

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN EL GRADIENTE CONSTITUTIVO  
(BORDE – INTERIOR) DE UN BOSQUE ANDINO EN LA CUENCA DEL RÍO  
LAS PIEDRAS, MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA**



**SANTIAGO VALENCIA AGREDO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE BIOLOGÍA  
POPAYÁN  
2013**

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN EL GRADIENTE CONSTITUTIVO  
(BORDE – INTERIOR) DE UN BOSQUE ANDINO EN LA CUENCA DEL RÍO  
LAS PIEDRAS, MUNICIPIO DE POPAYÁN, CAUCA**



**SANTIAGO VALENCIA AGREDO**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar al título de Biólogo

Director

**APOLINAR FIGUEROA CASAS Ph. D.**

Asesoras

**ANGÉLICA MARÍA MOSQUERA**  
Bióloga

**MARÍA CRISTINA ORDÓÑEZ**  
Bióloga

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE BIOLOGÍA  
POPAYÁN  
2013**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

**Director** \_\_\_\_\_  
**Apolinar Figueroa Casas Ph.D.**

**Jurado** \_\_\_\_\_  
**Diego Macías Pinto M.Sc.**

**Jurado** \_\_\_\_\_  
**Román Ospina Montealegre M.Sc.**

**Fecha de Sustentación: Popayán, 19 de Noviembre de 2013.**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	11
1. JUSTIFICACIÓN .....	12
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 PROCESOS ECOLÓGICOS Y EL PAISAJE .....	13
2.2 PROCESOS ECOLÓGICOS Y EL HOMBRE .....	13
2.3 ESTUDIO DE VEGETACIÓN .....	14
2.4 VARIABLES MICROCLIMÁTICAS .....	14
2.5 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS .....	15
2.5.1 Carbono en bosques tropicales.....	15
2.6 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ATRIBUTOS EN ÁRBOLES.....	16
3. ANTECEDENTES .....	17
4. OBJETIVOS .....	19
4.1 General.....	19
4.2 Específicos .....	19
5. METODOLOGÍA.....	20
5.1 ZONA DE ESTUDIO.....	20
5.2 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE BIOMASA AÉREA.....	22
5.2.1 Volumen .....	22
5.2.2 Densidad básica de la madera .....	23
5.2.3 Factor de Expansión de Biomasa (FEB) .....	23
5.3 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO .....	24
5.4 STOCK DE CARBONO EN EL GRADIENTE DEL BOSQUE .....	24
5.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES MICROCLIMÁTICAS.....	24
6. RESULTADOS .....	26
6.1 ESTIMACIÓN CONTENIDO DE BIOMASA AÉREA.....	26
6.1.1 Volumen .....	26
6.1.1.1 Modelo matemático de volumen .....	26
6.1.2 Densidad básica de la madera .....	28

6.2 ESTIMACIÓN CONTENIDO DE CARBONO .....	28
6.3 STOCK DE CARBONO EN EL GRADIENTE DEL BOSQUE .....	29
6.4 VARIABLES MICROCLIMÁTICAS .....	29
7. DISCUSIÓN .....	33
8. CONCLUSIONES.....	37
9. RECOMENDACIONES .....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización zona de estudio, vereda Quintana, municipio de Popayán, departamento del Cauca.....	21
Figura 2. RSC Arrayanales, vereda Quintana, municipio de Popayán, departamento del Cauca.....	21
Figura 3. Modelo de volumen definido por la curva de Gompertz.....	27
Figura 4. Valores residuales del modelo de Gompertz. ....	27
Figura 5. Stock de carbono promedio a lo largo del gradiente del bosque. ....	29
Figura 6. Humedad relativa promedio a lo largo del gradiente del bosque. ....	30
Figura 7. Temperatura del suelo promedio a lo largo del gradiente del bosque. ...	30
Figura 8. Temperatura del aire promedio a lo largo del gradiente del bosque. ....	31
Figura 9. Radiación solar promedio a lo largo del gradiente del bosque. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Test de Levene para las variables microclimáticas.....	32
Tabla 2. Prueba de Correlación de Pearson para las variables microclimáticas....	32
Tabla 3. Valores de biomasa aérea para el bosque de la RSC Arrayanales empleando diferentes modelos alométricos.....	34

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Especies más abundantes en la RSC Arrayanales, vereda Quintana, municipio de Popayán.....	47
Anexo B. Cálculos de la densidad básica promedio de la madera para el bosque de la RSC Arrayanales. ....	48



## AGRADECIMIENTOS

**A Dios**, por darme la oportunidad de vivir, por bendecirme cada día y por brindarme la fuerza para salir adelante.

**A mis padres**, por su esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional.

**A mis hermanas**, por su cariño y constante respaldo.

**A mis familiares**, por su acompañamiento y solidaridad.

**A la familia Collazos**, por permitir el acceso a sus predios para la realización de este trabajo.

**Al señor José Bolaños y su esposa Carmen**, por su acogida y compañía durante la estadía en campo.

**Al profesor Apolinar Figueroa Casas**, director del trabajo, por la oportunidad, confianza, enseñanzas y apoyo para la realización de este proyecto.

**A Angélica Mosquera**, por su valiosa colaboración, aportes y consejos siempre oportunos.

**A María Cristina Ordóñez**, por sus orientaciones, apoyo permanente y acompañamiento en todas las etapas del estudio.

**A Lorena Alvear**, por su importante gestión como pionera del proyecto e interés mostrado durante el desarrollo del mismo.

**A David Dávila**, por su gran disponibilidad y ayuda en la recolección y procesamiento de datos.

**A mis compañeros y miembros del Grupo de Estudios Ambientales**, por su amistad, compañía y colaboración durante las salidas de campo.

**A mis jurados Diego Macías y Román Ospina**, por sus valiosas observaciones y contribuciones en este trabajo.

**A mis amigos**, por su amistad, sinceridad y apoyo en estos años.

**A mis compañeros de carrera, profesores del departamento de Biología**, y a todas aquellas personas que de una u otra forma me colaboraron.

## RESUMEN

Se estimó el contenido de carbono presente en la biomasa aérea de un bosque andino perteneciente a la reserva de la sociedad civil Arrayanales, localizada en cuenca del río Las Piedras, en el departamento del Cauca, Colombia. Se generó una ecuación de volumen para el estrato arbóreo con un DAP 5cm, obteniendo que el modelo matemático de Gompertz fue el de mayor ajuste. El volumen calculado con este modelo fue 223,06 m<sup>3</sup>/ha. La biomasa aérea (265,04 t/ha) se obtuvo multiplicando el volumen por la densidad básica promedio de la madera (0,54 t/m<sup>3</sup>) y fue ajustada utilizando un factor de expansión de biomasa (2,20). El contenido de carbono (132,52 t/ha) se estimó multiplicando el valor de la biomasa por el factor de reducción (0,5). De igual manera se calculó el carbono almacenado desde el borde hacia el interior del bosque, empleando los mismos transectos donde también se registraron las variables microclimáticas (temperatura del aire y del suelo, radiación solar y humedad relativa). Los valores obtenidos de microclima, correspondientes a una determinada distancia, se analizaron mediante la prueba estadística de correlación de Pearson con el fin de determinar el comportamiento de cada variable a lo largo del gradiente (borde-interior), indicando que todas las variables microclimáticas presentan diferencias significativas en relación con la distancia en donde se midieron. Los resultados de esta investigación resaltan la importancia de la protección y conservación de los bosques andinos en relación con el proceso de almacenamiento de carbono, sus características estructurales y microclimáticas, con el fin de aportar en un contexto de cambio climático, al proceso de formulación de estrategias que permitan optimizar la gestión integral de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos.

**Palabras clave:** biomasa aérea, volumen, densidad básica, variables microclimáticas, cambio climático.

## INTRODUCCIÓN

La explotación insostenible de los recursos naturales ha prevalecido a lo largo de la historia, convirtiéndose en uno de los principales causantes del cambio ecológico a nivel mundial, dando lugar al agotamiento y la extinción de un gran número de especies (Worm, 2008). De esta forma, muchos de nuestros valiosos ecosistemas están expuestos a una cultura dominante donde el desarrollo consiste en talar grandes extensiones de bosque en lugar de conservarlo y aumentarlo (OPEPA, 2012). Como consecuencia de estas acciones podemos observar diferentes perturbaciones y alteraciones del paisaje como disminución de las coberturas vegetales naturales, pérdida y fragmentación de hábitats, entre otros.

De este modo, en Colombia, algunos ecosistemas estratégicos como los bosques andinos, se encuentran amenazados por estar situados en la parte más poblada del país y comúnmente persisten sólo como fragmentos aislados en la parte alta de las montañas y laderas más empinadas; lo que en términos ambientales resulta algo muy desafortunado, dado que estos bosques se caracterizan por brindar diversos servicios que son de gran importancia, pues además de cumplir un papel clave como protectores y reguladores del recurso hídrico (OPEPA, 2012), también desempeñan el rol como sumideros de carbono, contribuyendo a controlar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y por lo tanto la tasa del cambio climático (Honorio y Baker, 2010).

En este orden de ideas, la problemática expuesta previamente constituye el eje central del presente trabajo, teniendo como enfoque la importancia de la protección y conservación de los bosques andinos en relación con el proceso de almacenamiento de carbono y las condiciones microclimáticas que los caracterizan. Esto con el fin de aportar, en un contexto de cambio climático, al proceso de formulación de estrategias que permitan optimizar la gestión de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos.

Para la ejecución de este proyecto se hizo uso de una parcela permanente (PP) de 1 hectárea, previamente establecida en una zona de reserva de la sociedad civil, localizada en la cuenca del río Las Piedras, vereda Quintana, municipio de Popayán (Cauca), y se desarrolló dentro de las líneas de investigación del Grupo de Estudios Ambientales (GEA) de la Universidad del Cauca, en el marco del Programa de Monitoreo Ambiental para Cambio Climático en Ecosistemas Agrícolas Altoandinos (MACACEA).

## 1. JUSTIFICACIÓN

La fragmentación y la alteración de los hábitats naturales debido a las actividades humanas pueden tener profundos efectos sobre las interacciones ecosistémicas, dando lugar a un desequilibrio en los procesos dinámicos del paisaje con posibles efectos en cascada en toda la comunidad (Rodríguez *et al.*, 2007). En este sentido, es de gran importancia la protección de aquellos ecosistemas, como los bosques andinos, que son altamente vulnerables y sensibles a los impactos negativos en el medio ambiente, en especial a los efectos del cambio climático (Bubb *et al.*, 2004; Morales y Estévez, 2006; Bates *et al.*, 2008).

La conservación de los bosques andinos debe ser prioritaria, ya que además de la gran biodiversidad que albergan, protegen de la erosión y previenen deslizamientos de tierra, asimismo, contribuyen en la regulación del ciclo hidrológico y el ciclo de nutrientes, favoreciendo respectivamente, el suministro y calidad del recurso hídrico e incrementando la fijación y almacenamiento de carbono, componente clave en las estrategias de adaptación al cambio climático, mediante la captación del carbono atmosférico a través de la retención de materia orgánica en el suelo y acumulación de biomasa en las especies vegetales (Honorio y Baker, 2010; IIRBAvH, 2011).

En Colombia la vegetación andina constituye el 29% del total de la flora, es decir, más del doble de la que se encuentra en la Amazonia (13%) o en el Pacífico (11%) (BIBO, 2011), sin embargo, según reportes de Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNNC), el bosque andino es el ecosistema más diezmado del país, del cual tan sólo queda un 4%. Desafortunadamente, estos bosques no han recibido mucha atención en lo referente al servicio ecosistémico de la fijación de carbono, y aunque existen varias iniciativas de investigación y monitoreo de este servicio, todavía se identifican vacíos en la estimación de carbono para estos ecosistemas (Bubb *et al.*, 2004; Albán, 2007).

De este modo, diferentes autores coinciden en señalar que ante la pérdida inminente de nuestros bosques tropicales, particularmente los del sistema montañoso andino, se considera una buena alternativa establecer estrategias de desarrollo que tengan visión a largo plazo, en donde se considere al cambio global como el eje principal para la toma de decisiones eficaces para el manejo, conservación y recuperación de los ecosistemas (Carr *et al.*, 1999; Gast-Harders, 2005; Castaño, 2011), una de estas estrategias es el monitoreo a largo plazo a partir del establecimiento de parcelas permanentes de vegetación, que son una de las mejores herramientas a nuestro alcance, ya que brindan información útil sobre la composición, la estructura y dinámica del bosque (Molina, 1988; BOLFOR y PROMABOSQUE, 1999; Samper, 2005); además, se consideran pertinentes para llevar a cabo un inventario apropiado del carbono almacenado y de la capacidad de almacenamiento de una determinada zona (Brown, 2008).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PROCESOS ECOLÓGICOS Y EL PAISAJE

El paisaje, como lo enuncia Tress *et al.* (2001), es un sistema holístico y dinámico en el cual interactúa la geosfera, la biosfera y la noosfera, siendo estas interacciones las que lo definen y caracterizan. El elemento base para la interpretación del paisaje es el concepto de mosaico, que está compuesto por todo un conjunto de elementos, los cuales se pueden diferenciar en tres grandes tipos: los fragmentos, los corredores y la matriz. La distribución de todos los cambios sucesionales que se dan con el tiempo, se entienden como etapas que consolidan un patrón de parches a través de un paisaje, en donde los cambios temporales que se generan en cada parche se asocian a procesos de intervención y a perturbaciones naturales que se coligen a la dinámica (Figueroa, 2009).

Según la disciplina que lo estudia, el paisaje puede ser estudiado desde varios enfoques, y por ende ser descrito de diversas maneras, por ejemplo desde un punto de vista estético, o también visto como un territorio. De este modo, se habla de *la ecología del paisaje*, un término propuesto por el geógrafo alemán Carl Troll (Forman y Godron, 1986), quien la definió como “el estudio de las relaciones físico-biológicas que gobiernan las unidades espaciales de una región; relaciones tanto verticales (dentro de cada unidad), como horizontales (entre unidades)”. Si bien el primer aspecto ya lo estudiaba la ecología, se dice que fue el segundo el que hizo novedosa a la ecología del paisaje (Irastorza-Vaca, 2006).

Lo importante para la vida humana y la conservación de los ecosistemas es saber si hoy, con los altos niveles de transformación antropogénica, donde las fuerzas económicas y los patrones culturales así como las necesidades de sobrevivencia del hombre, permitirán que los paisajes entendidos como una clase especial de sistemas ecológicos, tendrá la capacidad de autorregularse y subsistir a partir de principios de planificación capaces de entenderlos (Figueroa, 2009).

### 2.2 PROCESOS ECOLÓGICOS Y EL HOMBRE

Muchos de los paisajes naturales en Colombia han sufrido una intensa transformación por acción del hombre, que en la actualidad se considera como una amenaza a la conservación de la biodiversidad y como el principal factor causante de su degradación ambiental. Dicho proceso de transformación de los sistemas naturales se origina con la propia historia de la humanidad (Figueroa, 2009), y el proceso no es más que el recuento de las etapas de la historia humana de la naturaleza (Moscovici y Mari , 1968).

En este sentido, es importante identificar y analizar aquellas tendencias o factores ligados a ámbitos socioeconómicos, políticos, culturales, etc., que están causando grandes impactos sobre los ecosistemas. Por ejemplo, las nuevas alternativas en las políticas sociales y de seguridad, tal como lo indica Figueroa-Casas (2009), están originando una dinámica demográfica que propicia el cambio de los paisajes naturales y agrícolas, lo cual generaría efectos tanto positivos como negativos para los ecosistemas y los servicios ambientales de las áreas de alta montaña, dependiendo de las técnicas empleadas para el desarrollo de actividades como la ganadería y la agricultura.

### **2.3 ESTUDIO DE VEGETACIÓN**

Una comunidad vegetal es una unidad sociológica de cualquier rango que posee una composición (aspecto florístico) y una estructura (aspecto morfológico), características que resultan de las interacciones que se presentan a través del tiempo; es un complejo de especies vegetales compuesto de elementos ecológica y fenológicamente diferentes, que pese a su dinamismo, forman un sistema persistente que describe, desde el punto de vista botánico, las relaciones físico-geográficas y la historia de la región (Ramírez-Padilla, 1995).

La vegetación tiene gran importancia, ya que es el elemento a través del cual mejor se refleja y visualiza la intervención de los factores ecológicos y de los cambios que ocurran en el sistema, siendo un indicador muy sensible y de lapsos suficientemente amplios (Etter, 1991). La extrema vulnerabilidad del mundo vegetal, es una variable de importancia al momento del estudio de los cambios en el paisaje que permite estimar la intensidad y extensión de los efectos antrópicos en el medio ambiente a la vez que sirve como fuente de información para la elaboración de planes de gestión del territorio y a la mitigación y/o reparación de los efectos del hombre sobre el ambiente (Grez y Salazar, 2005).

### **2.4 VARIABLES MICROCLIMÁTICAS**

El microclima se define como el conjunto de condiciones climáticas propias de un punto geográfico o área reducida y representa una modificación local del clima general de la región debido a la influencia de distintos factores ecológicos (Barnes *et al.*, 1998). La presencia de cubiertas vegetales y particularmente de cubiertas forestales modifica los parámetros climáticos y crea un microclima cuyas particularidades dependen del clima general y de las características estructurales de la cubierta vegetal (Lee, 1978; Aussenac, 2000).

Debido a la alta acumulación de biomasa y a las dimensiones de los árboles, los bosques tienen una considerable influencia en los intercambios de energía entre la atmósfera y el suelo, actuando la cubierta vegetal sobre el comportamiento de la

radiación solar, las precipitaciones, la humedad atmosférica, la temperatura del aire, el viento y la capacidad evaporativa del aire (Aussenac, 1997; Barnes *et al.*, 1998; Geiger *et al.*, 2003).

Por otra parte, el crecimiento de las plantas se ve afectado por la temperatura del aire, la radiación solar y la humedad, debido a que estos elementos influyen sobre procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, la respiración, la germinación de semillas y la mortalidad (Barnes *et al.*, 1998). En este sentido, tanto las perturbaciones naturales como también las antropogénicas, al alterar las características estructurales de las cubiertas vegetales, pueden modificar el ambiente físico de un ecosistema afectando su productividad, diversidad biológica y patrones sucesionales (Lee, 1978; Chen *et al.*, 1999).

## **2.5 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS**

La definición de servicios ecosistémicos todavía no ha sido establecida formalmente, esto debido a que diversos autores han debatido entre conceptos de ecología y economía sin llegar a un acuerdo común, que permita entre otras cosas, estandarizar la medición de estos servicios. En este sentido, se han tenido en cuenta dos definiciones diferentes que nos permiten tener una idea lo suficientemente clara de lo que significan.

En primera instancia, Boyd y Banzhat (2007) indican que son componentes de la naturaleza, directamente disfrutados, consumidos o utilizados para proporcionar bienestar humano. Esto denota que los servicios son los productos finales de la naturaleza. Y, en segunda instancia, Daily (1997) señala que los servicios ecosistémicos son condiciones y procesos de los ecosistemas naturales, y las especies que lo conforman, que mantienen y soportan la vida humana.

Para puntualizar, en este estudio nos referimos a aquellos servicios ecosistémicos cuyo consumo por un individuo no limita el consumo de otro, es decir, solamente se hace alusión a los valores de uso indirecto, como la regulación del clima, regulación hídrica, fijación de carbono, entre otros, que de acuerdo con Albán (2007), son servicios importantes para la integridad ecosistémica de los bosques andinos y además existen varias experiencias para su conservación (y en algunos casos pago) que demandan información específica sobre los resultados que pueden generar.

### **2.5.1 Carbono en bosques tropicales**

El ciclo de carbono está determinado por el almacenamiento y la transferencia entre la atmósfera, biósfera, litósfera y océanos de moléculas constituidas por el

elemento carbono. Lo más importante que se debe entender para estudiar este ciclo es la diferencia entre un stock y un flujo de carbono. En un bosque tropical, el stock de carbono es todo aquello que se encuentra almacenado en los diferentes componentes (hojas, ramas, fuste, raíces, suelo, hojarasca y madera), y los flujos son todos aquellos procesos que afectan el stock (fotosíntesis, respiración, mortalidad y descomposición) (Honorio y Baker, 2010).

Un área determinada de bosque es considerada como un sumidero de carbono, si la cantidad almacenada de carbono aumenta con el tiempo. Es decir, si el cambio en el stock de carbono es positivo. En un bosque, esto ocurre si los flujos que agregan carbono al stock, como el crecimiento, son más altos que los flujos que disminuyen el stock, como la mortalidad, por un periodo dado (Honorio y Baker, 2010).

Cualquier actividad relacionada con el uso del suelo que modifique la cantidad de biomasa en la vegetación y en el suelo, tiene el potencial de alterar la cantidad de carbono almacenado y emitido hacia la atmósfera, lo que influencia directamente la dinámica del clima de la Tierra (Rügnitz *et al.*, 2009). Los incrementos en este gas, causan preocupación por los cambios climáticos que puede ocasionar al modificar la absorción de la radiación infrarroja en la atmósfera y el cambio en el balance del calor global. Su ciclo es, por tanto, de importancia fundamental para entender la biosfera, sus mecanismos básicos de funcionamiento y la comprensión de su relación con el cambio climático (Marques, 2007).

## **2.6 MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ATRIBUTOS EN ÁRBOLES.**

El volumen ha sido y sigue siendo la forma de expresión de la cantidad de madera contenida en árboles más ampliamente utilizada a escala mundial. La estimación de este atributo es un problema relevante en dendrometría e inventarios forestales. La dificultad en la determinación directa del volumen requiere de la cubicación de secciones del fuste, y a partir de éstas calcular expresiones matemáticas que, basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitirá estimar el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples. Una herramienta de gran utilidad para determinar el volumen en pie de árboles y masas forestales, son las funciones de volumen que originan ecuaciones, con las cuales se formulan tablas de volumen (Prodan *et al.*, 1997).

Los modelos de cualquier clase, sin importar su refinamiento y exactitud, pueden probar ser poco prácticos si no están respaldados con datos confiables. Si se distorsionan las estimaciones, la solución obtenida, pese a ser óptima en un sentido matemático, en realidad será de calidad inferior desde la perspectiva del sistema real. En consecuencia, la disponibilidad de datos puede tener un efecto directo en la precisión del modelo. La recopilación de datos puede ser la parte más difícil para determinar un modelo y desafortunadamente no se pueden sugerir reglas para este procedimiento (Villarroel, 1994).



### 3. ANTECEDENTES

A pesar de la gran vulnerabilidad de los bosques andinos a ser deforestados y degradados debido a la alta presión humana sobre ellos, estos bosques podrían ofrecer posibilidades de constituirse en reservas importantes de carbono forestal si se proponen y adoptan las medidas necesarias para un manejo forestal adecuado acorde con las necesidades de los pobladores locales, siempre y cuando se lleven a cabo los estudios necesarios que demuestren sus potencialidades para mitigar el cambio climático (Gálmez y Kómetter, 2009).

En este contexto, diversas investigaciones a nivel mundial han evaluado los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas forestales, teniendo en cuenta que factores antrópicos como la deforestación y el crecimiento de la frontera agropecuaria, incrementan las amenazas y la vulnerabilidad ecosistémica, poniendo en riesgo la biodiversidad y propiciando alteraciones en la dinámica de los bosques naturales (Kappelle *et al.*, 1999; Villers y Trejo, 2003; Castaño, 2011; Peña *et al.*, 2011).

Con el interés de estudiar esta problemática se han desarrollado diferentes estudios y proyectos en escenarios de cambio climático en donde se han empleado parcelas permanentes como una herramienta que proporciona información muy valiosa en relación con la vulnerabilidad de los ecosistemas, siendo útil para identificar los tipos de vegetación más sensibles y las áreas geográficas que podrían ser afectadas (Rügnitz *et al.*, 2009; Eguiguren *et al.*, 2010; Honorio y Baker, 2010; Castaño, 2011; IDEAM, 2011). Así pues, el establecimiento de parcelas es un método ampliamente usado por ecólogos, biólogos e ingenieros forestales para describir y estudiar las características estructurales del bosque, como también su dinámica.

En Colombia el uso de parcelas para estos fines data de 1970, cuando del Valle (1979) estableció una parcela permanente para estudiar el crecimiento de la especie *Pitaria copaifera* Griseb (Caesalpiniaceae) (Vallejo *et al.*, 2005). A partir de ese momento, numerosas parcelas permanentes y temporales se han establecido al interior del país tanto en bosques naturales, como plantaciones forestales (e.g. González, 1995; Londoño y Gonzáles, 1993; Londoño y Álvarez, 1997; León y Giraldo, 2000; Orrego *et al.*, 2003; Londoño, 2005; López y Duque, 2010) (Yepes *et al.*, 2011).

No obstante, luego de la Conferencia de las Partes (COP) de las Naciones Unidas llevadas a cabo a finales de los años 90 (COP 5, Bonn - Alemania), el uso de parcelas cobró mayor relevancia debido a las recomendaciones de diseñar un sistema de monitoreo y valoración ambiental por país, para producir información en distintos campos y ámbitos (Vallejo *et al.*, 2005). Sumado a esto, en 2005, un grupo de países liderado por Papúa Nueva Guinea, llevó el tema de la

deforestación evitada a la agenda de la COP 11, realizada en Montreal. Así, la discusión sobre el papel de los bosques en la lucha contra el cambio climático volvió al debate internacional. Durante la COP 13, realizada en Bali en 2007, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) reconoció la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques (REDD) como un mecanismo válido en la lucha contra el cambio climático. Según el Plan de Acción de Bali (2007), se denomina REDD+ a la reducción de emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal; además de la conservación, el manejo sostenible y el mejoramiento del stock de carbono de los bosques en los países en desarrollo (UICN, 2012).

Estudios recientes sobre las posibilidades de implementación de las iniciativas de REDD+ desarrolladas en América del Sur se han concentrado en los ecosistemas forestales propios de los sistemas ecológicos de la cuenca amazónica baja; sin embargo, pocos estudios se orientan a estimar las posibilidades de las iniciativas de REDD+ con enfoque andino (Fehse *et al.*, 2002; Wilcke *et al.*, 2005; Soethe *et al.*, 2007). En este sentido, existen limitadas experiencias específicas de cuantificación de biomasa y carbono en bosques andinos, por lo que aún no se han identificado modelos estandarizados que permitan la conversión de mediciones dendrométricas a estimados de biomasa; además, la información disponible proviene de resultados de estudios de investigación con valores heterogéneos y metodologías variadas, dificultando la comparación entre resultados (Gálmez y Kómetter, 2009).

Por otra parte, si bien se han desarrollado ecuaciones alométricas generales para estimar de manera mejorada las reservas de carbono por encima del suelo en ciertos tipos de bosques tropicales (e.g. Chave *et al.*, 2005) sobre la base de determinadas relaciones entre evapotranspiración y precipitación, así como la precipitación total por año y la estacionalidad de las lluvias; existen pocos estudios orientados a realizar estimaciones similares sobre las reservas de carbono en bosques andinos y altoandinos, que se caracterizan por su singularidad climática (Gálmez y Kómetter, 2009).

En Colombia, diversos autores han aportado al conocimiento de esta temática (e.g. Díaz, 2008; Anaya *et al.*, 2009 y Carvajal *et al.*, 2009) y actualmente existen protocolos para la caracterización del ciclo del carbono en ecosistemas de alta montaña y para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono (CIAT, 2006; Yepes *et al.*, 2011; IDEAM, 2011). En el momento la temática del ciclo del carbono es objeto de las políticas nacionales colombianas y se referencian en la Segunda Comunicación Nacional ante la CMNUCC 2010, además del creciente interés en la formulación de proyectos inmersos dentro de las políticas del protocolo de Kyoto y Conpes 3242 de 2003. Es temática de interés de ONGs, gobiernos nacionales y regionales interesados en implementar proyectos de pagos por servicios ambientales basados en carbono para promover el desarrollo sostenible de los bosques (Honorio y Baker, 2010).

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 General**

- Determinar la relación del almacenamiento de carbono con las variables microclimáticas en un gradiente constitutivo (borde-interior) de un bosque secundario andino.

### **4.2 Específicos**

- Estimar el contenido de carbono en la biomasa vegetal del bosque.
- Medir las variables microclimáticas en el gradiente constitutivo.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 ZONA DE ESTUDIO

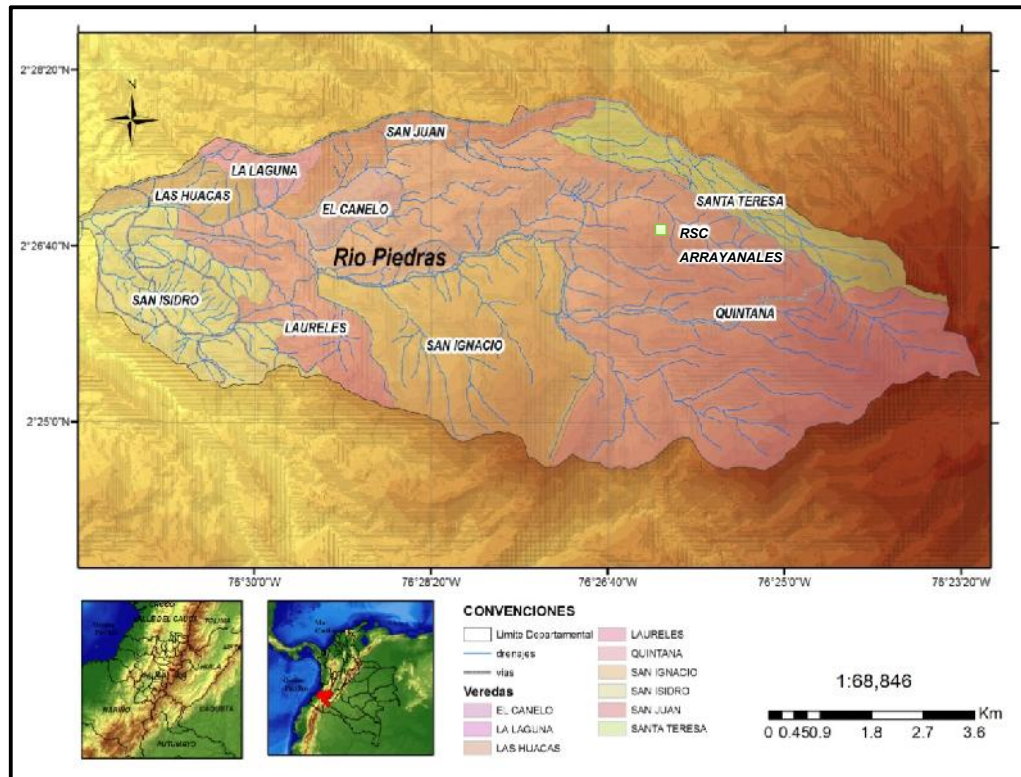
El estudio se realizó en el área de influencia de la subcuenca del río Las Piedras, localizada al nororiente del municipio de Popayán, sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Esta subcuenca hace parte de la cuenca del río Cauca, tiene una extensión de 6.626 hectáreas y comprende dos corregimientos: Quintana, identificado como el corregimiento 23 en el municipio de Popayán, al que pertenecen las veredas Quintana, San Ignacio, La Laguna, Parcelación El Canelo, Laureles y parte baja de San Juan; y Las Piedras, corregimiento 22 al que pertenecen las veredas Las Huacas y San Isidro (CRC, 2006).

Este trabajo se desarrolló a partir del establecimiento de una parcela permanente (Rovis y Sarria, 2013) con el apoyo del Grupo de Estudios Ambientales (GEA), en la Reserva de la Sociedad Civil (RSC) Arrayanales, localizada en la vereda Quintana (Figura 1), a una altitud de 2.600 m.s.n.m.; con rangos promedio anual de temperatura de 18,4°C; 1.729 mm de precipitación; y humedad relativa de 84 % (CRC, 2006).

La reserva Arrayanales cuenta con 4 nacimientos de agua, con buena vegetación protectora, además de contar con 5 quebradas con bosque ripario; está conformada por un área total de 151,73 hectáreas, de las cuales 62,6 hectáreas son bosque natural secundario, siendo así una de las reservas de la zona con mayor área de bosque natural (Figura 2).

En la vereda Quintana se presentan procesos de erosión intensa debido a actividades como tala de bosques, quema y pastoreo; existe una alta demanda de leña para cocción y calefacción; también se manifiesta erosión superficial por escorrentía debido a la falta de cobertura vegetal (CRC-UNICAUCA, 1994). Entre las especies vegetales reportadas para la zona están el encenillo (*Weinmannia sp.*), mano de oso (*Oreopanax discolor*), carne fiambre (*Roupala sp.*), pino colombiano (*Podocarpus oleifolius*), chilco (*Baccharis latifolia*), arrayán (*Myrcianthes leucoxylo*), cucharo (*Clusia sp.*), motilón (*Freziera canescens*), mortiño (*Miconia caudata*), mandur (*Vismia lauriformis*), mayo (*Tibouchina sp.*), roble (*Quercus humboldtii*), jigua (*Nectandra sp.*), fique (*Furcraea sp.*), entre otras (FPCR, 2005).

**Figura 1.** Localización zona de estudio, vereda Quintana, municipio de Popayán, departamento del Cauca (Fuente: Grupo de Estudios Ambientales – GEA, 2013).



**Figura 2.** RSC Arrayanales, vereda Quintana, municipio de Popayán, departamento del Cauca (Fuente: Rovis y Sarria, 2013).



## 5.2 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE BIOMASA AÉREA

Para la estimación de la biomasa aérea del estrato arbóreo del bosque se utilizó la metodología sugerida por Brown (1997):

$$BT \text{ (t/ha)} = V \text{ (m}^3\text{/ha)} \times DP \text{ (t/m}^3\text{)} \times FEB$$

**Donde:**

**BT=** Biomasa aérea total

**V=** Sumatoria del volumen comercial de todos los individuos.

**DP=** Densidad básica promedio de la madera.

**FEB=** Factor de expansión de biomasa.

### 5.2.1 Volumen

El volumen comercial total en la parcela permanente (1ha) se calculó mediante la aplicación de un modelo matemático generado de acuerdo a las características del bosque de la RSC Arrayanales. Cabe señalar que este modelo corresponde a un ajuste del modelo estimado por Alban y Sanchez (2013). Para la construcción del modelo inicialmente se realizó un muestro aleatorio de 100 individuos de diferentes especies seleccionadas dentro de la parcela, a los cuales se les calculó el volumen real aplicando la siguiente ecuación:

$$V = g_i \times h_i \times f_{0.1}$$

**Donde:**

**g=** área basal

**h=** altura comercial

**f=** factor de forma

Los valores por individuo de área basal, altura comercial y factor de forma se obtuvieron a partir del estudio realizado en la parcela permanente por Albán y Sánchez (2013), quienes determinaron también el factor de forma general para el bosque, presentando un valor de 0,6788.

#### 5.2.1.1 Modelo de Ecuación de Volumen

Una vez calculados los volúmenes para los 100 individuos muestreados, se procedió a construir el modelo que permitiera estimar el volumen para todos los árboles de la PP utilizando solamente el DAP. Para ello, se evaluaron los datos

con el paquete estadístico SPSS mediante pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas y finalmente se empleó el software CurveExpert Basic, ubicando el DAP en el eje X y el volumen en el eje Y como variable dependiente.

### **5.2.2 Densidad básica de la madera**

Se define como la masa secada en horno por unidad de volumen verde (Brown, 1997). Para la toma de las muestras de madera se determinó trabajar con las 6 especies vegetales más abundantes del bosque (Anexo A), y por cada especie se seleccionaron al azar 6 individuos, para un total de 36 muestras. Para ello, de cada individuo seleccionado se tomaron muestras de madera perforando el tronco a una altura aprox. de 1,3m de la superficie del suelo con un berbiquí de 10 pulgadas; cada muestra se guardó en una bolsa de papel kraft para su traslado hasta el laboratorio. Inicialmente se procedió a pesar la madera fresca en una probeta a un volumen de 5cm<sup>3</sup> (volumen verde) y posteriormente, después de secar las muestras al horno se volvieron a pesar para obtener la masa anhidra. La fórmula de la densidad básica es la siguiente:

$$Db = \frac{\text{masa anhidra (t)}}{\text{volumen verde (m}^3\text{)}}$$

Los datos obtenidos se digitalizaron en el programa Excel y fueron procesados empleando el paquete estadístico SPSS para su análisis descriptivo.

### **5.2.3 Factor de Expansión de Biomasa (FEB)**

Para incorporar la biomasa que se excluye de las ramas y follaje se requiere de la utilización de un FEB. De acuerdo con Alpízar (1997), si el valor de la biomasa es < a 190 t/ha el FEB está dado por la ecuación:

$$FEB = e^{[3,213 - 0,506 \times \ln(\text{Biomasa})]}$$

Y si el valor de la biomasa es 190 t/ha entonces:

$$FEB = 1,75$$

### 5.3 ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO

El contenido de carbono para los compartimientos por encima del suelo, debajo del suelo y en la madera muerta constituye el 50% de la biomasa de los mismos (IPCC, 1996; Gasparri y Manghi, 2004), es decir, que para estimar el contenido de carbono se multiplica el valor de la biomasa por 0,5. El valor de 0,5 corresponde al denominado factor de reducción (FR).

Para cuantificar el dióxido de carbono fijado se utilizó la ecuación recomendada por Rodríguez y Pratt (1998):

$$\text{CO}_2 \text{ FIJADO} = C \times \left( \frac{44}{12} \right)$$

**Donde:**

**CO<sub>2</sub> FIJADO**= Toneladas de dióxido de carbono fijado

**C**= Carbono en la biomasa

**(44/12)**= Constante

### 5.4 STOCK DE CARBONO EN EL GRADIENTE DEL BOSQUE

Para determinar el comportamiento del proceso de almacenamiento de Carbono a lo largo del gradiente (borde-interior) del bosque, inicialmente se censaron los árboles (con un DAP 5 cm) que estaban presentes dentro de un radio de 5m tomando puntos cada 10 m desde el borde (0 m) hasta 50 m hacia el interior del bosque. Para establecer esto, se emplearon los mismos transectos donde se registraron las variables microclimáticas (Ver Sección 5.6). Posteriormente, los valores de Carbono (en toneladas) se promediaron para la respectiva distancia del gradiente.

### 5.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES MICROCLIMÁTICAS

Se determinaron tres transectos perpendiculares a la zona de borde en puntos estratégicos del bosque, atravesando diferentes cuadrantes de la PP. Cada transecto se extendió desde el borde del bosque hasta 50 metros hacia el interior del mismo, y las medidas se efectuaron cada 10 metros.

Las variables microclimáticas medidas fueron: radiación solar, temperatura del aire, temperatura del suelo y humedad relativa. El gradiente lumínico se realizó con el medidor de luz de servicio pesado modelo 407026 y un módulo registrador de datos modelo 3800340, en el cual se registraron 5 datos cada 15 segundos por un tiempo de 3.0 segundos a una altura de 1 m; la temperatura ambiental se midió



a 1m por encima del nivel del suelo y la temperatura del suelo a 5 cm de profundidad; la humedad relativa se registró con el higrómetro el cual se ubicó a 1m por encima del nivel del suelo.

Las mediciones se llevaron a cabo en la mañana (09:00 – 10:00), al medio día (12:00- 13:00) y en la tarde entre (15:00 y 16:00) por 3 días seguidos cada mes, por 4 meses.

Los datos registrados en campo se digitalizaron en una matriz, en donde se relacionaron y promediaron los diferentes valores encontrados a cierta distancia del gradiente (borde - interior) luego, se llevó a cabo el análisis en el software SPSS, determinando como variable independiente a la distancia y cada una de las variables microclimáticas como dependientes. Se realizó la prueba de Correlación de Pearson para determinar el comportamiento de las variables a lo largo del gradiente, y de esta forma hacer la relación con la vegetación presente en el borde e interior del bosque.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 ESTIMACIÓN CONTENIDO DE BIOMASA AÉREA

#### 6.1.1 Volumen

El volumen comercial total calculado para la parcela permanente (1ha) fue **223,06 m<sup>3</sup>**. Este valor se obtuvo aplicando el modelo matemático de volumen.

##### 6.1.1.1 Modelo matemático de volumen

El modelo matemático que más se ajustó para la estimación de volumen en el área de estudio, fue el de Benjamin Gompertz, este modelo es uno de los más utilizados para la estimación de crecimiento respecto a edad, tanto en el campo forestal como animal, así como también es sugerido para estimación de volúmenes, diámetro, área basal y alturas (Vanclay, 1995). A continuación se muestra la ecuación de volumen ajustada para la RSC Arrayanales:

$$\text{Vol} = 5,6560 e^{-e^{[1,8711 - (2,8391 \times \text{DAP})]}}$$

**Donde:**

**Vol** = Volumen (m<sup>3</sup>).

**e** = Base de los logaritmos neperianos.

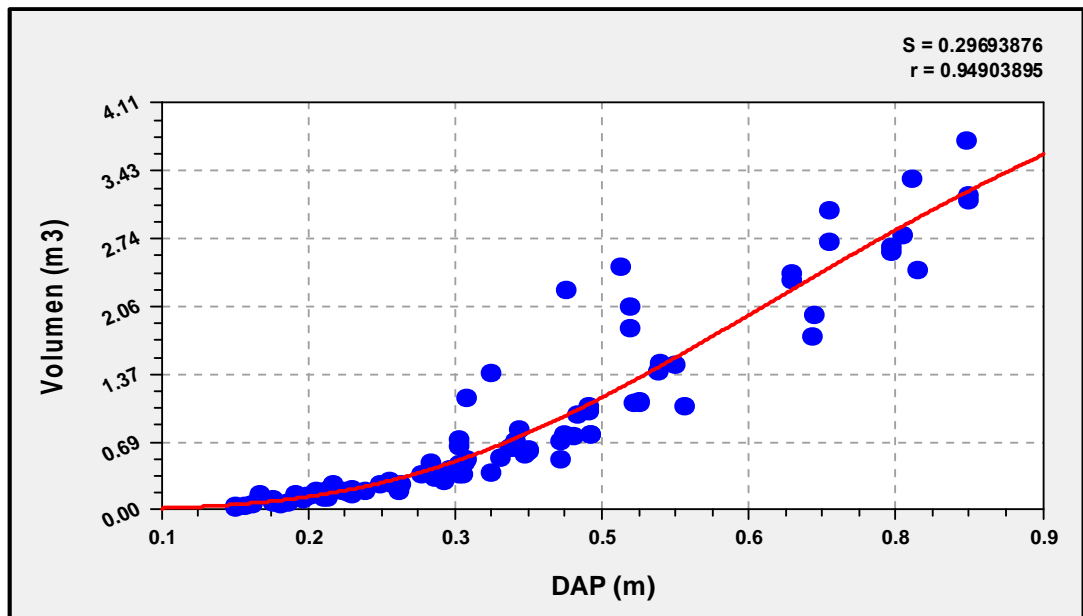
**DAP** = Diámetro a la altura del pecho (m).

La Figura 3 muestra el diagrama de dispersión de los datos recolectados en campo y el comportamiento del modelo de volumen ajustado, allí se puede observar que existe una alta correlación positiva entre los datos, indicando que a un incremento del DAP (causa) corresponde un crecimiento de volumen (efecto).

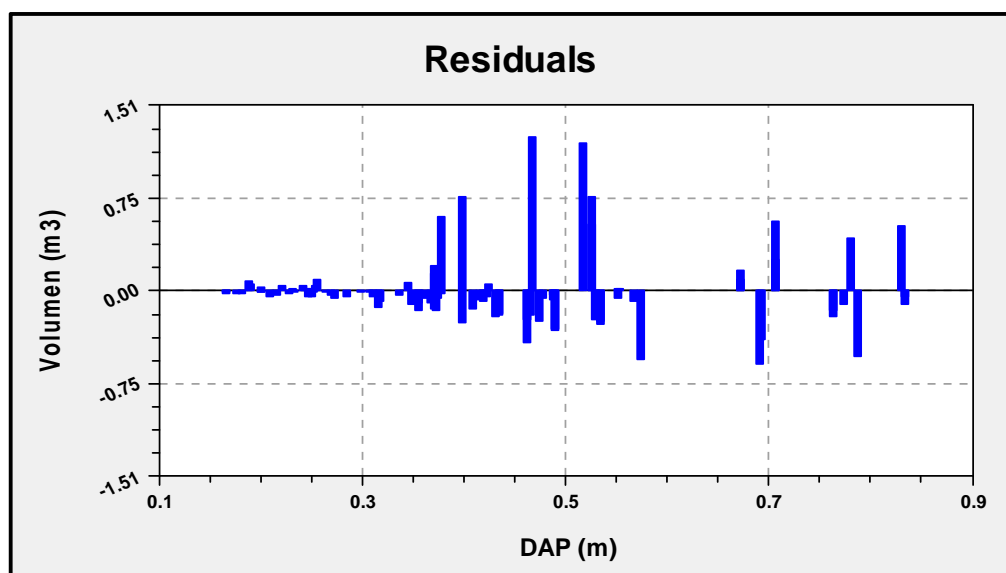
En la parte superior derecha de la Figura 3, se observa el error estándar (S) y el coeficiente de correlación (r). El error estándar para este caso es de **S= 0,297**; valor que indica un error bajo y nos permite observar la variabilidad o dispersión de los valores que se encuentran alrededor la curva, indicando además que si al calcular un volumen usando el modelo de Gompertz y su resultado es 5m<sup>3</sup>, el valor real puede medir mínimo 4,70 m<sup>3</sup> o máximo 5,297 m<sup>3</sup>.

Por otro lado el coeficiente de correlación  $r = 0,949$ ; significa que el 94,90% de los datos de volumen calculados con los datos de campo, se ajustan al modelo desarrollado.

**Figura 3.** Modelo de volumen definido por la curva de Gompertz.



**Figura 4.** Valores residuales del modelo de Gompertz.



En la Figura 4 se observan los valores residuales resultantes del modelo. En su gran mayoría estos valores son bajos y por tanto están muy cercanos a la línea de función del modelo. En el eje Y se encuentran los valores residuales, frente a la variable regresora X. Se observa la distribución aleatoria de los residuos y estos a su vez están muy cercanos a la línea central que representa la media del modelo; lo que indica que los residuales tienden a ser homogéneos para todo el rango de la variable predictora.

### 6.1.2 Densidad básica de la madera

La densidad básica promedio para los individuos del bosque de la RSC Arrayanales es **0,54 (t/m<sup>3</sup>)** (Anexo B).

### 6.1.3 Factor de Expansión de Biomasa (FEB)

Al multiplicar el volumen (223,06 m<sup>3</sup>/ha) por la densidad básica promedio (0,54 t/m<sup>3</sup>) se obtuvo la biomasa del volumen (**120,45 t/ha**). Como este valor es menor a 190 t/ha, entonces el FEB se halló empleando la fórmula recomendada por Alpízar (1997) para estos casos:

$$FEB = e^{[3,213 - 0,506 \times \ln(120,45)]}$$

$$FEB = 2,20$$

Finalmente para estimar la biomasa aérea total (BT) reemplazamos los valores obtenidos en la fórmula de Brown (1997):

$$BT \text{ (t/ha)} = 223,06 \text{ (m}^3\text{/ha)} \times 0,54 \text{ (t/m}^3\text{)} \times 2,20$$

$$BT \text{ (t/ha)} = 265,04 \text{ t/ha}$$

## 6.2 ESTIMACIÓN CONTENIDO DE CARBONO

Para calcular el contenido de carbono se multiplicó el valor de la biomasa (265,04 t/ha) por el factor de reducción (0,5). Por lo tanto, el stock de carbono presente en la biomasa aérea del bosque de la RSC Arrayanales es **132,52 t/ha**.

Este valor se reemplazó en la fórmula para calcular el CO<sub>2</sub> fijado:

$$\text{CO}_2 = 132,52 \text{ (t/ha)} \times (44/12)$$

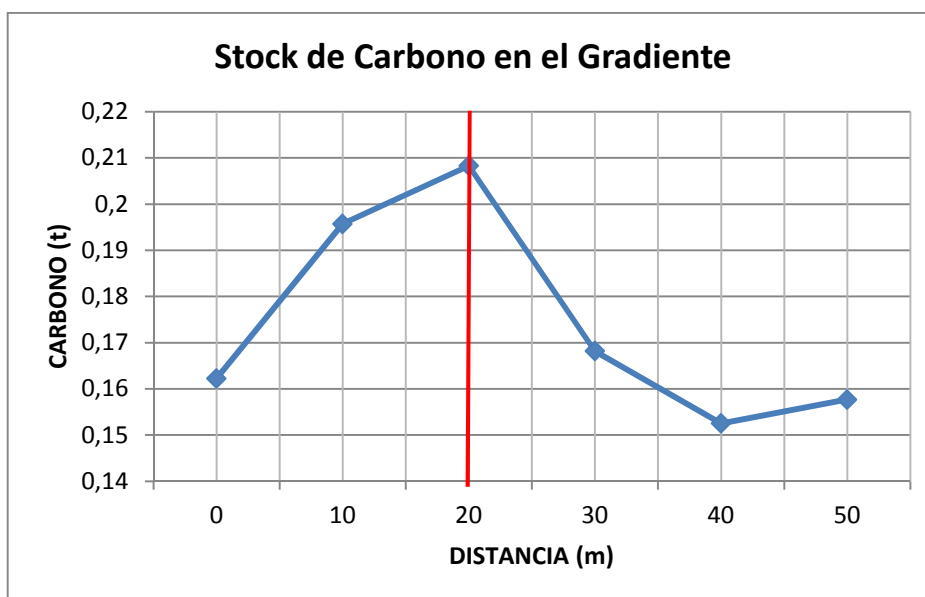
$$\text{CO}_2 = 485,91 \text{ t/ha}$$

De este modo se determinó que el bosque de la parcela permanente contribuye a fijar aproximadamente 486 toneladas de dióxido de carbono por hectárea.

### 6.3 STOCK DE CARBONO EN EL GRADIENTE DEL BOSQUE

Se estimó el stock de carbono promedio desde el borde (0 m) hasta 50 m hacia el interior del bosque. En la Figura 5 se observa una clara diferenciación entre los valores obtenidos, tomando como punto de quiebre los 20 m, dado que la tendencia viene en incremento desde el borde, pero a partir de este punto descende hasta llegar a los 50 m.

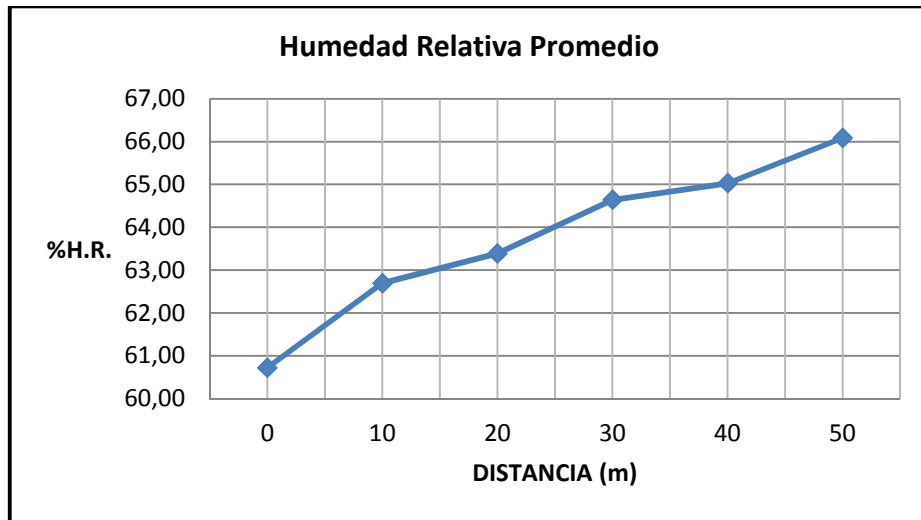
**Figura 5.** Stock de carbono promedio a lo largo del gradiente del bosque.



### 6.4 VARIABLES MICROCLIMÁTICAS

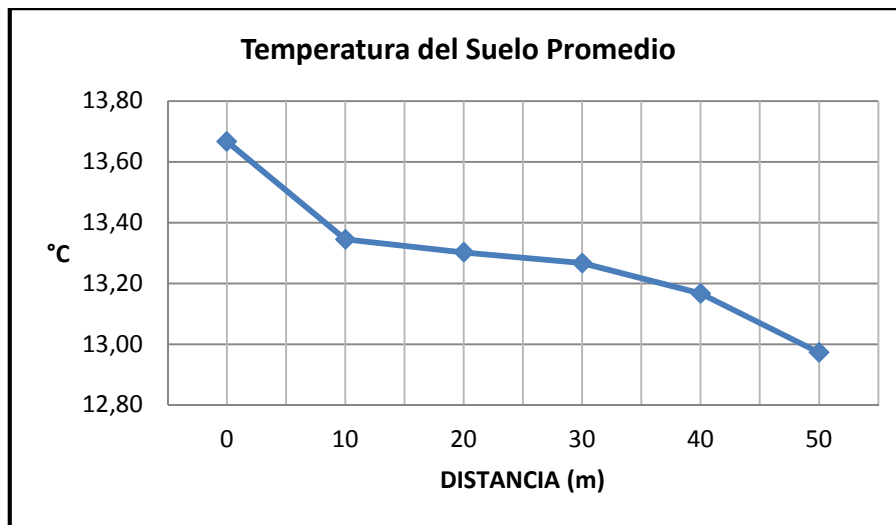
Se registraron las variables microclimáticas en la PP a determinadas distancias a lo largo del gradiente constitutivo (borde – interior) del bosque. Se generó una gráfica para cada variable con el fin de observar su comportamiento.

**Figura 6.** Humedad relativa promedio a lo largo del gradiente del bosque.



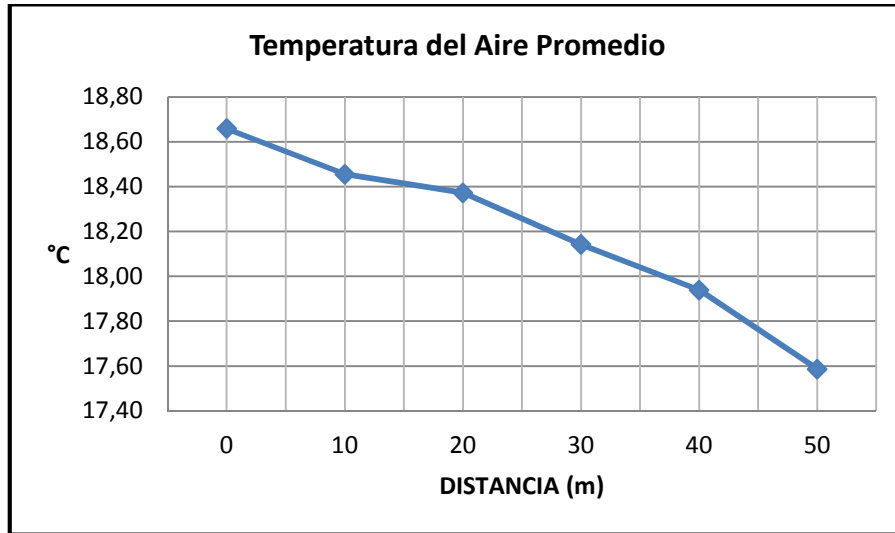
En la Figura 6 se observa que la humedad relativa exhibe un aumento gradual a medida que se avanza hacia el interior del bosque. Esta tendencia se ve favorecida por los cambios en la arquitectura de la vegetación.

**Figura 7.** Temperatura del suelo promedio a lo largo del gradiente del bosque.



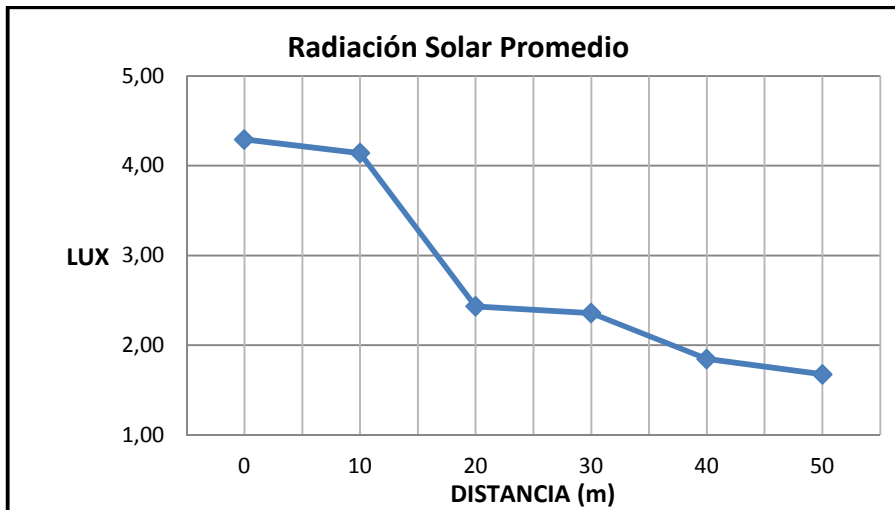
La Figura 7 muestra el comportamiento de la temperatura del suelo, presentando una correlación inversa con la distancia. Se observa un pequeño quiebre entre el borde y los 10 m pero en general esta variable presenta un comportamiento homogéneo.

**Figura 8.** Temperatura del aire promedio a lo largo del gradiente del bosque.



Los cambios de temperatura del aire que se observan en la Figura 8, no presentan ningún punto de inflexión y los valores decaen regularmente. Este comportamiento es similar a la temperatura del suelo, y está determinado por una menor exposición e influencia de la luminosidad y viento hacia el interior del bosque.

**Figura 9.** Radiación solar promedio a lo largo del gradiente del bosque.



La radiación solar al igual que las temperaturas del suelo y del aire, disminuye a lo largo del gradiente. La curva de datos para esta variable presenta un punto de inflexión a los 20 m del interior del bosque (Figura 9).

Las variables microclimáticas fueron analizadas mediante pruebas estadísticas utilizando el software SPSS, inicialmente se evaluó la homogeneidad de varianzas con el Test de Levene y posteriormente se aplicó la correlación de Pearson para determinar si los valores de las variables microclimáticas (variables dependientes) tenían diferencias significativas en relación con la distancia (variable independiente). Para las pruebas se tuvo en cuenta un nivel de significancia del 5% (0,05).

**Tabla 1.** Test de Levene para las variables microclimáticas.

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Humedad Relativa (%)	,129	5	66	,985
Temperatura del Aire (°C)	,137	5	66	,983
Temperatura del Suelo (°C)	,216	5	66	,955
Radiación Solar (Lux)	1,654	5	66	,158

La Tabla 1 presenta los resultados del Test de Levene realizado para las variables microclimáticas. Esta prueba indica que las varianzas de las cuatro variables microclimáticas son homogéneas.

**Tabla 2.** Prueba de Correlación de Pearson para las variables microclimáticas.

		Distancia	HR	T° Aire	T° Suelo	Intens. Lumínica
<b>Distancia</b>	Correlación de Pearson (r)	1	,247*	-,226*	-,201*	-,221*
	Sig. (unilateral)		,018	,028	,045	,031
	N	72	72	72	72	72

\*. La correlación es significativa al nivel 0,05 (unilateral).

Finalmente, se realizaron pruebas paramétricas de correlación de Pearson (r) para cuantificar la correlación entre dos variables. En la Tabla 2 se encuentran los valores obtenidos aplicando esta prueba, con los cuales se puede interpretar que cada una de las variables microclimáticas al ser correlacionada con la variable distancia, presentó una correlación baja (definida dentro de un rango igual a  $r = 0,2 - 0,4$ ). La humedad relativa presentó una correlación directa (+), mientras que las demás variables presentaron correlaciones inversas (-).



## 7. DISCUSIÓN

A través de las mediciones dasométricas realizadas en los árboles en pie, se logró estimar el contenido de biomasa aérea y, por ende, el contenido de carbono almacenado. Para ello, inicialmente fue necesario determinar valores reales de volumen de algunos individuos para luego obtener, mediante la generación de un modelo matemático, el volumen por hectárea de bosque. En este sentido, representa una gran ventaja contar con el factor de forma verdadero para este bosque, obtenido por Albán y Sánchez (2013), ya que esto genera mayor precisión en las estimaciones del modelo.

El uso de modelos matemáticos suelen ser muy acertados a la hora de realizar un muestreo de cuantificación de alguna variable, teniendo previamente un modelo definido para determinada situación (Albán y Sánchez, 2013). Para aplicar un modelo se debe considerar el ajuste y el error que éste presente, pero en ocasiones existen modelos que resultan con coeficientes de correlación un poco más altos que los demás, pero no son aplicables en el área forestal. En este orden de ideas, de acuerdo con Montalvo *et al.* (2001) fue acertada la elección del modelo de Gompertz para el cálculo del volumen, ya que a nivel agropecuario éste es el que mejor se ajusta para el cálculo de ésta variable.

Ahora bien, otra variable necesaria para el cálculo de la biomasa es la densidad básica promedio de la madera, la cual se determinó para los árboles de la parcela permanente en la reserva Arrayanales. El valor obtenido fue 0,54 (t/m<sup>3</sup>), y aunque se encuentra dentro del rango común (0,50 – 0,69) según reportes de Brown (1997) para especies tropicales de América, se debe mencionar que la metodología aplicada en este estudio podría estar subestimando, no se sabe en qué medida, el valor de esta variable. Esto debido a que el instrumento utilizado para este fin (berbiquí), no resultó totalmente eficiente al no poder perforar el tronco a una mayor profundidad de la requerida (más de 5 cm). En lugar de éste se recomienda emplear un taladro de pressler o barreno forestal, el cual perfora el tronco con más facilidad a una mayor profundidad (más de 10 cm), con lo cual se puede mejorar la precisión en el cálculo de la densidad de la madera porque se estaría ampliando el volumen de las muestras.

Así pues, empleando los valores de volumen y de densidad básica de la madera se obtuvo la biomasa del volumen, pero como en el procedimiento metodológico se excluyó la biomasa de ramas y follaje, fue necesario incorporarla mediante la generación y utilización de un Factor de Expansión de Biomasa (FEB), y así estimar la biomasa aérea total. El FEB varía según el grado de intervención del bosque, para bosques cerrados y menos alterados es menor y para bosques abiertos y con mayor alteración es mayor. En general, para diferentes tipos de bosque, los valores fluctúan entre 2,23 y 2,88 con valores mínimos de 1,52 y

máximos de 4,92 (Dauber *et al.*, 2000). El FEB generado para este estudio se puede considerar dentro del rango general con un valor de 2,20.

La biomasa aérea para el bosque de la RSC Arrayanales se cuantificó en 265,04 t/ha, valor que se encuentra cercano al de otras investigaciones realizadas en bosques tropicales secundarios empleando metodologías similares a la de este estudio. López *et al.* (2002) reportaron 223 t/ha en bosques húmedos tropicales del Ecuador; Steininger (2000) reportó 200 t/ha en bosques tropicales secundarios del Brasil; en Colombia, Álvarez *et al.* (2013) cuantificaron 227 t/ha de biomasa aérea en un bosque secundario poco intervenido en la región del Bajo Calima, mientras que Agudelo (2009) estimó 279,73 t/ha en un bosque de roble (*Quercus humboldtii*) que hace parte del corredor de conservación de robles, Guantiva - La Rusia – Iguaque, ubicado en la vertiente occidental de la cordillera Oriental, en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander.

Otro de los métodos para estimar la biomasa aérea es mediante la aplicación de modelos alométricos. Diferentes autores como Chambers *et al.* (2001), Baker *et al.* (2004) y Chave *et al.* (2005) han desarrollado estos modelos a través del método destructivo de árboles. En la Tabla 3 se compara el resultado obtenido en este estudio con estimaciones de biomasa aérea calculadas para el bosque de la RSC Arrayanales, empleando los modelos alométricos propuestos por estos autores, recomendados para bosques tropicales tomando individuos con un DAP 5cm.

**Tabla 3.** Valores de biomasa aérea para el bosque de la RSC Arrayanales empleando diferentes modelos alométricos.

Modelo	Biomasa (t/ha)
Metodología aplicada estudio actual	265,04
Chambers <i>et al.</i> , 2001 <sup>1</sup>	476,83
Baker <i>et al.</i> , 2004 <sup>2</sup>	384,31
Chave <i>et al.</i> , 2005 <sup>3</sup>	419,07

$$^1 EXP(0,33 \times Ln(DAP) + 0,933 \times (Ln(DAP))^2 - 0,122 \times (Ln(DAP))^3 - 0,37)$$

$$^2 \rho/0,67 \times EXP(0,33 \times Ln(DAP) + 0,933 \times (Ln(DAP))^2 - 0,122 \times (Ln(DAP))^3 - 0,37)$$

$$^3 \rho \times EXP(-1,499 + 2,148 \times Ln(DAP) + 0,207 \times (Ln(DAP))^2 - 0,0281 \times (Ln(DAP))^3)$$

Como se puede observar en la Tabla 3, los valores de biomasa aérea mediante el uso de los modelos difieren mucho del resultado obtenido con la metodología aplicada en este estudio. Lo más importante que se debe tener en cuenta para una correcta interpretación de estos resultados es que dichos modelos fueron desarrollados en bosques con características estructurales y florísticas diferentes a las del bosque en estudio. También se debe considerar que los modelos fueron

desarrollados con mediciones realizadas empleando un método destructivo, que en teoría representa más confiabilidad y precisión que las mediciones de los árboles en pie. Asimismo, de acuerdo con Dantas de Paula *et al.*(2011), los bosques secundarios que han sido fragmentados por acciones antropogénicas tienden a acumular menos biomasa que los bosques maduros. Cabe resaltar que estos estudios son referencias valiosas que sirven como base para la generación de modelos con variables específicas para una determinada zona de estudio.

En relación al stock de carbono presente a lo largo del gradiente (borde – interior), los resultados indicaron que los valores más altos se encuentran cerca al borde y van disminuyendo gradualmente hacia el interior del bosque (Figura 5). Este comportamiento observado es opuesto a la hipótesis esperada para un fragmento de bosque, la cual propone que si en el borde los árboles son más dinámicos entonces deben acumular menos biomasa y, por ende, menos carbono. De igual forma, estudios realizados por Laurance *et al.* (1997) y Quesada *et al.* (2012) muestran la incidencia que tiene el efecto de borde en la dinámica de los árboles (crecen más y mueren más) y lo que esto implica para el proceso de acumulación de biomasa (los bosques menos dinámicos acumulan mayor biomasa).

A partir de los valores de contenido de carbono encontrados a diferentes distancias del gradiente se induce que ciertas características como el tamaño y la forma del fragmento de bosque estarían influyendo en este proceso de almacenamiento, esto teniendo en cuenta que el bosque estudiado además de ser estrecho presenta una forma muy irregular, que además pone en discusión la presencia o ausencia de una verdadera zona de interior.

Lo anterior podría explicar que, como lo muestra la Figura 5, el valor más alto de stock de carbono se encontró a los 20 m, distancia que está aproximadamente en la mitad del gradiente, o quizás, en la mitad de los dos bordes que estarían en cada extremo del gradiente, por consiguiente, si ésta es la zona menos dinámica puede acumular más carbono.

Para el interés de este estudio, se midieron las variables microclimáticas del bosque empleando los mismos transectos donde se estimó el stock de carbono a lo largo del gradiente, esto con el fin de encontrar una posible relación con las características de la vegetación; además, se debe tener en cuenta que el efecto del clima es un factor determinante en la dinámica del bosque (Bruna y De Andrade, 2011; Quesada *et al.*, 2012).

De este modo se establecieron tendencias de cambio para los comportamientos de estas variables, presentando una correlación baja pero significativa entre el microclima y las distancias del gradiente, lo cual estaría indicando que la vegetación de la parcela permanente está determinada por algún patrón espacial, florístico y/o estructural que influye significativamente en el microclima del bosque.

Pero en este caso es preciso resaltar que según Rovis y Sarria (2013), el bosque de la reserva Arrayanales se caracteriza por tener una buena tasa de relevo generacional presentando un alto porcentaje de individuos en la clase diamétrica de 5 a 20 cm de DAP, que están distribuidos tanto en el borde como al interior, sin presentarse una distribución marcada. Esto significa que aparte de la vegetación, debe existir otro factor que está incidiendo de manera más fuerte en dicho comportamiento. Por tal motivo es importante detallar que al interior del bosque pasa una quebrada que lo atraviesa, por lo tanto, a medida que se avanza en distancia desde el borde, ésta se convierte en un factor que se debe tener en cuenta para explicar los cambios observados.

Los resultados del microclima para este bosque se asemejan con los obtenidos por Mosquera (2009) analizando un gradiente constitutivo (matriz - borde - interior) en bosques de páramo (Parque Nacional Natural Puracé, Colombia). En ambos estudios se encontraron similitudes en las tendencias de cambio de las variables a partir del borde hacia el interior (50 m), pero en dichos bosques paramunos sí se presentaron diferencias significativas debido a cambios importantes en la estructura y composición de la vegetación a lo largo del gradiente, aspecto que está relacionado con los estados de conservación de cada ecosistema estudiado.

## 8. CONCLUSIONES

La aplicación de modelos matemáticos es una herramienta versátil que puede significar un ahorro en tiempo y dinero, pero debe ajustarse adecuadamente a los intereses del estudio para generar datos confiables y precisos.

El contenido de biomasa aérea en el bosque de la RSC Arrayanales es aprox. 265 toneladas por hectárea.

El stock de carbono para el bosque de la RSC Arrayanales es aprox. 132 toneladas por hectárea.

Una hectárea de bosque de la RSC Arrayanales contribuye a fijar aproximadamente 486 toneladas de dióxido de carbono presentes en la atmósfera.

Los resultados de biomasa aérea, carbono almacenado y dióxido de carbono fijado, valoran al bosque como un recurso biológico, que en relación con las características microclimáticas, resaltan la importancia de la protección y conservación de los bosques andinos en un contexto de cambio climático.

Los beneficios adicionales de conservación de la diversidad biológica, protección del medio ambiente y desarrollo sustentable hacen que los proyectos forestales sean aún más atractivos como estrategia en lo relacionado al cambio climático.

Se evidenció que el área de reserva es estrecha, lo cual limita el funcionamiento ecológico del bosque, por consiguiente, al mejorar la conexión entre fragmentos de bosque y si se procura la regeneración de los mismos se lograría optimizar el servicio ecosistémico de regulación climática que ellos nos brindan.

Este trabajo tiene como fin aportar al proceso de formulación de estrategias que permitan optimizar la gestión integral de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos, mediante la implementación de herramientas como las parcelas permanentes para tal fin.

## 9. RECOMENDACIONES

Se recomienda mejorar los cercos alrededor de la zona de estudio aislando al ganado que se encuentra alrededor en potreros de pastoreo para ayudar a prevenir posibles impactos antropogénicos en las áreas de influencia del bosque.

Es necesario ampliar las áreas de reserva para obtener mayores cifras de captura de CO<sub>2</sub> y almacenamiento de carbono.

Es necesaria la generación continua de proyectos en la parcela permanente de la RSC Arrayanales que permitan su mantenimiento y aporten al conocimiento de los interrogantes de los procesos que ocurren a largo plazo relacionados con la dinámica ecosistémica, la demografía de plantas, los ciclos biogeoquímicos y los servicios ambientales que brindan a la comunidad.

Para futuros estudios en el bosque de la RSC Arrayanales se sugiere el uso del modelo de volumen determinado en este estudio, por su alta precisión y porque favorece el rendimiento de toma de datos. Asimismo, el uso de este modelo en bosques andinos con características similares al bosque del presente estudio.

Para lograr mejores ajustes en las mediciones de cualquier tipo de bosque, es conveniente hacer uso de equipos y herramientas adecuadas que garanticen una alta precisión, como relascopios electrónicos e hipsómetros láser, que disminuyen el error en la toma de datos durante un inventario; de igual manera, para el registro de las variables microclimáticas emplear equipos modernos con alta sensibilidad que permitan observar las pequeñas variaciones con mayor exactitud.

Para hacer más precisa la estimación de biomasa y carbono en la RSC Arrayanales, se recomienda tomar densidades de la madera para cada uno de los individuos presentes mediante el uso de un taladro de pressler o mejor conocido como barreno.

Se sugiere tener en cuenta los estados de regeneración del bosque para futuros estudios de acumulación de carbono.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, M. I. Biomasa Aérea y Contenido de Carbono en Bosques de *Quercus humboldtii* y *Colombobalanus excelsa*: Corredor de Conservación de Robles Guantiva – La Rusia – Iguaque (Santander – Boyacá) Tesis de Pregrado en Administración del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Cali, Colombia. Universidad Autónoma de Occidente. 2009. 110 p.

ALBÁN, D. Y SÁNCHEZ, G. Ecuaciones de Altura y Volumen para el bosque de la Reserva Natural Arrayanales, Corregimiento Quintana, Municipio De Popayán. Trabajo de Pregrado en Ingeniería Forestal. Popayán, Colombia. Universidad del Cauca. 2013. 55 p.

ALBÁN, M. La información disponible sobre los servicios de ecosistemas de montaña en los Andes del Norte y Centro. Papallacta, Ecuador: 2007. 39 p.

ALPÍZAR, W. Caso para explicar los pormenores en la cuantificación de carbono en proyectos forestales, utilizando para ello las normas IPCC y la SGS. Costa Rica: Oficina Costarricense de Implementación Conjunta (OCIC). 1997. Versión en mimeógrafo, sin numeración de páginas.

ÁLVAREZ, A. V., RUENES, V., RODRÍGUEZ, N., MELO, O. Y MARTÍNEZ, H. Biomasa Aérea de Bosques Secundarios en la Región del Bajo Calima, Pacífico Colombiano. Ibagué, Colombia: Universidad del Tolima, 2013.

ANAYA, J. A., CHUVIECO, E. Y PALACIOS-ORUETA, A. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. En: Forest Ecology and Management. 2009. 257 (4): 1237-1246.

AUSSENAC, G. Interactions between Climates and Forests at the Local, Regional and Global Levels. En: Sustainable forests management: contribution of research. Birot, Y., 1997. p. 1-16.

AUSSENAC, G. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. En: Annals of Forest Science. 2000. 57: 287-301.

BAKER, T., PHILLIPS, O., MALHI, Y., ALMEIDA, S., ARROYO, L., DI FIORE, A., ERWIN, T., KILLEEN, T., LAURANCE, S., LAURANCE, W., LEWIS, S., LLOYD, J., MONTEAGUDO, A., NEILL, D., PATIÑO, S., PITMAN, N., SILVA, N. Y VÁSQUEZ, R. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. En: Global Change Biology. 2004. 10: 545–562.

BARNES, B. V., ZAK, D. R., DENTON, S. R. Y SPURR, S. H. Forest ecology. 4 ed. New York, USA: John Wiley, 1998. 774 p.

BATES, B. C., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S. Y PALUTIKOF, J. P. El Cambio Climático y el Agua. En: Documento Técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 2008. 224 p.

BIBO. ¿Una casa sin bosques?. Bogotá D.C.: El Espectador, 2011. 4 p.

BOLFOR Y PROMABOSQUE. Guía para la Instalación y Evaluación de Parcelas Permanentes de Muestreo (PPMs). Santa Cruz, Bolivia: Ramiro Duchén, 1999. 52 p.

BOYD, J. Y BANZHAF, S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. En: Ecological Economics. 2007. 63 (2–3): 616-626.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 1997. 57 p.

BROWN, S. Assessment of the Advantages and Limitations of Ground-Based Surveys and Inventories. UNFCCC Workshop on Methodological Issues Relating to REDD in Developing Countries. Tokyo, Japón: Winrock International, 2008.

BRUNA, E. M. Y DE ANDRADE, A. S. Edge effects on growth and biomass partitioning of an Amazonian understory herb (*Heliconia acuminata*; Heliconiaceae). En: American Journal of Botany. 2011. 98 (10): 1727-1734.

BUBB, P., MAY, I. A., MILES, L. Y SAYER, J. Cloud forest agenda. Mountain Cloud Forest Initiative. UNEP World Conservation Monitoring Centre, 2004.

CARR, A., DE STOLL, A. C., MAN, U. N. C. F., DIRECTORATE, T. B. T. E. Y SOCIETY, W. C. Monitoreo biológico en la Selva Maya. 1999.

CARVAJAL, A. F., FEIJOO, A., QUINTERO, H. Y RONDÓN, M. A. Carbono Orgánico del Suelo en Diferentes Usos del Terreno de Paisajes Andinos Colombianos. En: Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 2009. 9: 222-235.

CASTAÑO, N. Monitoreo del bosque natural en la Amazonía, repercusiones para el manejo sostenible. Departamento\_Nacional\_de\_Planeación. 2011.

CIAT. Diseño del Protocolo para la Caracterización de los Ciclos de Carbono y Agua en Ecosistemas de Alta Montaña. Informe III. Modelo Conceptual, Algoritmo y Documentos de Soporte. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2006.



CRC-UNICAUCA. Estudio de las corrientes superficiales de la meseta de Popayán y su potencial hídrico. Informe Técnico. Popayán, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), Universidad Del Cauca (Unicauca), 1994. 150 p.

CRC. Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca Hidrográfica del Río Las Piedras. Popayán, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), 2006. 456 p.

CHAMBERS, J., DOS SANTOS, J., RIBEIRO, R. Y HIGUCHI, N. Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. En: *Forest Ecology and Management*. 2001. 152 (1–3): 73-84.

CHAVE, J., ANDALO, C., BROWN, S., CAIRNS, M., CHAMBERS, J., EAMUS, D., FÖLSTER, H., FROMARD, F., HIGUCHI, N. Y KIRA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. En: *Oecologia*. 2005. 145 (1): 87-99.

CHEN, J., SAUNDERS, S., CROW, T., NAIMAN, R., BROSOFSKE, K., MROZ, G., BROOKSHIRE, B. Y FRANKLIN, J. Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology. Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. En: *BioScience*. 1999. 49 (4): 288-297.

DAILY, G. C. Introduction: What Are Ecosystem Services? En: *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Daily, G., 1997. p. 1–10.

DANTAS DE PAULA, M., ALVES, C. Y TABARELLI, M. Carbon storage in a fragmented landscape of Atlantic forest: the role played by edge-affected habitats and emergent trees. En: *Tropical Conservation Science*. 2011. 4 ( 3): 349-358.

DAUBER, E., TERÁN, J. Y GUZMÁN, R. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. En: *Revista Forestal Iberoamericana*. 2000. 1 (1): 10.

DEL VALLE, J. I. Curva preliminar del cativo (*Prioria copaifera*) en bosque virgen empleando el método de los tiempos de paso en bosques inundables del Chocó, Pacífico colombiano. En: *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía*. 1979. 32 (2): 19-42.

DÍAZ, E. B. Distribución del contenido de carbono orgánico en agregados de diferentes tamaños, procedentes de varios sistemas de uso y altitudes en suelos de la cuenca del río Cauca, Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Palmira, Valle del Cauca. Universidad Nacional de Colombia. 2008. 73 p.

EGUIGUREN, P., OJEDA, T. Y AGUIRRE, N. Diversidad Florística del Ecosistema Páramo del Parque Nacional Podocarpus para el Monitoreo del Cambio Climático. 2010. 14 p.

ETTER, A. Introducción a la Ecología del Paisaje, un marco de integración para los levantamientos rurales. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 1991. 84 p.

FEHSE, J., HOFSTEDE, R., AGUIRRE, N., PALADINES, C., KOOIJMAN, A. Y SEVINK, J. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink?. En: Forest Ecology and Management. 2002. 163 (1-3): 9-25.

FIGUEROA, A. Ecología y Fragmentación. En: Fragmentación y coberturas vegetales de ecosistemas andinos, departamento del Cauca. Figueroa-Casas, A. y Valencia-Rojas, M., 2009. p. 17-40.

FORMAN, R. Y GODRON, M. Landscape ecology. En: Estados Unidos de América: Jhon Wiley and Sons. 1986. vol. 619.

FPCR. Proyecto: Consolidación de la Red de Reservas Campesinas de la Cuenca del Río Las Piedras, Municipio de Popayán, Departamento del Cauca. Popayán, Colombia: Fundación Pro Cuenca Río Las Piedras, 2005.

GÁLMEZ, V. Y KÓMETTER, R. Perspectivas y posibilidades de REDD+ en Bosques Andinos. Serie Investigación y Sistematización # 11. 1 ed. Lima, Perú: Programa Regional ECOBONA - INTERCOOPERATION, 2009. 126 p.

GASPARRI, I. Y MANGHI, E. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales Argentinas. Argentina: Ministerio de Salud y Ambiente, 2004. 26 p.

GAST-HARDERS, F. Presentación. En: Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Bogotá D.C.: IIRBAvH, 2005. p. 15-16.

GEIGER, R., ARON, R. H. Y TODHUNTER, P. The climate near the ground. 6 ed. USA: Rowman & Littlefield Pub Inc, 2003.

GONZÁLEZ, H. Análisis del crecimiento diamétrico de *Prioria copaifera* en condiciones naturales por medio de un modelo matemático determinístico. En: Crónica Forestal y del Medio Ambiente. 1995. 10: 101-120.

GREZ, A. Y SALAZAR, A. Efectos de los patrones del uso del suelo sobre la dinámica espacio-temporal del bosque maulino de la Séptima región, Chile. Universidad de Chile. 2005.

HONORIO, E. Y BAKER, T. Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. 1 ed. Lima, Perú: Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. Universidad de Leeds., 2010. 54 p.

IDEAM. Monitoreo de los Ciclos de Agua y Carbono en Ecosistemas de Alta Montaña. Proyecto Piloto Nacional de Adaptación en Cambio Climático Inap – Alta Montaña. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2011. p. 24-25

IIRBAvH. Concepto técnico pertinente a la delimitación y caracterización del sistema paramuno en el área de la serranía de Santurban ubicada en el departamento de Santander, solicitado por la dirección de licencias - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IIRBAvH), 2011. 23 p.

IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook and Reference Manual Revised. UNEP, WMO, 1996.

IRASTORZA-VACA, P. Integración de la ecología del paisaje en la planificación territorial: Aplicación a la comunidad de Madrid. Tesis Doctoral en Ingeniería de Montes. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 2006. 274 p.

KAPPELLE, M., VAN VUUREN, M. M. I. Y BAAS, P. Effects of climate change on biodiversity: a review and identification of key research issues. En: Biodiversity and Conservation. 1999. 8 (10): 1383-1397.

LEE, R. Forest microclimatology. New York, USA: Columbia University Press, 1978. 276 p.

LEÓN, J. D. Y GIRALDO, G. Crecimiento diamétrico en robledades del norte y centro de Antioquia. En: Crónica Forestal y del Medio Ambiente. 2000. 15: 121-138.

LONDOÑO, A. C. Dinámica arbórea en la Amazonia colombiana: El caso de dos bosques (tierra firme y várzea) en la región de Araracuara. Tesis Ph.D. Universidad de Amsterdam, Instituto IBED. 2005.

LONDOÑO, A. C. Y ÁLVAREZ, E. Composición florística de dos bosques (tierra firme y várzea) en la región de Araracuara, Amazonia colombiana. En: Caldasia. 1997. 19 (3): 431-463.

LONDOÑO, L. F. Y GONZÁLEZ, H. Identificación de variables relacionadas con el crecimiento diamétrico del cativo (*Prioria copaifera*). En: Crónica Forestal y del Medio Ambiente. 1993. 8: 25-34.

LÓPEZ, M., DE KONING, F., PAREDES, H. Y BENÍTEZ, P. Estimación de carbono en biomasa de bosques secundarios y plantaciones forestales en el Noroccidente de Ecuador. Eschborn, Alemania: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2002. 42 p.

LÓPEZ, W. Y DUQUE, A. Patrones de diversidad alfa en tres fragmentos de bosques montanos en la región norte de los Andes, Colombia. En: Revista de Biología Tropical. 2010. 58: 483-498.

MACACEA. Programa de Monitoreo Ambiental para Cambio Climático en Ecosistemas Agrícolas Altoandinos - Fase I y II. Popayán, Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colciencias, Grupo de Estudios Ambientales, Universidad del Cauca. 2008-2012.

MACNALLY, R. Y BENNETT, A. F. Species-specific predictions of the impact of habitat fragmentation: Local extinction of birds in the box-ironbark forests of central Victoria, Australia. En: Biological Conservation. 1997. 82 (2): 147-155.

MARQUES, V. Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade. Título de Mestre em Ecologia Aplicada. Piracicaba. Universidade de Sao Paulo. 2007.

MOLINA, M. Parcelas de bosque permanente en bosque natural. Tenoforest del Norte S.A. , 1988. 11 p.

MONTALVO, J. M., BUENO, S. Y TORRES, J. G. Ecuación para el cálculo del volumen del árbol para *Pinus occidentalis* Sw., en el plan sierra, República Dominicana. En: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 2001. 7 (1): 49-53.

MORALES, J. A. Y ESTÉVEZ, J. V. El Páramo: ¿Ecosistema en Vía de Extinción? En: Revista Luna Azul. 2006. 22: 39 - 51.

MOSCOVICI, S. Y MARI , S. Essai sur l'histoire humaine de la nature. Flammarion, 1968. 606 p.

MOSQUERA, A. Caracterización de dos zonas de transición, mediante el análisis de las coberturas vegetales y variables microambientales en una zona de páramo, en el sector Nororiental del Parque Nacional Natural Puracé. Tesis de Pregrado en Biología. Popayán, Colombia. Universidad del Cauca. 2009. 103 p.

OPEPA (ORGANIZACIÓN PARA LA EDUCACIÓN Y PROTECCIÓN AMBIENTAL) [citado en 17 de Febrero de 2013]. Disponible en Internet: [http://www.opepa.org/index.php?Itemid=31&id=198&option=com\\_content&task=view](http://www.opepa.org/index.php?Itemid=31&id=198&option=com_content&task=view).

ORREGO, S. A., DEL VALLE, J. I. Y MORENO, F. H. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente, Bogotá., 2003. 314 p.

PEÑA, K., CALDERÓN, S., MARTÍNEZ, G., LENCINAS, M., SOLER, R., PERI, P., BAHAMONDE, H., CELLINI, J., ARANDA, X., SAVÉ, R. Y ESPELTA, J. Gestión forestal sostenible de los bosques Andino Patagónicos de *Nothofagus*: Estrategias de adaptación y mitigación para el manejo y la conservación debido al cambio climático BOSAMCA. 2011.

PNNC (PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA) [citado en Enero de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/decide.php?patron=01.201203>.

PRODAN, M., PETERS, R., COX, F., REAL, P. Mensura Forestal 1. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Costa Rica: IICA-BMZ/GTZ, 1997. 561 p.

QUESADA, C. A., PHILLIPS, O. L., SCHWARZ, M., CZIMCZIK, C., BAKER, T. R., PATINO, S., FYLLAS, N. M., HODNETT, M. G., HERRERA, R. Y ALMEIDA, S. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. En: *Biogeosciences*. 2012. 9: 2203-2246.

RAMÍREZ-PADILLA, B. Principios y Métodos en Ecología Vegetal. Popayán: UNICAUCA, ICFES, SED, BID, ACCB, CRC, 1995. 45 p.

RODRÍGUEZ, J. Y PRATT, L. Potencial de Carbono y Fijación de Dióxido de Carbono de la Biomasa en Pie por Encima del Suelo en los Bosques de Guatemala. 1998. 48 p.

RODRÍGUEZ, M. A., AIZEN, M. A. Y NOVARO, A. J. Habitat fragmentation disrupts a plant-disperser mutualism in the temperate forest of South America. En: *Biological Conservation*. 2007. 139 (1-2): 195-202.

ROVIS, J. Y SARRIA, A. Caracterización florística y estructural del bosque natural de la reserva Arrayanales, en la vereda Quintana, municipio de Popayán. Trabajo de Pregrado en Ingeniería Forestal. Popayán. Universidad del Cauca. 2013. 53 p.

RÜGNITZ, M. T., CHACÓN, M. L. Y PORRO, R. Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Lima, Perú: ICRAF Technical Manual, 2009. 79 p.

SAMPER, C. Biodiversidad de Colombia: una visión a largo plazo. En: *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia*. Bogotá D.C.: IIRBAvH, 2005. p. 17-18.

SOETHE, N., LEHMANN, J. Y ENGELS, C. Carbon and nutrient stocks of forests at different altitudes in the Ecuadorian Andes. En: Journal of Tropical Ecology. 2007. 23: 319-328.

STEININGER, M. Secondary Forest Structure and Biomass Following Short and Extended Land-Use in Central and Southern Amazonia. En: Journal of Tropical Ecology. 2000. 16 (5): 689-708.

TRESS, B., TRESS, G., DÉCAMPS, H. Y D'HAUTESERRE, A.-M. Bridging human and natural sciences in landscape research. En: Landscape and Urban Planning. 2001. 57 (3-4): 137-141.

UICN (UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA) [citado en 12 de Marzo de 2012]. Disponible en Internet: [http://iucn.org/es/sobre/union/secretaria/oficinas/sudamerica/sur\\_trabajo/sur\\_bosquesam/sur\\_bosques\\_cambio\\_climatico/sur\\_bosques\\_redd/](http://iucn.org/es/sobre/union/secretaria/oficinas/sudamerica/sur_trabajo/sur_bosquesam/sur_bosques_cambio_climatico/sur_bosques_redd/).

VALLEJO, M., LONDOÑO, A., LÓPEZ, R., GALEANO, G., ÁLVAREZ, E. Y DEVIA, W. Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Métodos para estudios ecológicos a largo plazo Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 2005. 310 p.

VANCLAY, J.K. Growth Models for Tropical Forest: A synthesis of Models and Methods. En: Forest Science. 1995. 41: 7 - 42.

VILLARROEL, L. Aplicación de la regresión ponderada en la construcción de tablas de volumen (*Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*). Cochabamba, Bolivia: PROFOR. 20 p.

VILLERS, L. Y TREJO, I. El cambio climático y la vegetación en México. En: México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. 2003. p. 57-72.

WILCKE, W., HESS, T., BENDEL, C., HOMEIER, J., VALAREZO, C. Y ZECH, W. Coarse woody debris in a montane forest in Ecuador: mass, C and nutrient stock, and turnover. En: Forest Ecology and Management. 2005. 205 (1-3): 139-147.

WORM, B. Exploitation. En: Encyclopedia of Ecology. Oxford: Sven Erik, J. y Brian, F. 2008. p. 1522-1527.

YEPES, A. P., NAVARRETE, D. A., DUQUE, A. J., PHILLIPS, J. F., CABRERA, K. R., ÁLVAREZ, E., GARCÍA, M. C. Y ORDOÑEZ, M. F. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2011. 162 p.

**Anexo A.** Especies más abundantes en la RSC Arrayanales, vereda Quintana, municipio de Popayán. (Fuente: Rovis y Sarria, 2013).



*Nectandra reticulata*



*Myrcianthes sp.*



*Croton sp.*



*Guarea kunthiana*



*Chrysochlamys sp.*



*Quercus humboldtii*

**Anexo B.** Cálculos de la densidad básica promedio de la madera para el bosque de la RSC Arrayanales.

sp.*	Código Árbol	Peso Probeta1 (g)	Peso Total1 (g)	Masa Verde (g)	Vol. Verde (mL)	Peso Probeta2 (g)	Peso Total2 (g)	Masa Seca (g)	Vol. Seco (mL)	Densidad Básica (g/mL)
1	A-2-2	36,6	41,5	4,9	5,0	36,6	39,3	2,7	5,0	0,54
	B-4-25	36,6	42,1	5,5	5,0	36,6	38,8	2,2	4,7	0,44
	C-3-31	36,6	40,6	4,0	5,0	36,6	39,0	2,4	4,9	0,48
	A-3-9	37,1	41,2	4,1	5,0	36,6	39,2	2,6	4,8	0,52
	O-2-11	37,1	41,8	4,7	5,0	36,6	39,0	2,4	5,0	0,48
	M-3-2	37,1	40,9	3,8	5,0	36,6	39,2	2,6	4,8	0,52
2	E-3-4	37,1	42,5	5,4	5,0	36,6	39,5	2,9	4,7	0,58
	L-1-12	37,1	41,9	4,8	5,0	36,6	39,3	2,7	5,0	0,54
	Ñ-2-6	37,1	41,3	4,2	5,0	36,6	39,3	2,7	4,9	0,54
	P-3-33	37,1	41,3	4,2	5,0	36,6	39,4	2,8	4,7	0,56
	R-1-24	37,1	40,2	3,1	5,0	36,6	38,8	2,2	5,0	0,44
	L-2-6	37,1	41,8	4,7	5,0	36,6	39,5	2,9	4,9	0,58
3	A-2-12	37,1	42,2	5,1	5,0	36,6	39,8	3,2	4,8	0,64
	B-2-1	37,1	41,7	4,6	5,0	36,6	39,7	3,1	4,8	0,62
	C-2-36	37,1	41,7	4,6	5,0	36,6	39,6	3,0	4,8	0,60
	G-1-23	37,1	41,1	4,0	5,0	36,6	39,4	2,8	4,9	0,56
	I-2-1	37,1	42,1	5,0	5,0	36,6	39,9	3,3	4,9	0,66
	O-4-28	37,1	42,3	5,2	5,0	36,6	39,2	2,6	5,0	0,52
4	D-2-8	37,1	41,4	4,3	5,0	36,6	39,2	2,6	4,9	0,52
	E-2-19	37,1	40,6	3,5	5,0	36,6	39,2	2,6	4,8	0,52
	F-2-9	37,1	40,5	3,4	5,0	36,6	39,2	2,6	4,8	0,52
	I-2-7	37,1	41,2	4,1	5,0	36,6	39,7	3,1	4,7	0,62
	A-1-4	37,1	41,0	3,9	5,0	36,6	39,6	3,0	5,0	0,60
	O-3-2	36,6	41,9	5,3	5,0	36,6	39,1	2,5	4,9	0,50
5	C-3-28	36,6	40,1	3,5	5,0	36,6	39,0	2,4	5,0	0,48
	C-2-43	36,6	41,8	5,2	5,0	36,6	39,5	2,9	4,9	0,58
	Q-4-20	36,6	40,3	3,7	5,0	36,6	39,3	2,7	4,7	0,54
	R-3-1	36,6	40,7	4,1	5,0	36,6	39,2	2,6	4,9	0,52
	R-3-2	36,6	39,8	3,2	5,0	36,6	38,9	2,3	5,0	0,46
	O-1-22	36,6	40,3	3,7	5,0	36,6	39,1	2,5	4,9	0,50
6	B-2-6	36,6	42,1	5,5	5,0	36,6	39,0	2,4	4,4	0,48
	D-1-52	36,6	40,1	3,5	5,0	36,6	39,1	2,5	4,7	0,50
	E-2-27	36,6	41,9	5,3	5,0	36,6	39,6	3,0	4,8	0,60
	J-2-4	36,6	40,6	4,0	5,0	36,6	39,6	3,0	4,6	0,60
	R-2-12	36,6	39,9	3,3	5,0	36,6	38,8	2,2	4,8	0,44
	R-2-15	36,6	41,2	4,6	5,0	36,6	39,8	3,2	4,6	0,64
<b>PROMEDIO DENSIDAD</b>										<b>0,54</b>

\*Especie (sp.):

1. *Chrysochlamys* sp.
2. *Guarea kunthiana*
3. *Nectandra reticulata*
4. *Myrcianthes* sp.
5. *Croton* sp.
6. *Quercus humboldtii*