea por hectárea dentro de los estratos de estimación de biomasa; t d.m.
- W_i = Relación entre el área del estrato i y la suma de las áreas de biomasa
- $\Delta b_{TREE,i}$ = Cambio medio en las reservas de carbono por hectárea en la biomasa arbórea en el estrato i; t d.m. ha⁻¹
- $u_{\Delta c}$ = Incertidumbre en
- T_{val} = Valor t de Student bilateral para un nivel de confianza del 90 por ciento y grados de libertad iguales a n – M, donde n es el número total de parcelas de muestreo dentro de los estratos de estimación de la biomasa arbórea, y M es el número total
- $S^2_{\Delta,i}$ = Varianza del cambio medio en la biomasa arbórea por hectárea en el estrato i; (t d.m. ha⁻¹)²
- N_i = Número de parcelas de muestreo, en el estrato i, en las que se volvió a medir la biomasa arbórea.



10. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS NO MEDIDOS

Dato / Parámetro	D_j / ρ
Unidades	$g * cm^3$
Descripción	Densidad de la madera de la especie j
Fuente	
0,5 para Tectona grandis	Muñoz y Moreno (2013)
0.52 para escenario de referencia	CATIE (2003)
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	-----
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 3, 5 y 6.

Dato / Parámetro	$FC_j ; FC_{LB} ; FC_{ARB}$
Unidades	Sin unidades
Descripción	Fracción de carbono de los árboles remanentes y medidos en el proyecto
Fuente	
Valor de 0.5 para todas las especies.	IPCC (2003)
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	-----
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 3, 5, 11.

Dato / Parámetro	FE_t
Unidades	Gramos por litro (g/l).
Descripción	Factor de emisión de N_2O y CH_4 en el año t
Fuente	Lista vigente de factores de emisión del Instituto Meteorológico Nacional (IMN)
Valores (IMN, 2023):	
Gasolina (con catalizador) 0.907 para CH_4 y 0.283 para N_2O .	
Diesel 0.149 para CH_4 y 0.154 para N_2O .	
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	Anual.
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 17.



Dato / Parámetro	$FE_t CO_2$
Unidades	Kilogramos por litro (kg/l)
Descripción	Factor de emisión de CO_2 en el año t
Fuente	Lista vigente de factores de emisión del Instituto Meteorológico Nacional (IMN)
IMN (2023)	
2.231 gasolina	
2.613 diesel	
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	Anual.
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 16.
Dato / Parámetro	$FEB_2 j$; FEB_j
Unidades	Sin unidades.
Descripción	Factor de la expansión de la biomasa (incluyendo corteza) para la conversión de la biomasa del tronco a biomasa aérea para la especie j.
Fuente	IPCC (2003)
1.3 en Teca	
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	-----
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 3 y 5.
Dato / Parámetro	I_{jt}
Unidades	$m^3 * ha^{-1} * año^{-1}$
Descripción	Incremento medio anual en el volumen de la especie j.
Fuente	Cubero y Rojas (1999)
11.4 para Teca	
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	-----
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 3 y 5.
Dato / Parámetro	PCG
Unidades	Sin unidades.



Descripción

Potencial del calentamiento global por tipo de gas emitido (CO_2 , N_2O y CH_4).

Fuente

Valores IMN (2023)

Publicación anual del IMN.

$\text{CO}_2 = 1$

$\text{CH}_4 = 21$

$\text{N}_2\text{O} = 310$

Procedimiento de medición

Frecuencia de monitoreo

Anual.

Control de calidad

Comentario

Utilizado en ecuación 16 y 17.

Dato / Parámetro

$R_{LB,j}; R_j$

Unidades

Sin unidades.

Descripción

Relación biomasa aérea – biomasa subterránea de los árboles remanentes de la especie j .

Fuente

R (línea base) 0.14

IPCC (2003)

R Teca 0.16

Kraenzel et al. (2003)

Procedimiento de medición

Frecuencia de monitoreo

Control de calidad

Comentario

Utilizado en ecuación 3, 5 y 6.



11. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS MEDIDOS O CALCULADOS CON DATOS GENERADOS

Dato / Parámetro	A_T
Unidades	Ha
Descripción	Área total del proyecto en el año t
Fuente	Bases de datos actualizadas de los contratos considerados dentro de los límites geográficos del proyecto.
Procedimiento de medición	Suma de las áreas efectivas plantadas.
Frecuencia de monitoreo	Cada año
Control de calidad	Revisión de expedientes, bases de datos, visitas de campo.
Comentario	Utilizado en ecuación 3, 5, 10.

Dato / Parámetro	A_m
Unidades	ha
Descripción	Área del estrato muestreado.
Fuente	Estratificación del proyecto
Procedimiento de medición	Base de datos
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	Revisión anual de base de datos, visitas de revisión de campo.
Comentario	Utilizado en la ecuación 11.

Dato / Parámetro	Altura total (H)
Unidades	m
Descripción	Altura total desde el suelo hasta la parte más alta de la copa.
Fuente	Inventarios de campo.
Procedimiento de medición	Estimación.
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	Medición con instrumento (clinómetro o hipsómetro) de al menos dos árboles (uno de los más altos y uno de los más bajos) dentro de cada parcela de muestreo.
Comentario	Utilizado en ecuación 6.



Dato / Parámetro	DAP
Unidades	cm
Descripción	Diámetro a la altura del pecho (1.3 m desde el nivel más alto de la base del árbol).
Fuente	Inventarios de campo.
Procedimiento de medición	Normas internacionales para la medición de diámetro de árboles en pie.
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	Uso de cinta diamétrica (precisión conocida).
Comentario	Utilizado en ecuación 6.

Dato / Parámetro	Dist. _{vf, t}
Unidades	km
Descripción	Distancia recorrida por el vehículo v, con combustible f, en el año t
Fuente	Registros de kilometraje de los vehículos.
Procedimiento de medición	Odómetro del vehículo.
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	----
Comentario	Utilizado en ecuación 18.

Dato / Parámetro	Efi _{vf, t}
Unidades	Litros/kilómetro (l/km).
Descripción	Eficiencia de combustible de vehículo v, combustible f, en el año t.
Fuente	Facturas de consumo del vehículo.
Procedimiento de medición	Promedio de la cantidad de litros consumidos por kilómetro recorrido.
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	----
Comentario	Utilizado en la ecuación 18.

Dato / Parámetro	F
Unidades	Sin unidades
Descripción	Tipo de combustible consumido: diésel o gasolina.



Fuente	Facturas y registros internos.
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 16 y 17.

Dato / Parámetro	$n_{p,m}$
Unidades	Sin unidades.
Descripción	Número de parcelas de 500 m ² establecidas en el estrato m.
Fuente	Muestreo de campo.
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	N_{vf}, t
Control de calidad	Sin unidades
Comentario	Número de vehículos de tipo v, utilizado en ecuación 7 y 10.
Fuente	Registro de los vehículos utilizados durante las labores de visitas de seguimiento y de monitoreo de contratos dentro de cada proyecto de compensación.
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	Anual
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 18.

Dato / Parámetro	n_m
Unidades	Sin unidades.
Descripción	Número de parcelas de 500 m ² posibles a establecer en el estrato m.
Fuente	Muestreo de campo.
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	-----
Control de calidad	-----
Comentario	Utilizado en ecuación 12.

Dato / Parámetro	V
Unidades	Sin unidades.
Descripción	Tipo de vehículo utilizado.
Fuente	Registros internos.
Procedimiento de medición	-----
Frecuencia de monitoreo	Anual.



Control de calidad
Comentario

Utilizado en ecuación 16 y 17.

Dato / Parámetro

Unidades

Descripción

Fuente

Procedimiento de medición

Frecuencia de monitoreo

Control de calidad

Comentario

T

Años

Lapso de tiempo entre dos
estimaciones sucesivas.

Inventarios de campo.

Utilizado en la ecuación 14.