

NOTAS de INVESTIGACIÓN

- Cuantificación y valoración económica de la captura de CO₂ por plantaciones del género *Eucalyptus* establecidas por el Preca en las cuencas carboníferas de Cesar, Valle del Cauca-Cauca y Altiplano Cundiboyacense

Sandra Ximena Díaz Fonseca
Miguel Angel Molano Morales

87

- Caracterización de la vegetación de la Vía Parque Isla de Salamanca, Magdalena – Colombia.

Héctor Arsenio Tavera Escobar
Néstor Javier Gamba Cubides

102

- Estudio básico de restauración vegetal en áreas de subpáramo degradadas de la vereda Monquentiva – Guatavita

William Ricardo Díaz Santamaría
Carlos Eduardo Torres Torres

116

CUANTIFICACION Y VALORACION ECONOMICA DE LA CAPTURA DE CO₂ POR PLANTACIONES DEL GENERO *EUCALYPTUS* ESTABLECIDAS POR EL PRECA EN LAS CUENCAS CARBONÍFERAS DE CESAR, VALLE DEL CAUCA-CAUCA Y ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE¹

Palabras Claves: Captura de CO₂, *Eucalyptus sp.*, Cuencas carboníferas, Cauca, Valle del Cauca, Boyacá, Colombia

Sandra Ximena Díaz Fonseca²
Miguel Angel Molano Morales²

INTRODUCCION

Este estudio, se dirige en primera medida a cuantificar las toneladas de CO₂ capturadas por el incremento en la biomasa de plantaciones forestales del genero *Eucalyptus* establecidas por el PRECA de Ecocarbon en las cuencas carboníferas del Cesar, Valle del Cauca – Cauca y Altiplano cundiboyacense y en segunda medida a determinar el valor económico que la venta de este servicio ambiental puede representar para un país en vias de desarrollo como Colombia.

Se determinan entonces los resultados obtenidos para cada una de las plantaciones establecidas en cada cuenca carbonífera, y se establecen modelos estadísticos que permitirán calcular la captura de CO₂ realizada por plantaciones de tres diferentes especies de *Eucalyptus* (*E. camaldulensis*, *E. grandis* y *E. globulus*), a partir del volumen en pie del fuste descortezado únicamente.

Con una duración de catorce meses aproximadamente, esta investigación contó con el apoyo económico de la Empresa Nacional Minera MINERCOL LTDA. y el apoyo logístico y

docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Cuantificar y valorar económicamente la captura de CO₂ por plantaciones del género *Eucalyptus*, establecidas por el PRECA en las cuencas carboníferas del Cesar, Valle del Cauca - Cauca y Altiplano Cundiboyacense.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las principales características físicas y fitosanitarias de las plantaciones establecidas por el PRECA, mediante la realización de inventarios forestales.
- Cuantificar el peso de la biomasa verde individual y el porcentaje en peso de cada uno de los compartimentos clasificados para cada individuo.

¹ Resumen del trabajo de tesis de grado dirigido por el Ingeniero Forestal Luis Jairo Silva Herrera, para optar el título de Ingenieros Forestales de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

² Ingenieros Forestales.

- Calcular el contenido de humedad en porcentaje del peso total y por consiguiente, el peso de la biomasa seca de cada uno de los compartimentos del árbol.
- Determinar el porcentaje y el peso del Carbono contenido en la biomasa seca, y derivado de esto, calcular el peso del CO₂ capturado por cada uno de los compartimentos del árbol y en cada uno de los árboles apeados en cada plantación.
- Realizar el análisis estadístico de cada una de las series de datos obtenidas y determinar las diferencias existentes entre los compartimentos del árbol y entre las plantaciones inventariadas.
- Establecer modelos estadísticos, que permitan relacionar diferentes características de los individuos de cada una de las tres especies de *Eucalyptus* en estudio, como por ejemplo el peso seco del fuste descortezado, con el volumen del mismo.
- Implementar inventarios forestales en áreas representativas de cada una de las cuencas carboníferas, que permitan calcular el volumen total en pie del fuste descortezado en el área total reforestada por el PRECA, y por medio de los modelos estadísticos determinados en este estudio, cuantificar el CO₂ total capturado por las plantaciones.

3. LOCALIZACION DEL PROYECTO

El proyecto de investigación se realizó en tres regionales de la empresa Minercol, donde se viene implementando el programa PRECA. Estas regionales son: Altiplano Cundiboyacense, Valle del Cauca-Cauca y Cesar.

3.1 Regional Altiplano Cundiboyacense

En esta cuenca carbonífera, la empresa posee dos seccionales ubicadas en Nobsa, departa-

mento de Boyacá y en Ubaté, departamento de Cundinamarca.

En la zona correspondiente al departamento de Boyacá, se reforestaron 291 ha con *Eucalyptus globulus*, distribuidas en los municipios de Gámeza, Sativasur, Morcá, Nobsa, Samacá, Sogamoso, Mongua, Paz del Rio y Tunja.

Los predios donde se encuentran ubicadas las plantaciones, están situados entre los 2.000 a 2.800 msnm. e incluye las regiones altitudinales del Premontano hasta el Andino. El régimen de lluvias predominante es bimodal con períodos de máxima precipitación en los meses de Abril a Mayo y de Octubre a Noviembre. La temperatura oscila entre 0 a 24°C lo que produce heladas y alta rata de evaporación.

Los suelos de esta región presentan un relieve quebrado a escarpado. En algunos sitios hay afloramientos rocosos y el grado de erosión es de ligero a severo. Estos suelos se han formado a partir de rocas sedimentarias con profundidades efectivas de muy superficiales a moderadamente profundos. Existe presencia de pedregosidad, texturas medias a finas, drenaje natural excesivo, baja fertilidad y suelos ácidos.

En la zona correspondiente al departamento de Cundinamarca, se reforestaron 122 ha, con *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus grandis* en los municipios de Gachetá, Guatavita, Nemocón, Lenguaque, Pacho, Sesquilé, Suesca y Tausa.

La mayor parte de las plantaciones se establecieron en las formaciones ecológicas de bosque seco Montano Bajo (bsMB) y bosque húmedo Premontano (bhPM). La distribución de las lluvias es bimodal, presentando un primer periodo de Marzo a Junio y de Septiembre a Noviembre el segundo. La temperatura varía entre 0 a 23°C con probabilidades de aparición de heladas al principio del año. La mayor parte de la reforestación está entre 2.400 a 2.800

msnm y una pequeña porción está entre 1.800 a 1.900 msnm.

Los terrenos de las plantaciones pertenecen a las unidades de suelos de ladera y laderas de clima frío seco. Químicamente son suelos ácidos a muy ácidos, de moderadamente profundos a superficiales, texturas finas a moderadamente finas, baja fertilidad y con diferentes grados de erosión.

3.2 Regional Valle del Cauca - Cauca

Esta regional comprende los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, en los cuales se han reforestado 696 ha distribuidas en 160 ha para el Valle del Cauca y 536 ha para el Cauca respectivamente, con especies de *Eucalyptus grandis* y el híbrido *urograndis*. Las hectáreas reforestadas y discriminadas por predios corresponden a 17 para el Cauca, en los municipios de El Tambo, Cajibío, Bueno Aires y Morales; y 5 para el Valle en los municipios de Cali, Jumbo y Jamundí.

El área se encuentra en un rango altitudinal que oscila entre los 800 y los 1.800 m.s.n.m. Así mismo presenta una diversidad de climas de acuerdo a su localización, en la parte norte del Cauca, en límites con el departamento del Valle del Cauca, el clima es cálido seco y su precipitación mal distribuida, con promedios que oscilan entre 1.800 a 2.100 mm anuales. El régimen de lluvias es bimodal para los dos departamentos, siendo las áreas del Valle del Cauca más secas, razón por la cual en las áreas reforestadas en el departamento del Valle, cae dos veces menos cantidad de lluvia que en las áreas reforestadas en el departamento del Cauca, donde el suelo tiene agua disponible durante casi todo el año, a excepción de Junio y Julio.

La temperatura es constante durante todo el año, presentándose un ligero aumento durante el mes de agosto. En Cajibío la temperatura os-

cila entre 20.7 y 17°C y en Jamundí-Valle entre 26 y 21.5°C.

La especie estudiada en esta regional es el *Eucalyptus grandis*, que de acuerdo con la literatura reporta unos rendimientos en Colombia de 30 m³/ha/año en promedio, si se tienen en cuenta las labores silviculturales apropiadas como las limpias, fertilizaciones, podas, procedencias, etc.

3.3 Regional Cesar

En este departamento se reforestaron 500 ha en los municipios de Becerril, Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibirico y Valledupar.

La altitud de los cinco municipios oscila entre los 35 a los 300 msnm. Existen variaciones en el comportamiento y en distribución tanto espacial como temporal de la precipitación en las diferentes regiones que comprenden los cuatro municipios carboníferos, influenciados por la presencia de la Serranía del Perijá y las corrientes de aire húmedo. Pero en general la precipitación es del tipo bimodal con períodos de concentración pluviométrica bien definidos. El primero es Abril y Junio y el segundo de Septiembre a Noviembre. La precipitación promedio anual para los cuatro municipios es del orden de 1.600 a 2.000 mm.

La temperatura en la zona oscila entre 26 y 29°C. Esta alcanza los mayores valores promedios durante los meses de Febrero y Marzo.

Se pueden encontrar dos climas principales: Uno corresponde al bosque muy seco tropical (bms-T), presentándose en los alrededores de Valledupar hasta el río Badillo, con una precipitación pluvial inferior a 1.000 mm. anuales y temperaturas medias mensuales de 27 a 29 °C; el otro tipo de clima corresponde al bosque seco tropical (bs-T) que empieza al sur de Valledupar y se extiende por la cuenca del río Cesar, hasta el río Ariguani, la precipitación en esta zona es de 1.000 a 1.300 mm. anuales.

En esta zona la reforestación se hizo con *Eucalyptus camaldulensis*, la cual es una especie que ha mostrado los mejores resultados en diferentes programas de reforestación en América Central, tanto por su rápido crecimiento como por su capacidad de prosperar y producir cosechas aceptables en suelos relativamente pobres y sitios con estación seca prolongada. Además posee una alta capacidad de rebrote por tocón, produce madera dura, pesada, muy coloreada, que aunque no puede emplearse para producción de pasta para papel, si es de buena calidad para leña y producción de muebles de pequeñas dimensiones.

4. METODOLOGIA

4.1 Primera Fase

En esta fase, se realizaron inventarios forestales sobre las plantaciones más representativas de cada cuenca carbonífera, y se implementaron muestreos destructivos a un mínimo de trece árboles por cuenca carbonífera. A partir de este muestreo, se establecieron diversas series de datos por individuo, que permitieron realizar los cálculos de captura de CO₂ individuales, a partir del peso de la biomasa verde en primera medida, y establecer modelos estadísticos que permitieron calcular la captura de CO₂ para el área total reforestada, partiendo únicamente de el volumen en pie del fuste descortezado por hectárea en segunda medida.

4.1.1 Selección de Plantaciones

Para la selección de plantaciones, se tuvo en cuenta la interpretación de la información secundaria y de la cartografía existente en los archivos de MINERCOL, sobre el estado de las plantaciones forestales, resaltándose aspectos como:

- Desarrollo de las plantaciones.

- Estado fitosanitario de las plantaciones.
- Extensión reforestada.
- Índices de mortalidad en las primeras etapas de plantación.

4.1.2 Tamaño e Instalación de Parcelas

En cada uno de los predios seleccionados se instaló una parcela de 1/10 de ha, con dimensiones de 20 x 50 metros. El lado con más longitud de la parcela se extendió a lo largo de las curvas de nivel del predio, mientras que el lado más corto cruzó la pendiente del predio en los casos en que se presentó un relieve inclinado.

4.1.3 Inventarios Forestales

Dentro de cada parcela, se realizó el muestreo de la totalidad de los individuos presentes en cuanto a diámetro y altura se refiere. Con los datos colectados en campo se determinó el volumen en pie presente en cada parcela instalada, mediante tablas de volumen para *E. grandis* y *E. camaldulensis*, mientras que para *E. globulus* se hizo necesario determinar el factor forma de los árboles presentes en campo y calcular el volumen del cilindro normal, multiplicándolo por el factor hallado; ya que por los diámetros tan pequeños no se pueden utilizar tablas de volumen previamente establecidas.

Para determinar los volúmenes en la regional del Altiplano Cundiboyacense fue necesario hallar el factor forma, debido a que las tablas de volumen no eran aplicables a diámetros tan pequeños. Se trabajó entonces con la siguiente ecuación:

$$V.c.c = A.B. \times H \times F.F.$$

Donde V.c.c = Volumen con corteza.

A.B. = Area basal

³ Plan de acción para el Programa de Reforestación PRÉCA. Minercol, Bogotá, Colombia. 1995.

H = Altura

F.F. = Factor forma

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del volumen de las otras dos especies son:

$$\mathbf{V.s.c.: 0.0368162 + 0.31 (D^2) \times h}$$

Donde V.c.c = Volumen con corteza

D = Diámetro a la altura del pecho

H = Altura

$$\mathbf{V.s.c.: 0.0251234 + 0.244 (D^2) \times h}$$

Donde V.s.c = Volumen sin corteza

D = Diámetro a la altura del pecho

H = Altura

4.1.4 Determinación del Peso de la Biomasa Verde por Individuos

La biomasa total del árbol, se determinó en campo, mediante la implementación de un muestreo destructivo, en el cual se apearon y cosecharon un mínimo de trece árboles en las plantaciones de cada cuenca carbonífera. Se tomaron trece árboles por ser un número estadísticamente válido como tamaño mínimo de muestra.

Cada árbol cosechado, se dividió en nueve compartimentos: Ramas superiores, Ramas medias, Ramas inferiores, Hojas superiores, Hojas medias, Hojas inferiores, Fuste, Corteza y Raíz; compartimentos que fueron pesados por separado para determinar el porcentaje que ocupa cada uno, en el peso total del árbol.

4.1.4.a Selección de Individuos

De acuerdo con una rápida interpretación en campo de los datos obtenidos durante el inventario, se determinaron estadísticamente los valores correspondientes a la media aritmética y desviación estándar de los individuos muestreados en cada parcela, al mismo tiempo que se es-

tableció la ubicación de todos estos dentro de la curva de distribución normal.

4.1.4.b Apeo, cosecha y pesaje de individuos

El apeo de los individuos, se realizó con ayuda de motosierra para los individuos de mayor diámetro y con machete o serrucho para los de menor.

La separación de las ramas y hojas de los árboles apeados se realizó con ayuda de las herramientas anteriormente citadas, así mismo la separación de la corteza se hizo de forma manual, golpeándola sucesivamente hasta reventarla y hacer más fácil su desprendimiento.

El fuste fue cortado en partes de un metro y medio en aquellas zonas donde el diámetro era mayor y de dos metros o más en las partes de diámetros pequeños, facilitando su pesaje.

4.1.4.c Determinación del peso total de la raíz

Dada la dificultad y los grandes disturbios que sobre la plantación ocasionaría la extracción de la totalidad de las raíces de los árboles cosechados, se procedió a seleccionar dos de los árboles apeados en cada una de las cuencas carboníferas, a los cuales se les extrajo la totalidad de la raíz encontrada en un hoyo de 3 metros de diámetro, y un metro y medio de profundidad desde la parte baja del tocón. Se separó el fuste y la corteza presentes en el remanente del árbol después del apeo y se pesaron independientemente. Cada uno de estos pesos hallados se calculó en primera medida como porcentaje del peso encontrando en la extracción de la raíz y en segunda medida como porcentaje del peso verde total de cada individuo. De este modo se obtuvo el peso total de la biomasa verde por individuo, incluyendo el peso del compartimento raíz y el peso de la

parte del fuste y corteza aún presente en el tocón del árbol apeado⁴.

4.1.5 Determinación del Contenido de Humedad

De cada uno de los compartimentos separados de los árboles apeados y cosechados, se extrajo una muestra de 200 g., que posteriormente se secó en la estufa a una temperatura que gradualmente subió de 60 a 104°C. Para compartimentos como fuste y raíz, se utilizaron muestras de mayor peso, debido a la dificultad de medición exacta de los mismos.

Con los datos de peso verde y peso seco, se utilizó la fórmula y se obtuvo el contenido de humedad por compartimento de cada uno de los individuos muestreados⁵.

4.1.6 Determinación del Peso de la Biomasa Seca

Partiendo del peso de la biomasa verde por compartimento obtenido en campo y del contenido de humedad de cada uno de éstos, obtenidos en el laboratorio; se determinó el agua contenida dentro de cada compartimento, y este se restó del peso verde total, obteniendo así el peso de la biomasa seca, la misma en donde se deposita la totalidad del Carbono presente en los compartimentos del árbol.

4.1.7 Determinación del Carbono Presente en la Biomasa Seca

4.1.7.a Determinación del Porcentaje de Carbono Presente en la Biomasa Seca

De las muestras tratadas durante la determinación del peso seco, se extrajo un total de cua-

tro gramos (muestras pertenecientes a cada uno de los compartimentos), para realizar el análisis de porcentaje de Carbono presente en la biomasa seca. Los mismos que fueron sometidos a fuego directo hasta lograr su combustión completa, para adelantar el análisis sobre las cenizas residuales de cada muestra. El total de muestras enviadas a laboratorio, dependió directamente del número de árboles apeados en cada cuenca. En total se analizaron 1516 muestras para las tres cuencas carboníferas en estudio, en esta fase del proyecto.

4.1.7.b Determinación del Peso del Carbono Presente en la Biomasa Seca

Con los datos obtenidos del análisis químico (Porcentaje de Carbono por unidad de peso), y el peso de la biomasa seca por compartimento, se determina el peso del Carbono presente en cada compartimento. Utilizando el Carbono como fracción de peso de la biomasa seca.

4.1.8 Determinación del CO₂ Capturado

El CO₂ capturado por árboles individuales, se determinó por medio de aplicaciones matemáticas sencillas, partiendo del peso del Carbono presente en cada compartimento de la biomasa seca y multiplicándolo por la relación existente entre el peso total de la molécula de CO₂ (44) y el átomo de Carbono (12); es decir que por cada Kg. de Carbono encontrado en la biomasa seca del árbol, éste ha capturado 3.66 Kg. de CO₂, con lo cual se calcula el peso el CO₂ capturado por cada compartimento del árbol y el CO₂ total por individuo⁶.

⁴ Rodríguez, Leonidas; Consideraciones sobre la biomasa, composición química y dinámica del bosque pluvial y tropical de Colinas bajas, Bajo Calima, Buenaventura.

⁵ Universidad Distrital; Guía analítica, laboratorio de suelos.

⁶ Raev, Ivan; Asan, Unal. 1997; Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria en las últimas décadas. IX Congreso Forestal Mundial.

4.1.9 Análisis Estadístico

El análisis estadístico, se dividió en cuatro etapas, para las cuales se tomaron como referencia los contenidos de Carbono encontrados. Se realizaron con un nivel de confiabilidad del 95%, incluyendo ANAVA y Test de Krusler – Wallis. El paquete estadístico utilizado es el **STAT GRAPHICS 4.0 PLUS**.

1. Inicialmente se buscó establecer la diferencia estadística existente entre los contenidos de Carbono encontrados en los diferentes estratos en que se dividieron los compartimentos ramas y hojas.
2. Con la unificación de los valores para los estratos de los anteriores compartimentos, el paso a seguir fue el análisis dentro de los grupos, partiendo de los valores de cada compartimento y utilizando todas las combinaciones posibles entre compartimentos.
3. Dentro de este punto, se compararon los contenidos encontrados en cada una de las tres especies en estudio. Del mismo modo, se determinaron todas las posibles combinaciones.
4. En este paso se determinaron los coeficientes, que permitieron calcular los valores de peso del Carbono partiendo del volumen del árbol en pie. Para esto se establecieron relaciones entre:
 - Volumen del fuste / Peso del fuste
 - Peso verde del fuste / Peso verde de los demás compartimentos
 - Peso de la biomasa verde (Por Compartimento)/ Peso del carbono presente en la biomasa seca.

4.2 Segunda Fase

Esta fase, partió de los resultados obtenidos en la fase anterior, en busca de los valores necesarios para despejar los coeficientes hallados; con éstos, los muestreos destructivos no fueron necesarios;

y tanto el inventario, como la toma de muestras se hicieron de los árboles en pie. En esta fase el muestreo se amplió a aproximadamente el 1% del total del área reforestada por cuenca carbonífera, dependiendo de las diferencias en cuanto a desarrollo de las plantaciones establecidas.

4.2.1 Inventarios Forestales

Al igual que en la primera fase se establecieron parcelas de 1/10 de ha., y dentro de cada una se realizaron inventarios forestales, donde fueron muestreados en su totalidad los individuos presentes en cuanto a diámetro y altura se refiere.

4.2.2 Tamaño de la Muestra

Para las tres cuencas carboníferas se establecieron un total de 110 parcelas, con un total de 11.000 individuos muestreados, para un área total muestreada de 11 ha aproximadamente.

Para la obtención del peso seco y el análisis de laboratorio, se analizaron en total 1100 muestras de corteza, fuste, raíz, ramas y hojas, colectadas en campo con un peso de 10 gm.

4.2.3 Determinación del Peso de la Biomasa Verde Total

La determinación del peso de la biomasa verde se realizó mediante la incorporación de los datos de volumen en pie de fuste descortezado las ecuaciones de regresión halladas en la primera fase.

4.2.4 Cuantificación del CO₂ Total Capturado por las Plantaciones

Inicialmente se determinó el peso de cada compartimento según su porcentaje en la biomasa total mediante ecuaciones de regresión. De igual manera con la ayuda de estas ecuaciones se determinó el peso total del carbono presente en la biomasa seca.

Posteriormente se determinó el CO₂ capturado por ha/año en cada plantación mediante la relación mencionada anteriormente (44/12) y este resultado se dividió por la edad de cada plantación para poder determinar no solo la captura total (Stock de Carbono) realizada por dichas plantaciones, sino también el promedio capturado por año. El resultado de esta operación, se dividió entre el total de hectáreas reforestadas en cada cuenca carbonífera y se obtuvo el promedio de captura anual por hectárea en cada regional.

4.3 Valoración Económica

4.3.1 Análisis Económico

4.3.1.a Determinación del costo por tonelada capturada

Para determinar el costo por tonelada capturada de CO₂ en cada cuenca, se partió de dos puntos principalmente: primero, el promedio de captura anual en cada predio y segundo, el uso alternativo de las tierras en donde se establecieron las plantaciones.

El primer punto, se determinó a lo largo de la investigación y el segundo corresponde al costo de oportunidad de los predios en donde se encuentran las plantaciones, de tal modo que el costo de oportunidad de las tierras debe ser compensado por el costo de las toneladas capturadas en el caso de que éstas estuvieran o fueran vendidas, para estos cálculos, el valor de la madera y demás beneficios tangibles de las plantaciones fue despreciado.

Conociendo las propiedades, la vocación y la aptitud de los suelos de las diferentes regionales, se estableció un costo de oportunidad de la tierra, teniendo en cuenta las posibilidades que dichos terrenos pueden tener en usos diferentes al forestal.

4.3.2 Análisis Financiero

La base de este análisis es la comparación entre un proyecto forestal común y otro en el cual se involucran los rubros obtenidos por concepto de venta de toneladas de CO₂ capturadas. El factor de comparación es la variación entre los indicadores financieros de un proyecto a otro (TIR, VNP, relación B/C). El paquete de información que se utilizó es el CASH FLOW.

5. RESULTADOS

Durante la primera fase del proyecto, se establecieron un total de 13 parcelas, repartidas en seis para el altiplano cundiboyacense, cuatro para las plantaciones del Valle del Cauca – Cauca y tres para el Cesar, dentro de las cuales se aparearon y cosecharon un total de 94 individuos, de los cuales se recolectó un total de 846 muestras para la determinación del contenido de humedad, y 1556 para determinación del contenido de Carbono.

5.1 Primera Fase

5.1.1 Inventarios Forestales

5.1.1.1 Selección de plantaciones

Durante el desarrollo de esta fase del proyecto se establecieron un total de 13 parcelas; repartidas en tres para la cuenca carbonífera del Cesar, cuatro para las del Valle del Cauca y Cauca y seis en el Altiplano Cundiboyacense.

5.1.2 Peso y Distribución de la Biomasa Verde por Compartimento

Para *E. grandis* es el fuste, el compartimento que ocupa el mayor porcentaje dentro del peso total por individuo, con un valor de 45%, seguido por la raíz con un 24%, la corteza ocupa un 11% en peso de total por individuo, y el 23.6% del peso total del fuste con corteza; los compartimentos

Tabla 1. Características de las Parcelas Instaladas en la Primera Fase

	MUNIC.	PREDIO	Spp.	S%	H (m)	IMA ALT. (m/año)	DAP (CM)	IMA-DAP (cm/año)	IMA-VOL (m ³ /año)
Altiplano Cundiboyacense	Gámeza	El Yeso	Glóbulus	76	5.0	1.0	4.5	0.9	0.6
	Gámeza	La Mana	Glóbulus	84	11.6	0.6	10.7	0.5	5.7
	Morca	El Potrero	Glóbulus	82.5	7.3	1.5	5.8	1.2	3.4
	Guachetá	Chorrerón	Glóbulus	94	7.2	1.4	6.4	1.3	2.6
	Lenguazaque	La Esperanza	Glóbulus	80	7.0	1.4	6.2	1.2	3.3
	Cucunubá	Peña Colorada	Glóbulus	90	7.6	1.5	6.5	1.3	2.9
Valle del Cauca- Cauca	Cali	C. Elizondo	Grandis	90	10.5	2.1	10.4	2.1	16.8
	Cali	C. Elizondo	Grandis	96	10.1	2.0	10.5	2.1	17.4
	Cali	C. del Valle	Grandis	79	9.3	1.9	8.9	1.8	13.8
	Tambo	Guineal I	Grandis	95	15.4	3.1	13.5	2.8	24.8
Cesar	Valledupar	Caja social	Camaldulensis	44*	11.7	2.3	10.8	2.2	8.0
	Chiriguaná	El Carmen	Camaldulensis	95	13.7	2.7	10.1	2.0	26.9
	Becerril	San Carlos	Camaldulensis	70*	14.5	2.9	12.6	2.5	19.1

* Parcelas en las que se han realizado entresacas, Spp: especies, S%: Porcentaje de sobrevivencia, H: Altura, Ima-Alt: Incremento medio anual de altura, DAP: Diámetro a la altura del pecho, Ima-DAP: Incremento medio anual del DAP, Ima-Vol.: Incremento medio anual del Volumen.

ramas y hojas ocupan los menores porcentajes en peso dentro de cada uno de los individuos apeados, con 13% y 7% respectivamente.

El compartimento con mayor representación dentro del peso de la biomasa verde en *E. camaldulensis* es el fuste con el 54 % del peso total, la corteza ocupa el 12% del peso total y el 17.5% del peso total del fuste con corteza; las ramas y las hojas, son los compartimentos que ocupan un menor porcentaje con el 6% y 7% respectivamente. El porcentaje ocupado por la raíz en esta especie, se determinó en el 22%.

El fuste en *E. globulus*, al igual que en las otras dos especies, ocupa el mayor porcentaje con 42%, seguido por las hojas que a diferencia del *E. grandis* y *E. camaldulensis*, ocupan un 18% del peso total, lo cual responde al bajo porte de los árboles inventariados, y a la presencia de gran número de ramificaciones desde la base del fuste.

Ramas, corteza y raíz, ocupan porcentajes muy similares, con 12% para las dos primeras y 16 %

para la última. El bajo porcentaje que ocupa la raíz, responde a la presencia de pedregosidad en los suelos sobre los cuales se establecieron las plantaciones, lo que dificulta considerablemente la penetración y profundización de estas.

En la **Figura 1**, se comparan las diferentes distribuciones que adoptan cada una de las tres especies de *Eucalyptus* investigadas.

5.1.3 Contenido de Humedad

El contenido de humedad promedio para los 31 árboles apeados y cosechados en la cuenca carbonífera del Valle del Cauca, es de 54.5%, dentro del que se destaca la corteza, con un contenido promedio para estos individuos de 60.1%. El compartimento que en *E. grandis* mostró menor contenido de humedad fue el de las ramas con un porcentaje promedio cercano al 50.3%; el fuste, las hojas y la raíz mostraron contenidos intermedios que oscilaron entre el 52 y el 56%.

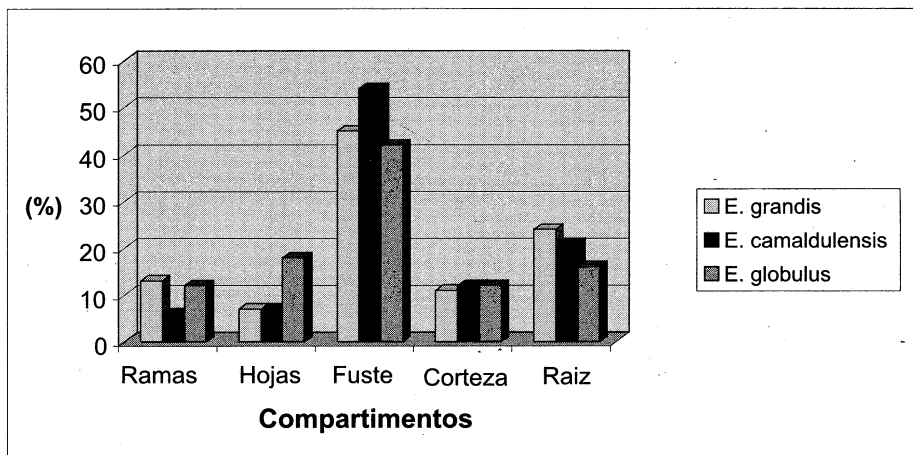


Figura 1. Distribución de la biomasa verde por comportamiento en tres especies de *Eucalyptus*.

La corteza en *E. camaldulensis* al igual que en *E. grandis*, presenta el mayor contenido de humedad, con un valor promedio de 56%, las hojas también presentan un alto contenido de humedad con un valor promedio de 52%, el fuste presenta un valor de 48%, y los compartimentos ramas y raíz presentan contenidos de humedad iguales, con un valor de 44%.

El contenido de humedad promedio, determinado para *E. glóbulus*, es el más alto de las tres especies en estudio, con un valor de 54.2%. Los valores encontrados para las hojas y la corteza, son muy similares, con promedios de 55.8% y 56.1% respectivamente. La raíz, es el compartimento que en *E. glóbulus* reporta el menor contenido de humedad con un promedio de 51.2%, el fuste y las ramas, presentan contenidos similares, con 52.2 y 52.4% respectivamente.

5.1.4 Peso y Distribución de la Biomasa Seca por Compartimiento

El peso de la biomasa seca, para *E. grandis*, corresponde exactamente al 45.8% del peso total de la biomasa verde. La distribución de los compartimentos, en la biomasa seca varía considerablemente en relación con la distribución observada en la biomasa verde, principalmente

para compartimentos como la corteza, que pasa de ocupar el 11% dentro de la biomasa verde, al 9% en la biomasa seca, lo cual responde al alto contenido de humedad de este compartimento. El fuste y las ramas, varían igualmente su porcentaje, pasando del 45% al 47% para el fuste y del 13% al 14% para las ramas. La raíz y las hojas, no muestran variaciones importantes (apenas el 1% del ocupado inicialmente, para la raíz).

El peso de la biomasa seca de *E. glóbulus*, corresponde al 45.7% del peso determinado para la biomasa verde. La distribución no varía de manera considerable para ninguno de los compartimentos, ya que el fuste, la corteza y la raíz, continúan con los mismos valores calculados para la distribución del peso de la biomasa verde; mientras que hojas y ramas varían apenas en un 1% con respecto a los valores iniciales.

5.1.5 Contenido de Carbono

El porcentaje de Carbono promedio calculado, para los 22 individuos apeados y analizados en laboratorio para *E. grandis*, es de 45.1%, dentro del cual, los resultados por compartimento varían desde un 41.8% en la corteza, hasta el 48% en el fuste. Las ramas se ubican justamente en el promedio encontrado para el total de los individuos con 45%,

la raíz y las hojas, tienen porcentajes de Carbono muy similares dentro de su composición química, con 44.1% y 43.5% respectivamente.

El contenido de Carbono mas bajo encontrado para *E. camaldulensis* en el análisis de laboratorio, correspondió a la corteza con un 39.4%, seguido en orden ascendente por las ramas y las hojas., con un 44.5% y 45.7% respectivamente, la raíz con el 46.4% y el fuste con 49.8% mostraron los valores promedio de contenido de Carbono mas altos para esta especie. El porcentaje de Carbono promedio contenido en la biomasa seca de *E. Camaldulensis* es de 45.12%.

Las hojas, presentan el menor contenido de Carbono de todos los compartimentos de *E. globulus*, con un valor promedio para los 22 individuos analizados de 39.8%; la corteza también presenta un valor muy bajo con 42.8%, el fuste presenta dentro de esta especie el valor promedio mas alto, con 49.4%. Para la raíz y las ramas, se determinó un valor muy similar; 44.1% para las primeras y 44.2% para las segundas respectivamente.

En la **Figura 2**, se compara el porcentaje de Carbono determinado para cada compartimento, incluyendo los tres estratos en que se dividieron las hojas y las ramas, en las tres especies de *Eucalyptus*.

5.1.6 Análisis Estadísticos

- Análisis del contenido de Carbono encontrado para cada compartimento.

Mediante este análisis, se verificó la no existencia de diferencias estadísticas significativas entre el contenido de Carbono determinado para los tres estratos en que se dividieron los compartimentos hojas y ramas en las tres especies en estudio; bajo un nivel de confiabilidad del 95%. Por lo tanto, los resultados de peso encontrados para los tres estratos, se deben tratar conjuntamente.

Los demás compartimentos, mostraron diferencias significativas entre si, observándose las mas grandes variaciones entre el fuste y los demás compartimentos, especialmente la corteza.

En este punto, también se determinaron modelos estadísticos, que permitieron relacionar el volumen de fuste descortezado calculado en campo, con el peso seco del mismo calculado posteriormente del calculo del contenido de humedad. Del mismo modo, se establecieron modelos para relacionar el peso seco con el peso verde del fuste descortezado y este ultimo con el peso verde de los demás compartimentos.

Por último se relaciona el peso verde de cada uno de los compartimentos con el peso del Carbono contenido en la biomasa seca del mismo.

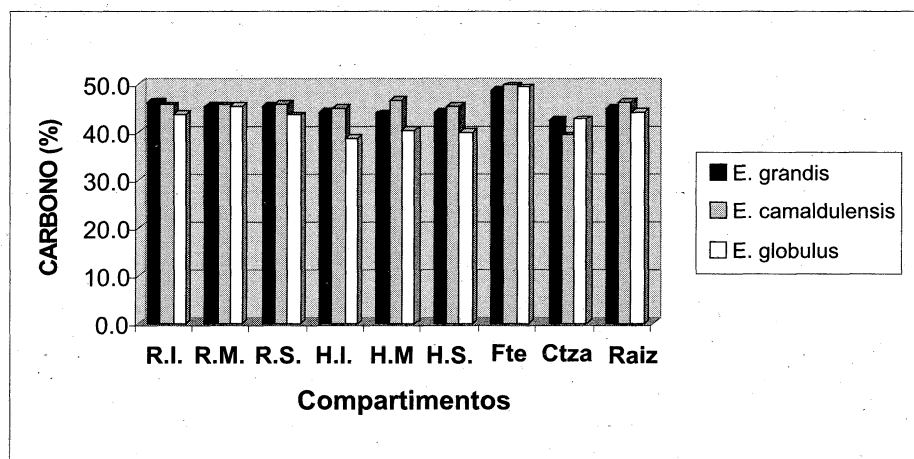


Figura 2. Comparación del contenido de carbono por compartimentos en tres especies de *Eucalyptus*.

Los resultados de la prueba de rangos múltiples para las tres especies de *Eucalyptus*, muestran la conformación de cinco grupos homogéneos, repartidos en orden ascendente de la media de la siguiente manera, el primero conformado únicamente por la corteza; el segundo, conformado por los tres compartimentos en los que se dividieron las hojas; el tercero, en el cual únicamente se ubica la raíz; el cuarto en el que se ubican los tres compartimentos que conforman la totalidad de las ramas; y el quinto conformado únicamente por el fuste.

• Determinación de Modelos Estadísticos

Relación del volumen con el peso seco del fuste descortezado

$$E. grandis \rightarrow \text{Peso Seco} = -0.00887302 + 0.530355 * \text{Vol. grandis}$$

$$E. camaldulensis \rightarrow \text{Peso Seco} = 0.000195804 + 0.517483 * \text{Vol. camaldulensis}$$

$$E. globulus \rightarrow \text{Peso Seco} = -0.0156685 + 0.52666 * \text{Vol. globulus}$$

Relación entre el peso seco y el peso verde del fuste descortezado

$$E. grandis \rightarrow \text{Peso Verde} = 0.287143 + 2.09834 * \text{P. Seco. grandis}$$

$$E. camaldulensis \rightarrow \text{Peso Verde} = -0.432598 + 2.10662 * \text{P. Seco camaldulensis}$$

$$E. globulus \rightarrow \text{Peso Verde} = 0.117158 + 2.13194 * \text{P. Seco. globulus}$$

Tabla 2, Relaciones entre el peso verde del Fuste, el peso verde y el peso del Carbono de los compartimentos para *E. grandis*

	Hojas	Ramas	Corteza	Raíz	Fuste
Peso Verde	=0.03+0.137	=0.73+0.358	=0.48+0.249	=1.43+0.489	
	* P.v.f.g.	* P.v.f.g.	* P.v.f.g.	* P.v.f.g.	
Peso Carbono	=0.03+0.179	=0.01+0.227	=0.01+0.160	=0.07+0.191	=0.06+0.225
	* P.v.h.	* P.v.r.	* P.v.c.	* P.v.rz.	* P.v.f.

* P.v.f.g = Peso Verde del Fuste de *Eucalyptus grandis*

** P.v.h, r, c, rz. = Peso verde de las hojas, ramas, corteza, raíz y fuste.

Tabla 3, Relaciones entre el peso verde del Fuste, el peso verde y el peso del Carbono de los compartimentos para *E. camaldulensis*

	Hojas	Ramas	Corteza	Raíz	Fuste
Peso Verde	=0.09+0.176	=1.13+0.09	=0.97+0.217	=1.16+0.418	
	* P.v.f.c.	* P.v.f.c.	* P.v.f.c.	* P.v.f.c.	
Peso Carbono	=0.06+0.191	=0.03+0.247	=0.252+0.133	=0.01+0.245	=1.28+0.281
	* P.v.h.	* P.v.r.	* P.v.c.	* P.v.rz.	* P.v.f.

Tabla 4, Relaciones entre el peso verde del Fuste, el peso verde y el peso del Carbono de los compartimentos para *E. globulus*

	Hojas	Ramas	Corteza	Raíz	Fuste
Peso Verde	=1.34+0.294	=0.22+0.316	=0.60+0.239	=0.20+0.340	
	* P.v.f.gl.	* P.v.f.gl.	* P.v.f.gl.	* P.v.f.gl.	
Peso Carbono	=0.12+0.206	=0.07+0.247	=0.03+0.210	=0.05+0.232	0.17+0.257
	* P.v.h.	* P.v.r.	* P.v.c.	* P.v.rz.	* P.v.f.

5.1.7 Captura de CO₂

Los valores totales de captura de CO₂, se determinaron a partir del volumen calculado mediante la implementación de inventarios forestales en 110 parcelas instaladas en las plantaciones de las tres cuencas carboníferas en estudio, con los cuales se determinaron los volúmenes de fuste descortezado

en pie de las plantaciones de cada una de las cuencas carboníferas, y a su vez con el uso de los modelos estadísticos, los siguientes resultados:

Con estos resultados, se obtienen promedios por hectárea de 5.79, 21.7 y 24.67 Tn de CO₂/ha/año para las plantaciones del altiplano, Cesar y Valle del Cauca respectivamente.

Tabla 5. Resumen de resultados para las tres cuencas carboníferas

Cuenca	Volumen Total (M3)	Peso de la Biomasa Verde (Tn)	Peso del Carbono (Tn)	Co2 Capturado (Tn)
Altiplano	5215.1	12836	3083	11285
Valle del Cauca	11381	28318	6016	22022
Cesar	30253	63044	15533	56850

5.1.8 Valoración Económica

Para determinar el costo de oportunidad de los suelos pertenecientes a la cuenca carbonífera del Cesar, se utilizó la productividad de una hectárea plantada con palma africana, de la cual, los dos principales productos a extraer y comercializar son el Aceite bruto de palma, que tiene un precio actual en el mercado nacional de \$800 (USD\$ 0.35) por Kg. y la almendra de palmiste, que tiene un precio de \$ 417 (USD\$ 0.18)⁷.

La productividad de esta especie empieza entre los tres y cuatro años (para los cálculos, se utilizó 3.5 años), con una productividad anual aproximada de 4136 Kg. de aceite crudo, y 160.7 Kg. de almendra de palmiste. (Fedepalma, Diciembre de 2000).

Con estos datos, se determinó que los ingresos percibidos en el cuarto año de plantación, por una hectárea de palma africana, es de USD\$ 1514⁸, con lo cual se calculó que el costo de oportunidad anual de una hectárea en la cuenca carbonífera

del Cesar es de USD\$ 432.5, ya que como se mencionó anteriormente, se hace necesario esperar 3.5 años para que empiece su producción.

De acuerdo con los usos alternativos que presentan los suelos sobre los cuales se establecieron las plantaciones, se determinó el costo de oportunidad de los mismos, calculándose los siguientes:

C.C. Altiplano: USD\$ 180 por hectárea

C.C. Valle del Cauca – Cauca: USD 280 por hectárea

C.C. Cesar: USD\$ 432 por hectárea

Partiendo de estos valores, y utilizando el promedio de captura anual de cada plantación se establecieron los precios de venta de cada tonelada de CO₂ capturada, en 19.2 USD\$/Tn de CO₂ capturada en el Cesar, 11.38 USD\$/Tn de CO₂ en el Valle del Cauca.

⁷ W.W.W. Fedepalma.com.co datos de productividad del periodo Noviembre 1999 – Octubre de 2000.

⁸ Utilizando \$2230 Colombianos de 2000 para realizar la conversión.

El precio se calculó, utilizando la relación entre el costo de establecer y manejar una hectárea de plantación, y su potencial de captura total, con lo cual se determinó que el costo de capturar una tonelada de CO₂ oscila entre 3.25 y 4.3 USD/Tn de CO₂ capturada.

5. CONCLUSIONES

- El porcentaje promedio de Carbono, encontrado para cada una de las tres especies analizadas en este estudio, no muestra grandes diferencias entre sí, por lo tanto el potencial de captura de CO₂ por unidad de área en las diferentes regiones del país, no depende directamente de la composición química de cada especie, sino de los rendimientos alcanzados por cada plantación.
- Para capturar el CO₂ emitido por una tonelada de carbón sometido a combustión, se hace necesario incrementar el volumen del fuste descortezado en 1.22 m³, lo que es igual a incrementar la biomasa verde total de la plantación en 2.453 Tn o incrementar el peso total del Carbono en 0.517 Tn.
- Los rendimientos encontrados para *E. globulus* en la cuenca carbonífera del altiplano cundiboyacense, fueron los más bajos del total de las plantaciones visitadas, los que obedecen en gran medida, primero, a la falta de nutrientes disponibles en el suelo, debido a la ausencia de horizonte orgánico en gran parte del área plantada, y segundo, a los pocos tratamientos silviculturales recibidos a lo largo del tiempo de plantación.
- Del manejo silvicultural, recibido por cada plantación, dependieron los incrementos anuales en el stock de biomasa, tanto de madera, como de los demás compartimentos; de tal modo, que las grandes diferencias encontradas entre plantaciones de *E. grandis*, y *E. globulus*, obedecen al buen manejo recibido por las primeras, y al poco o nulo que recibieron las segundas.

- Los modelos estadísticos determinados en este estudio, permiten calcular con un nivel de exactitud muy amplio, la totalidad de CO₂ capturado por plantaciones de *E. grandis*, *globulus* y *camaldulensis*; partiendo únicamente del volumen de fuste descortezado encontrado en cada plantación. Con lo anterior, tanto la predicción, como la cuantificación de la captura de CO₂, se simplifica de manera considerable, reduciendo en un gran porcentaje los costos tanto de transacción, como de comercialización de los CRE.
- La venta de Toneladas de CO₂ capturadas por plantaciones forestales, se resume en un compromiso adquirido por el país oferente en el tiempo para alcanzar unos rendimientos previamente establecidas por sus plantaciones; de este modo, es necesario, garantizar el funcionamiento y la articulación de todas y cada una de las etapas de desarrollo del bosque, empezando por un estricto control en la certificación de la semilla, así como de las condiciones del terreno en los momentos previos al establecimiento, y del tratamiento silvicultural de las plantaciones, por lo menos durante los primeros cinco años de plantación.

6. RECOMENDACIONES

- El país debe empezar a comercializar las toneladas de CO₂ capturadas por sus bosques lo más pronto posible, ya que los países que entren en primer lugar a este mercado, en primera medida podrán vender certificados de reducción de emisiones a los precios más altos, y en segunda medida, podrán comercializar un mayor número de toneladas de CO₂ capturadas, mientras la oferta de este servicio ambiental, permanezca constante.
- Las especies exóticas han demostrado buenos resultados tanto en crecimientos, adaptabilidad y captura, lo cual ha permitido conside-

rarlas como una buena opción al momento de establecer plantaciones con fines comerciales. Sin embargo, en nuestro país existe una gran variabilidad de especies nativas, que a pesar de no presentar grandes rendimientos en el corto plazo, si poseen otras cualidades como la calidad de la madera que las hacen ser muy valiosas en el mercado. Dichas especies al igual que las especies exóticas, poseen un buen potencial de captura de CO₂, que hasta el momento resulta ser desconocido y por ende esta siendo desaprovechado. Se recomienda que investigaciones como la que se presentó en este trabajo se realicen para las especies nativas del país que en la actualidad están siendo aprovechadas indiscriminadamente, como es el caso de los bosques del Chocó o del Magdalena Medio y también para aquellos ecosistemas propios de nuestro país como son los manglares, catívalas, morichales, entre otros, buscando no solo la viabilidad económica de obtener un rubro por la venta de toneladas de CO₂ capturadas, sino también como un medio de preservación y conservación.

- El sector explotador del carbón, debe tomar parte rápidamente en la implementación del carbón verde en Colombia, ya que los grandes compradores de este mineral, a la vez son el sector más interesado en reducir las emisiones producidas por su combustión, y en este sentido, la ventaja del país es muy grande, ya que en primera medida es uno de los mayores productores y exportadores de carbón en el mundo y cuenta con un largo historial de transacciones comerciales con estos países, lo que facilitaría los procesos de comercialización y reduciría los costos de transacción, principalmente con los países de la comunidad Económica Europea. Y en segunda medida cuenta con ventajas ambientales adicionales, que se traducen en un gran potencial de captura por unidad de área, lo que se puede traducir en dos

cosas; una que es un área considerablemente menor para reforestar y compensar sus emisiones, u otra en un periodo o ciclo de corta menor, que aumente la viabilidad financiera de este tipo de proyectos.

7. BIBLIOGRAFIA

Castro R.; Pratt L.; Sancho F. 1999. Hacia el petróleo verde en las Américas. INCAE.

Ingeniería y Proyectos Regionales Consultores. 1995. Ltda. Plan de acción para el programa de reforestación PRECA. Minercol. Bogotá, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 1999. Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero 1990. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá – Colombia.

Ministerio del Medio Ambiente. 2000. Estudio de estrategia nacional para la implementación del MDL en Colombia. Bogotá – Colombia.

Raev Ivan, Asan Unal. 1997. Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria, en las últimas décadas. XI Congreso Forestal Mundial, 13 a 22 de Octubre de 1997, Vol 1, Tema 4, Antalya, Turquía.

Rodríguez, L. 1988. Consideraciones sobre la biomasa, composición química y dinámica del bosque pluvial y tropical de colinas bajas. Bajo Calima, Buenaventura. Serie Documentación No. 16, CONIF; Bogotá D.C. Colombia, 1988.

Unidad de Desarrollo Ambiental. 1995. Fijación de Carbono estimada por especie., Costa Rica, 1979-1995.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2001. Guías Analíticas, laboratorio de suelos, Bogota 2001.